



CONTRIBUIÇÃO AO ENTENDIMENTO DO COMPORTAMENTO
ESTRUTURAL DE PAREDES DE CONTRAVENTAMENTO DE
ALVENARIA NÃO ARMADA DOTADAS DE ABERTURAS SUBMETIDAS
A CARREGAMENTO LATERAL

Fernando Artur Nogueira Silva

Tese de Doutorado submetida à Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte integrante dos
requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil

Área de Concentração: Estruturas

Romilde Almeida de Oliveira, D.Sc.
Orientador, UFPE-BR

Paulo José Barbosa Lourenço, Ph.D
Có-orientador, UMINHO-PT

Recife, Pernambuco, Brasil
Janeiro de 2006

Silva, Fernando Artur Nogueira

Contribuição ao entendimento do comportamento estrutural de paredes de contraventamento de alvenaria não armada dotadas de aberturas submetidas a carregamento lateral / Fernando Artur Nogueira Silva. – Recife : O Autor, 2006.

367 folhas : il., fig., tab., gráf.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, 2006

Inclui bibliografia e anexos.

1. Engenharia civil – Estruturas. 2. Alvenaria estrutural – Paredes de contraventamento – Aberturas. 3. Ações laterais – Carregamento lateral – Ação do vento e desaprumo. 4. Edificações em alvenaria – Comportamento estrutural – Tensões e deformações – Distribuição de ações laterais. I. Título.

624.072

624.176

CDU (2. ed.)

CDU (22.ed.)

UFPE



CONTRIBUIÇÃO AO ENTENDIMENTO DO COMPORTAMENTO
ESTRUTURAL DE PAREDES DE CONTRAVENTAMENTO DE ALVENARIA
NÃO ARMADA DOTADAS DE ABERTURAS SUBMETIDAS A
CARREGAMENTO LATERAL

Fernando Artur Nogueira Silva

Tese de Doutorado aprovada pela Coordenação do Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como parte integrante dos
requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil

Romilde Almeida de Oliveira, D. Sc.
Orientador, UFPE-BR

Paulo José Brandão Barbosa Lourenço, Ph. D.
Co-Orientador, UMINHO-PT

Prof. Bernardo Horowitz, Ph. D.
Examinador Interno, UFPE

Prof. Ézio da Rocha Araújo, D. Sc.
Examinador Interno, UFPE

Prof. Humberto Ramos Roman, Ph. D.
Examinador Interno, UFSC

Prof. Evandro Parente Júnior, D./Sc.
Examinador Interno, UFC

Janeiro, 2006
Recife, Pernambuco, Brasil

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais, a minha esposa Maria Tereza e a meus filhos Marcela e Breno.

Agradecimentos

A pesquisa relatada nesta tese foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco durante os anos de 2001 a 2002 e 2004 a 2005. Durante o ano de 2003, parte da pesquisa foi desenvolvida na Universidade do Minho em Portugal.

As atividades desenvolvidas no Brasil foram correram sob a supervisão do Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira e as atividades desenvolvidas em Portugal contaram com a supervisão do Prof. Dr. Paulo Barbosa Lourenço. Agradeço nesta oportunidade a dedicação e o interesse que ambos dispensaram à presente pesquisa.

Ao Prof. Paulo Lourenço um especial agradecimento pela excelente acolhida na cidade de Guimarães em Portugal.

Agradeço à Universidade Católica de Pernambuco pela liberação de minhas atividades acadêmicas para o desenvolvimento de parte da pesquisa na Universidade do Minho em Portugal.

Agradeço ao Tribunal de Contas do Estado de Pernambuco pelo importante incentivo à realização da presente pesquisa, concedendo-me licença para estudo.

Agradeço à CAPES pelo incentivo pecuniário durante as etapas desenvolvidas em Portugal.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco pelo convívio e incentivo constantes no desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço aos funcionários do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Pernambuco pelo modo atencioso e interessado com que sempre fui tratado.

Agradecimento especial à minha família pela compreensão e apoio durante os momentos difíceis que atravessei durante o desenvolvimento da pesquisa.

Resumo

SILVA, F. A. N. Contribuição ao entendimento do comportamento estrutural de paredes de contraventamento de alvenaria não armada dotadas de aberturas submetidas a carregamento lateral. Recife, 2006. 367p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Pernambuco.

O estudo desenvolvido nesta tese diz respeito ao comportamento estrutural de paredes de contraventamento de alvenaria não armada dotadas de aberturas e submetidas a solicitações que atuam em seu próprio plano. A motivação do tema está associada à importante influência que as aberturas introduzem no comportamento global de painéis de alvenaria que compõem o sistema de contraventamento de edificações em alvenaria estrutural, gerando redução na sua resistência e rigidez. O aspecto de maior interesse do estudo foi a avaliação da distribuição da força cortante entre os diversos membros verticais que integram as paredes dotadas de aberturas nos diversos estágios de carregamento a que são usualmente submetidas. Para o atingimento deste objetivo, foram realizadas extensivas análises numéricas através do Método dos Elementos Finitos em regime não linear considerando uma variada gama de geometrias comumente empregadas na prática construtiva de edifícios em alvenaria estrutural. Foram consideradas aberturas de portas e janelas, niveladas e não niveladas, bem como níveis de pré-compressão variados com a finalidade de avaliar a influência destes parâmetros no perfil de distribuição da força cortante aplicada.

Palavras-chave: alvenaria estrutural, ações laterais, paredes com aberturas, força cortante, alvenaria

Abstract

SILVA, F. A. N. Contribution to the understanding of the structural behavior of unreinforced shear walls masonry with openings subjected to lateral loads. Recife, 2006. 367p. PhD Thesis – School of Engineering of Federal University of Pernambuco.

The study developed in this thesis regards the structural behavior of unreinforced shear walls with openings subjected to lateral loads. The motivation of the subject is associated with the important influence that the openings introduce in the global behavior of masonry walls generating reduction in their resistance and stiffness. The aspect of major interest of the study was the evaluation of the distribution of shear forces among piers in several load levels that they are usually submitted. To achieve this objective, extensive nonlinear numerical analyses of usual structural masonry buildings using the Finite Element Method were performed. It was considered solid and pierced shear walls geometries with door and window openings at the same or not as well as different pre-compression levels varied with the purpose to evaluate the influence of these parameters in the profile of distribution of shear stresses.

Key-word: structural masonry, lateral loads, walls with openings, shear forces, masonry

Lista de Figuras

Figura 2-1 - Esquema das paredes com pequenas aberturas ensaiadas por Irmair e Miyamoto	43
Figura 2-2 - Esquema da paredes ensaiada por MATSUMO et al. 1987	43
Figura 2-3 - Modelo de ensaio da edificação de 5 Pavimentos (SEIBE et al., 1987)	44
Figura 2-4 - Modos de ruptura de painel de alvenaria submetido a cargas biaxiais no plano	46
Figura 2-5 - Tipos de ruptura no plano de elemento de alvenaria não armada.....	47
Figura 2-6 - Ruptura de parede com aberturas confinada por pórtico de aço	49
Figura 2-7 - Mecanismo de colapso por ruptura a cortante (figura de LIBERATORI D. et al, 2000)	50
Figura 2-8 - Elemento submetido a cisalhamento.....	50
Figura 2-9 - Condições de carregamento do ensaio (YOKEL e FATTAL, 1976).....	52
Figura 2-10 - Modos de ruptura típicos dos modelos ensaiados YOKEL e FATTAL (1976)	53
Figura 2-11 - Critério de ruptura biaxial (SAMARASINHE et al., 1981)	54
Figura 2-12 - Critério de ruptura em termos de τ e σ_y para σ_x variável	55
Figura 2-13 - Esquema de pórtico equivalente de uma parede carregada no plano	59
Figura 2-14 - Método das Ligações Flexíveis (G. Gonchorovski, 2001)	60
Figura 2-15 - Parede de contraventamento sem acoplamento.....	62
Figura 2-16 - Parede de contraventamento com acoplamento.....	62
Figura 2-17 - Distribuição do momento de tombamento.....	63
Figura 2-18 - Mecanismo de ruptura - Elemento Forte/Viga Fraca.....	65
Figura 2-19 - Mecanismo de ruptura - Viga Forte/Elemento Fraco	66
Figura 2-20 - Mecanismo combinado de ruptura	66
Figura 2-21 - Carregamento lateral e paredes de contraventamento (HENDRY, 1998)	67
Figura 2-22 - Deformações numa parede de contraventamento: (a) Cortante, (b) Flexão ...	68
Figura 2-23 - Parede de Contraventamento com Aberturas	70
Figura 2-24 - Segmento entre aberturas	72
Figura 2-25 - Parede sem aberturas (viga em balanço).....	73
Figura 2-26 - Distribuição de força cortante para os membros verticais.....	76
Figura 2-27 - Definição de uma cura elasto-plástica para ruptura por cisalhamento	78
Figura 3:1 - Estratégias de Modelagens para Alvenaria: (a) micro-modelagem detalhada, (b) micro-modelagem simplificada e (c) macro-modelagem.....	84
Figura 3:2 - Ilustração dos conceitos básico de elasticidade e plasticidade	85
Figura 3:3 - Tipos de plasticidade - caso unidimensional : (a) plasticidade perfeita, (b) plasticidade com endurecimento e (c) plasticidade com amolecimento.....	87
Figura 3:4 - Superfície de escoamento no espaço bidimensional das tensões principais	88
Figura 3:5 - Critério de von Mises: a) no espaço das tensões principais e b) no sub-espaço (σ, τ)	90
Figura 3:6 - Representação gráfico do critério de escoamento de Rankine.....	91
Figura 3:7 - Superfície de escoamento combinada Rankine/von Mises	92
Figura 3:8 - Representação do trabalho plástico	94
Figura 3:9 - Superfícies de escoamento Rankine e Hill para o compósito alvenaria (DAIANA, 1999)	96

Lista de Figuras

Figura 3:10 - Comportamento da alvenaria em tração uniaxial (esquerda) e compressão uniaxial (direita) ao longo de duas direções ortogonais [de acordo com (TC MMM N9, 2000: RILEM Technical Committee, Mechanical Modeling of Masonry)].....	96
Figura 3:11 - Diferentes possibilidades para a modelagem da alvenaria em compressão (DIANA, 1999)	97
Figura 3:12 - Diferentes possibilidades para a modelagem da alvenaria à tração - Constante e Linear (DIANA, 1999).....	97
Figura 3:13 - Alvenaria em tração - comportamento pós-pico (Diana, 1999)	98
Figura 3:14 - Ensaios utilizados para determinação das propriedades dos materiais	99
Figura 3:15 – Ensaios não padronizados para obtenção de α (a), β (b) e γ (c)	100
Figura 3:16 - Comportamento típico de materiais <i>quasi-frágeis</i> sobre carregamento uniaxial e definição da energia de fratura: (a) carregamento de tração (f_t indica a resistência a tração); (b) carregamento compressivo(f_c indica a resistência a compressão) (LOURENÇO, 1996).....	101
Figura 3:17 - Comportamento da alvenaria em corte e definição da energia de fratura do modo II.....	101
Figura 3:18 - Comportamento da alvenaria à tração de contato, Van de Pluijm: (a) corpo de prova; (b) típicos resultados experimentais de deslocamento tensão-fissura para alvenaria de blocos sólidos de argila (a área hachurada representa a envoltória de três testes)	102
Figura 3:19 - Comportamento da alvenaria à corte de contato das juntas de unidades sólidas de argila, VAN DER PLUIJM (1993): (a) curva tensão-deslocamento para diferentes níveis de tensão normal (a área hachurada representa a envoltória de três ensaios); (b) energia do modo de fratura I G_{fII} como função do nível de tensão normal (LOURENÇO, 1996).....	102
Figura 3:20 - Elemento para estado plano de tensões - Q8MEM	106
Figura 3:21 – Método incremental	108
Figura 3:22 – Método de Newton-Raphson.....	110
Figura 3:23 – Método de Newton-Raphson modificado	111
Figura 3:24 – Técnica do comprimento do arco: a) trajetória de carga ascendente-descendente (snap-through); b) trajetória da carga com retorno (snap-back)	113
Figura 3:25 – Modelo de endurecimento e amolecimento: a) relação tensão-deformação unitária para o caso uniaxial; b) relação tensão-deformação plástica equivalente.....	116
Figura 3:26 - Geometria e carregamento das paredes ETH Zurich (LOURENÇO, 1996)...	117
Figura 3:27 - Perfis experimentais de fissuração: (a) carga máxima; (b) ruptura	117
Figura 3:28 - Malha de elementos finitos utilizada	118
Figura 3:29 - Curva força horizontal x deslocamento horizontal no topo	119
Figura 3:30 - Resultados da análise em $d = 2,0$ mm : (a) malha deformada incremental; (b) fissuras	120
Figura 3:31 - Resultados da análise em $d = 13,0$ mm : (a) malha deformada incremental; (b) fissuras	120
Figura 3:32 - Tensões principais mínimas em (a) $d = 2,0$ mm e (b) $d = 13,0$ mm.....	121
Figura 4:1 - Modelos: (a) I ; (b) I-A (medidas em cm)	124
Figura 4:2 - Modelo I-B (medidas em cm)	125
Figura 4:3 - Modelos II (medidas em cm)	125
Figura 4:4 - Modelos: (a) III ; (b) III-A (medidas em cm).....	125
Figura 4:5 - Modelo III-B (medidas em cm).....	126
Figura 4:6 - Modelo IV (medidas em cm)	126

Lista de Figuras

Figura 4:7 – Modelo V (medidas em cm)	126
Figura 4:8 – Modelo VI (medidas em cm).....	127
Figura 4:9 – Representação gráfica do comportamento bi-modular da alvenaria.....	128
Figura 4:10 – Malha de elementos finitos típica utilizadas nas análises	128
Figura 4:11 – Variação da Energia de Fratura em Tração	130
Figura 4:12 – Variação da Energia de Fratura em Compressão	130
Figura 4:13 - Carregamentos aplicados e deslocamento horizontal de interesse	133
Figura 4:14 - Comportamento Força Horizontal x Distorção Angular: Caso II.....	134
Figura 4:15 – Degradação da rigidez x Distorção Angular: Caso II.....	134
Figura 4:16 - Comportamento Força Horizontal x Distorção Angular: Caso III.....	135
Figura 4:17 - Degradação da rigidez x Distorção Angular: Caso III.....	135
Figura 4:18 – Modos de ruptura típicos de paredes submetidas a carregamento no plano	140
Figura 4:19 – Ruptura por flexão de um membro vertical esbelto de alvenaria não armada	141
Figura 4:20 – Equilíbrio de um membro vertical de alvenaria submetido a carga vertical e horizontal	142
Figura 4:21 - Deformações principais máximas – Modelo I – F+X - Caso II.....	144
Figura 4:22 - Tensões principais mínimas – Modelo I – F+X - Caso II (N/mm ²).....	145
Figura 4:23 - Deformações principais máximas – Modelo I – F-X - Caso II.....	146
Figura 4:24 - Tensões principais mínimas – Modelo I – F-X - Caso II (N/mm ²).....	147
Figura 4:25 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo I – F+X: Caso II	150
Figura 4:26 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo I – F-X: Caso II	151
Figura 4:27 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo I-A – F+X: Caso II	151
Figura 4:28 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo I-A – F-X: Caso II	152
Figura 4:29 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo I-B – F+X: Caso II	152
Figura 4:30 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo I-B – F-X: Caso II	153
Figura 4:31 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo II – F+X: Caso II	153
Figura 4:32 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo II – F-X: Caso II	154
Figura 4:33 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo III – F+X: Caso II	154
Figura 4:34 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo III – F-X: Caso II	155
Figura 4:35 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo III-A – F+X: Caso II	155
Figura 4:36 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo III-A – F-X: Caso II	156
Figura 4:37 – Paredes de contraventamento de edificação de múltiplos andares	173
Figura 4:38 – Curva de capacidade de uma edificação.....	175
Figura 4:39 – Estágios da curva de capacidade de uma estrutura de alvenaria [Tomazevic, M., 1999].....	175

Lista de Figuras

Figura 4:40 – Deformações de fissuração para uma força lateral total de 40 kN – Modelo I: Dir. +X e -X.....	179
Figura 4:41 – Deformações de fissuração para uma força lateral total de 40 kN – Modelo IA: Dir. +X e -X	179
Figura 4:42 – Deformações de fissuração para uma força lateral total de 40 kN – Modelo IB: Dir. +X e -X.....	180
Figura 4:43 – Deformações de fissuração para uma força lateral total de 40 kN – Modelo I, IA, V e VI: +X.....	181
Figura 4:44 – Configuração deformada da parede na fase de pico: (a) Deformada e (b) Malha deformada incremental - Modelo I: F+X	184
Figura 4:45 – Tensões de cisalhamento: Modelo I: Dir.: +X e -X (N/mm ²)	185
Figura 4:46 – Tensões principais mínimas: Modelo I: Dir.: +X e -X (N/mm ²)	185
Figura 4:47 – Tensões de cisalhamento: Modelo IA: Dir.: +X e -X (N/mm ²).....	186
Figura 4:48 – Tensões principais mínimas: Modelo IA: Dir.: -X e -X (N/mm ²)	186
Figura 4:49 – Tensões de cisalhamento: Modelo IB: Dir.: -X e -X (N/mm ²)	187
Figura 4:50 – Tensões principais mínimas: Modelo IB: Dir.: -X e -X (N/mm ²)	187
Figura 4:51 – Tensões de cisalhamento: Modelo V: Dir.: -X e -X (N/mm ²).....	188
Figura 4:52 – Tensões principais mínimas: Modelo V: Dir.: +X e -X (N/mm ²)	188
Figura 4:53 – Tensões de cisalhamento: Modelo VI: Dir.: -X e -X (N/mm ²)	189
Figura 4:54 – Tensões principais mínimas: Modelo VI: Dir.: +X e -X (N/mm ²).....	189
Figura 4:55 – Tensões principais mínimas: Modelo I, IA, V e VI VI: Dir.: +X (N/mm ²).....	190
Figura 4:56 – Tensões principais mínimas - Painel genérico – Modelo I: Dir +X.....	204
Figura 4:57 – Tensões principais mínimas - Painel genérico – Modelo I-A: Dir +X.....	204
Figura 4:58 – Tensões principais mínimas - Painel genérico – Modelo I-B: Dir +X	204
Figura 4:59 – Força horizontal – Distorção angular: Modelos I - Parede Térrea: Caso II: F+X e F-X	206
Figura 4:60 – Força horizontal – Distorção angular: Modelos II - Parede Térrea I: Caso II: F+X e F-X	206
Figura 4:61 – Perfil das tensões principais mínimas e tensões de cisalhamento – Mod I – Parede Téreo	207
Figura 4:62 – Resultados da análise em d = 2,0 mm : (a) malha deformada incremental; (b) fissuras.....	219
Figura 4:63 – Resultados da análise em d = 11,70 mm : (a) malha deformada incremental; (b) fissuras	220
Figura 4:64 – Tensões principais mínimas na ruptura: Modelo I - F+X – Caso II (N/mm ²)	220
Figura 4:65 – História das tensões principais em três elementos na diagonal do membro C	221
Figura 4:66 – – Tensões principais mínimas na ruptura: Modelo I - F+X -(N/mm ²)	222
Figura 8:1 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo I – Caso II – F+X – N/mm ²	243
Figura 8:2 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 – Modelo I – Caso II - F+X – N/mm ²	244
Figura 8:3 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo I – Caso II – F+X N/mm ²	245
Figura 8:4 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo I – Caso II – F-X – N/mm ²	247
Figura 8:5 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 – Modelo I – Caso II – F-X – N/mm ²	247

Lista de Figuras

Figura 8:6 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo I – Caso II – $F-X$ N/mm^2	248
Figura 8:7 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo I-A – Caso II – $F+X$ – N/mm^2	250
Figura 8:8 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo I-A – Caso II – $F+X$ – N/mm^2	251
Figura 8:9 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo I-A – Caso II – $F+X$ N/mm^2	252
Figura 8:10 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo I-A – Caso II – $F-X$ – N/mm^2	254
Figura 8:11 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo I-A – Caso II – $F-X$ – N/mm^2	255
Figura 8:12 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo I-A – Caso II – $F-X$ N/mm^2	256
Figura 8:13 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo I-B – Caso II – $F+X$ – N/mm^2	258
Figura 8:14 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo I-B – Caso II – $F+X$ – N/mm^2	259
Figura 8:15 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo I-B – Caso II – $F+X$ N/mm^2	261
Figura 8:16 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo I-B – Caso II – $F-X$ – N/mm^2	263
Figura 8:17 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo I-B – Caso II – $F-X$ – N/mm^2	265
Figura 8:18 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo I-B – Caso II – $F-X$ N/mm^2	266
Figura 8:19 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo II – Caso II – $F+X$ – N/mm^2	269
Figura 8:20 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo II – Caso II – $F+X$ – N/mm^2	270
Figura 8:21 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo II – Caso II – $F+X$ N/mm^2	270
Figura 8:22 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo II – Caso II – $F-X$ – N/mm^2	272
Figura 8:23 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo II – Caso II – $F-X$ – N/mm^2	273
Figura 8:24 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo II – Caso II – $F-X$ N/mm^2	274
Figura 8:25 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo III: Caso II – $F+X$...275	
Figura 8:26 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III – Caso II – $F+X$ – N/mm^2	276
Figura 8:27 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo III – Caso II – $F+X$ – N/mm^2	276
Figura 8:28 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo III – Caso II – $F+X$ N/mm^2	277
Figura 8:29 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III – Caso II – $F-X$ – N/mm^2	279

Lista de Figuras

Figura 8:30 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo III – Caso II – F-X – N/mm^2	279
Figura 8:31 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo III – Caso II – F-X N/mm^2	280
Figura 8:32 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo III-A: Caso II – F+X	281
Figura 8:33 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III-A – Caso II - F+X – N/mm^2	282
Figura 8:34 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo III-A – Caso II - F+X – N/mm^2	283
Figura 8:35 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo III-A – Caso II – F+X N/mm^2	283
Figura 8:36 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III-A – Caso II – F-X – N/mm^2	285
Figura 8:37 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo III-A – Caso II – F-X – N/mm^2	286
Figura 8:38 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo III-A – Caso II – F-X N/mm^2	286
Figura 8:39 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo III-B: Caso II – F+X	288
Figura 8:40 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III-B – Caso II - F+X – N/mm^2	289
Figura 8:41 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo III-B – Caso II - F+X – N/mm^2	289
Figura 8:42 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo III-B – Caso II – F+X N/mm^2	290
Figura 8:43 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III-B – Caso II – F-X – N/mm^2	292
Figura 8:44 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo III-B – Caso II – F-X – N/mm^2	292
Figura 8:45 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo III-B – Caso II – F-X N/mm^2	293
Figura 8:46 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo IV: Caso II – F+X...	294
Figura 8:47 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo IV – Caso II - F+X – N/mm^2	295
Figura 8:48 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo IV – Caso II - F+X – N/mm^2	296
Figura 8:49 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo IV – Caso II – F+X N/mm^2	296
Figura 8:50 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo IV – Caso II – F-X – N/mm^2	298
Figura 8:51 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo IV – Caso II – F-X – N/mm^2	299
Figura 8:52 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo IV – Caso II – F-X N/mm^2	299
Figura 8:53 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo V: Caso II – F+X e F-X	301
Figura 8:54 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico-Modelo V-Caso II- F+X e F-X- N/mm^2	302

Lista de Figuras

Figura 8:55 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ -Modelo V-Caso II- $F+X$ e $F-X$ - N/mm^2	302
Figura 8:56 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico-Modelo V-Caso II- $F+X$ e $F-X$ - N/mm^2	303
Figura 8:57 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo VI: Caso II - $F+X$ e $F-X$	304
Figura 8:58 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico-Modelo VI-Caso II- $F+X$ e $F-X$ - N/mm^2	305
Figura 8:59 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ -Modelo VI-Caso II- $F+X$ e $F-X$ - N/mm^2	306
Figura 8:60 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico-Modelo V-Caso II- $F+X$ e $F-X$ - N/mm^2	306
Figura 8:61 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo I: Caso III - $F+X$	308
Figura 8:62 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo I - Caso III - $F+X$ - N/mm^2	309
Figura 8:63 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo I - Caso III - $F+X$ - N/mm^2	310
Figura 8:64 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo I - Caso III - $F+X$ N/mm^2	310
Figura 8:65 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo I - Caso III - $F-X$ - N/mm^2	312
Figura 8:66 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo I - Caso III - $F-X$ - N/mm^2	313
Figura 8:67 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo I - Caso III - $F-X$ N/mm^2	313
Figura 8:68 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo I-A: Caso III - $F+X$	315
Figura 8:69 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo I-A - Caso III - $F+X$ - N/mm^2	316
Figura 8:70 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo I-A - Caso III - $F+X$ - N/mm^2	316
Figura 8:71 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo I-A Caso III - $F+X$ N/mm^2	317
Figura 8:72 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo I-A Caso III - $F-X$ - N/mm^2	319
Figura 8:73 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo I-A Caso III - $F-X$ - N/mm^2	319
Figura 8:74 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo I-A Caso III - $F-X$ N/mm^2	320
Figura 8:75 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo I-B: Caso III - $F+X$	321
Figura 8:76 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo I-B - Caso III - $F+X$ - N/mm^2	322
Figura 8:77 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo I-B - Caso III - $F+X$ - N/mm^2	323
Figura 8:78 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo I-B Caso III - $F+X$ N/mm^2	323
Figura 8:79 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo I-B Caso III - $F-X$ - N/mm^2	325

Lista de Figuras

Figura 8:80 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo I-B Caso III – $F-X$ – N/mm^2	326
Figura 8:81 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo I-B Caso III – $F-X$ N/mm^2	326
Figura 8:82 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo II: Caso III – $F+X$...	328
Figura 8:83 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo II – Caso III – $F+X$ – N/mm^2	329
Figura 8:84 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo II – Caso III – $F+X$ – N/mm^2	329
Figura 8:85 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo II Caso III – $F+X$ N/mm^2	330
Figura 8:86 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo II Caso III – $F-X$ – N/mm^2	332
Figura 8:87 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo II Caso III – $F-X$ – N/mm^2	332
Figura 8:88 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo II Caso III – $F-X$ N/mm^2	333
Figura 8:89 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo III: Caso III – $F+X$..	334
Figura 8:90 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III – Caso III – $F+X$ – N/mm^2	335
Figura 8:91 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo III – Caso III – $F+X$ – N/mm^2	336
Figura 8:92 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo III Caso III – $F+X$ N/mm^2	336
Figura 8:93 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III Caso III – $F-X$ – N/mm^2	339
Figura 8:94 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo III Caso III – $F-X$ – N/mm^2	339
Figura 8:95 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo III Caso III – $F-X$ N/mm^2	340
Figura 8:96 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo III-A: Caso III – $F+X$	342
Figura 8:97 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III-A – Caso III – $F+X$ – N/mm^2	343
Figura 8:98 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo III-A – Caso III – $F+X$ – N/mm^2	343
Figura 8:99 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo III-A – Caso III – $F+X$ N/mm^2	344
Figura 8:100 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III-A – Caso III – $F-X$ – N/mm^2	346
Figura 8:101 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo III-A – Caso III – $F-X$ – N/mm^2	346
Figura 8:102 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo III-A –Caso III – $F-X$ N/mm^2	347
Figura 8:103 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo III-B: Caso III – $F+X$	349
Figura 8:104 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III-B – Caso III – $F+X$ – N/mm^2	350

Lista de Figuras

Figura 8:105 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo III-B – Caso III - F+X – N/mm ²	350
Figura 8:106 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo III-B – Caso III – F+X N/mm ²	351
Figura 8:107 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III-B – Caso III – F-X – N/mm ²	353
Figura 8:108 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo III-B – Caso III – F-X – N/mm ²	353
Figura 8:109 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo III-B –Caso III – F-X N/mm ²	354
Figura 8:110 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo IV: Caso III – F+X	356
Figura 8:111 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo IV – Caso III – F+X – N/mm ²	357
Figura 8:112 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo IV – Caso III - F+X – N/mm ²	357
Figura 8:113 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo IV – Caso III – F+X N/mm ²	358
Figura 8:114 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo IV - Caso III – F-X – N/mm ²	360
Figura 8:115 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo IV – Caso III – F-X – N/mm ²	360
Figura 8:116 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo IV – Caso III – F-X N/mm ²	361
Figura 8:117 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo V: Caso III – F+X e F-X.....	362
Figura 8:118 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico–Modelo V–Caso III-F+X e F-X– N/mm ²	363
Figura 8:119 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ –Modelo V–Caso III- F+X e F-X– N/mm ²	364
Figura 8:120 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico–Modelo V–Caso III-F+X e F-X– N/mm ²	364
Figura 8:121 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo VI: Caso III – F+X e F-X	366
Figura 8:122 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico–Modelo VI–Caso III-F+X e F-X– N/mm ²	367
Figura 8:123 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ –Modelo VI–Caso III- F+X e F-X– N/mm ²	367
Figura 8:124 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico–Modelo VI–Caso III-F+X e F-X– N/mm ²	368

Lista de Gráficos

Gráfico 2:1 - Envoltória das tensões de ruptura (MANN e MULLER, 1976)	52
Gráfico 2:2 - Variação da rigidez da parede com a relação h/L	73
Gráfico 4-1 - Dist. da força horizontal: Mod. I - Caso II: F+X: Mem. A.....	158
Gráfico 4-2 - Dist. da força horizontal: Mod I - Caso II: F+X: Mem. B	158
Gráfico 4-3 - Dist. da força horizontal: Mod I - Caso II: F+X: Mem. C.....	158
Gráfico 4-4 - Dist. da força horizontal: Mod I - Caso II: F-X: Mem. A.....	159
Gráfico 4-5 - Dist. da força horizontal: Mod I - Caso II: F-X: Mem. B	159
Gráfico 4-6 - Dist. da força horizontal: Mod I - Caso II: F-X: Mem.o C.....	159
Gráfico 4-7 - Dist. da força horizontal: Mod I-A - Caso II: F+X: Mem. A	160
Gráfico 4-8 - Dist. da força horizontal: Mod I-A - Caso II: F+X: Mem. B.....	160
Gráfico 4-9 - Dist. da força horizontal: Mod I-A - Caso II: F+X: Mem. C	160
Gráfico 4-10 - Dist. da força horizontal: Mod I-A - Caso II: F-X: Mem. A	161
Gráfico 4-11 - Dist. da força horizontal: Mod I-A - Caso II: F-X: Mem. B.....	161
Gráfico 4-12 - Distr. da força horizontal: Mod I-A - Caso II: F-X: Mem. C.....	161
Gráfico 4-13 - Dist. da força horizontal: Mod I-B - Caso II: F+X: Mem. A.....	162
Gráfico 4-14 - Dist. da força horizontal: Mod I-B - Caso II: F+X: Mem. B	162
Gráfico 4-15 - Dist. da força horizontal: Mod I-B - Caso II: F+X: Mem. C	162
Gráfico 4-16 - Dist. da força horizontal: Mod I-B - Caso II: F-X: Mem. A.....	163
Gráfico 4-17 - Dist. da força horizontal: Mod I-B - Caso II: F-X: Mem. B.....	163
Gráfico 4-18 - Dist. da força horizontal: Mod I-B - Caso II: F-X: Mem. C	163
Gráfico 4-19 - Dist. da força horizontal: Mod II - Caso II: F+X: Mem. A	164
Gráfico 4-20 - Dist. da força horizontal: Mod II - Caso II: F+X: Mem. B.....	164
Gráfico 4-21 - Dist. da força horizontal: Mod II - Caso II: F+X: Mem. C	164
Gráfico 4-22 - Dist. da força horizontal: Mod II - Caso II: F-X: Mem. A	165
Gráfico 4-23 - Dist. da força horizontal: Mod II - Caso II: F-X: Mem. B.....	165
Gráfico 4-24 - Dist. da força horizontal: Mod II - Caso II: F-X: Mem. C.....	165
Gráfico 4-25 - Curva Força x Deslocamento - Modelo I: Dir. +X e Dir. -X.....	177
Gráfico 4-26 - Curva Força x Deslocamento - Modelo IA: Dir. +X e Dir. -X.....	177
Gráfico 4-27 - Curva Força x Deslocamento - Modelo IB: Dir. +X e Dir. -X	178
Gráfico 4-28 - Curva Força x Deslocamento - Modelos I, IA e IB: Dir. +X	182
Gráfico 4-29 - Curva Força x Deslocamento - Modelos I, IA e IB: Dir. -X	182
Gráfico 4-30 - Curva Força x Deslocamento - Modelos I, IA, IB, V, VI, SA: Dir.: +X.....	183
Gráfico 4-31 - Curva Força x Deslocamento - Modelos I, IA, IB, V, VI, SA: Dir.: -X.....	183
Gráfico 4-32 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo I: Membros A, B e C - Dir.: +X	191
Gráfico 4-33 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo I: Membros A, B e C - Dir.: -X	191
Gráfico 4-34 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo IA: Membros A, B e C - Dir.: +X.....	191
Gráfico 4-35 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo IA: Membros A, B e C - Dir.: -X.....	192
Gráfico 4-36 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo IB: Membros A, B e C - Dir.: +X.....	192
Gráfico 4-37 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo IB: Membros A, B e C - Dir.: -X.....	192

Lista de Gráficos

Gráfico 4-38 – Distribuição da força cortante na fase de pico – Modelo V: Membros A, B e C - Dir.: +X.....	193
Gráfico 4-39 – Distribuição da força cortante na fase de pico – Modelo V: Membros A, B e C - Dir.: -X.....	193
Gráfico 4-40 – Distribuição da força cortante na fase de pico – Modelo VI: Membros A, B e C - Dir.: +X.....	193
Gráfico 4-41 – Distribuição da força cortante na fase de pico – Modelo VI: Membros A, B e C - Dir.: -X.....	194
Gráfico 4-42 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro A – Modelo I: Dir.: +X e -X.....	194
Gráfico 4-43 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro B – Modelo I: Dir.: +X e -X.....	195
Gráfico 4-44 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro C – Modelo I: Dir.: +X e -X.....	195
Gráfico 4-45 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro A – Modelo IA: Dir.: +X e -X.....	196
Gráfico 4-46 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro B – Modelo IA: Dir.: +X e -X.....	196
Gráfico 4-47 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro C – Modelo IA: Dir.: +X e -X.....	196
Gráfico 4-48 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro A – Modelo IB: Dir.: +X e -X.....	197
Gráfico 4-49 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro B – Modelo IB: Dir.: +X e -X.....	197
Gráfico 4-50 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro C – Modelo IB: Dir.: +X e -X.....	197
Gráfico 4-51 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro A – Modelo V: Dir.: +X e -X.....	198
Gráfico 4-52 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro B – Modelo V: Dir.: +X e -X.....	198
Gráfico 4-53 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro C – Modelo V: Dir.: +X e -X.....	198
Gráfico 4-54 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro A – Modelo VI: Dir.: +X e -X.....	199
Gráfico 4-55 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro B – Modelo VI: Dir.: +X e -X.....	199
Gráfico 4-56 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro C – Modelo VI: Dir.: +X e -X.....	199
Gráfico 4-57 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro A – Modelos I, IA, IB, V e VI: +X.....	200
Gráfico 4-58 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro B – Modelos I, IA, IB, V e VI: +X.....	200
Gráfico 4-59 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro C – Modelos I, IA, IB, V e VI: +X.....	200
Gráfico 4-60 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro A – Modelo I, IA, V e VI: Dir.: -X.....	201
Gráfico 4-61 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro B – Modelo I, IA, V e VI: Dir.: -X.....	201

Lista de Gráficos

Gráfico 4-62 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro C – Modelo I, IA, V e VI: Dir.: -X.....	201
Gráfico 4-63 – Distribuição da força cortante – Modelo I – Caso II - Parede Térrea: Dir. +X e -X.....	208
Gráfico 4-64 – Distribuição da força cortante – Modelo I-A – Caso II - Parede Térrea: Dir. +X e -X.....	208
Gráfico 4-65 – Força horizontal – Distorção angular: Modelos I e III - Parede Térrea: Caso II: F+X.....	210
Gráfico 4-66 – Força horizontal – Distorção angular: Modelos V e V - Parede Térrea I: Caso II.....	210
Gráfico 4-67 – Efeito da localização da abertura – Mod I, III, V e VI – Caso II - Parede Térrea: Dir. +X	211
Gráfico 4-68 – Efeito da localização das aberturas – Membro A - Mod I, V e VI – 8 Pav: Dir. +X.....	211
Gráfico 4-69 – Efeito da localização das aberturas – Membro B - Mod I, V e VI – 8 Pav: Dir. +X.....	212
Gráfico 4-70 – Efeito da localização das aberturas – Membro C - Mod I, V e VI – 8 Pav: Dir. +X.....	212
Gráfico 4-71 – Força horizontal – Distorção angular: Modelos I, I-A e I-B - Parede Térrea: Caso II: F+X.....	213
Gráfico 4-72 – Força horizontal – Distorção angular: Modelos III, III-A e III-B - Parede Térrea: Caso II: F+X	213
Gráfico 4-73 – Efeito do desnivelamento das aberturas - Mod I, I-A e I-B – Caso II - Parede Térrea: Dir. -X	214
Gráfico 4-74 – Efeito do desnivelamento das aberturas – Membro A - Mod I, I-A e I-B - 8 Pav: Dir. +X.....	215
Gráfico 4-75 – Efeito do desnivelamento das aberturas – Membro B - Mod I, I-A e I-B - 8 Pav: Dir. +X.....	215
Gráfico 4-76 – Efeito do desnivelamento das aberturas – Membro C - Mod I, I-A e I-B - 8 Pav: Dir. +X.....	216
Gráfico 4-77 – Força horizontal – Distorção angular: Modelos I, V e VI - Parede Térrea: Caso II: F+X.....	217
Gráfico 4-78 – Força horizontal normalizada x Deslocamento Horizontal - Parede Térrea: Caso II: F+X.....	218
Gráfico 4-79 – Força horizontal normalizada x Deslocamento Horizontal - Parede Térrea: Caso II: F-X.....	218
Gráfico 4-80 – Efeito da área de aberturas - Mod I, V e VI - Caso II - Parede Térrea: Dir. +X	219
Gráfico 8:1 - Distribuição da força horizontal: Modelo III – Caso II: F+X: Membro A.....	277
Gráfico 8:2 - Distribuição da força horizontal: Modelo III – Caso II: F+X: Membro B.....	278
Gráfico 8:3 - Distribuição da força horizontal: Modelo III – Caso II: F+X: Membro C	278
Gráfico 8:4 - Distribuição da força horizontal: Modelo III – Caso II: F-X: Membro A.....	280
Gráfico 8:5 - Distribuição da força horizontal: Modelo III – Caso II: F-X: Membro B.....	281
Gráfico 8:6 - Distribuição da força horizontal: Modelo III – Caso II: F-X: Membro C.....	281
Gráfico 8:7 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A – Caso II: F+X: Membro A ...	284
Gráfico 8:8 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A – Caso II: F+X: Membro B ...	284
Gráfico 8:9 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A – Caso II: F+X: Membro C...	284
Gráfico 8:10 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A – Caso II: F-X: Membro A..	287

Lista de Gráficos

Gráfico 8:11 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A – Caso II: F-X: Membro B ..	287
Gráfico 8:12 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A – Caso II: F-X: Membro C..	287
Gráfico 8:13 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B – Caso II: F+X: Membro A ..	290
Gráfico 8:14 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B – Caso II: F+X: Membro B..	291
Gráfico 8:15 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B – Caso II: F+X: Membro C..	291
Gráfico 8:16 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B – Caso II: F-X: Membro A ...	293
Gráfico 8:17 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B – Caso II: F-X: Membro B ...	294
Gráfico 8:18 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B – Caso II: F-X: Membro C...	294
Gráfico 8:19 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV – Caso II: F+X: Membro A.....	297
Gráfico 8:20 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV – Caso II: F+X: Membro B.....	297
Gráfico 8:21 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV – Caso II: F+X: Membro C	297
Gráfico 8:22 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV – Caso II: F-X: Membro A.....	300
Gráfico 8:23 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV – Caso II: F-X: Membro B.....	300
Gráfico 8:24 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV – Caso II: F-X: Membro C	300
Gráfico 8:25 - Distribuição da força horizontal: Modelo V – Caso II: F+X e F-X: Membro A	303
Gráfico 8:26 - Distribuição da força horizontal: Modelo V – Caso II: F+X e F-X: Membro B	304
Gráfico 8:27 - Distribuição da força horizontal: Modelo V – Caso II: F+X e F-X: Membro C	304
Gráfico 8:28 - Distribuição da força horizontal: Modelo VI – Caso II: F+X e F-X: Membro A	307
Gráfico 8:29 - Distribuição da força horizontal: Modelo VI – Caso II: F+X e F-X: Membro B	307
Gráfico 8:30 - Distribuição da força horizontal: Modelo VI – Caso II: F+X e F-X: Membro C	308
Gráfico 8:31 - Distribuição da força horizontal: Modelo I – Caso III: F+X: Membro A	311
Gráfico 8:32 - Distribuição da força horizontal: Modelo I – Caso III: F+X: Membro B	311
Gráfico 8:33 - Distribuição da força horizontal: Modelo I – Caso III: F+X: Membro C.....	311
Gráfico 8:34 - Distribuição da força horizontal: Modelo I – Caso III: F-X: Membro A	314
Gráfico 8:35 - Distribuição da força horizontal: Modelo I – Caso III: F-X: Membro B	314
Gráfico 8:36 - Distribuição da força horizontal: Modelo I – Caso III: F-X: Membro C.....	314
Gráfico 8:37 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-A Caso III: F+X: Membro A.....	317
Gráfico 8:38 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-A Caso III: F+X: Membro B.....	318
Gráfico 8:39 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-A Caso I?II: F+X: Membro C....	318
Gráfico 8:40 - Distribuição da força horizontal: Modelo I – Caso III: F-X: Membro A	320
Gráfico 8:41 - Distribuição da força horizontal: Modelo I – Caso III: F-X: Membro B	321
Gráfico 8:42 - Distribuição da força horizontal: Modelo I – Caso III: F-X: Membro C.....	321
Gráfico 8:43 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-B Caso III: F+X: Membro A	324
Gráfico 8:44 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-B Caso III: F+X: Membro B	324
Gráfico 8:45 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-B Caso III: F+X: Membro C.....	324
Gráfico 8:46 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-B – Caso III: F-X: Membro A.....	327
Gráfico 8:47 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-B – Caso III: F-X: Membro B	327
Gráfico 8:48 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-B – Caso III: F-X: Membro C....	327
Gráfico 8:49 - Distribuição da força horizontal: Modelo II Caso III: F+X: Membro A.....	330
Gráfico 8:50 - Distribuição da força horizontal: Modelo II Caso III: F+X: Membro B.....	331
Gráfico 8:51 - Distribuição da força horizontal: Modelo II Caso I?II: F+X: Membro C.....	331
Gráfico 8:52 - Distribuição da força horizontal: Modelo II – Caso III: F-X: Membro A	333
Gráfico 8:53 - Distribuição da força horizontal: Modelo II – Caso III: F-X: Membro B.....	334

Lista de Gráficos

Gráfico 8:54 - Distribuição da força horizontal: Modelo II – Caso III: F-X: Membro C.....	334
Gráfico 8:55 - Distribuição da força horizontal: Modelo III Caso III: F+X: Membro A.....	337
Gráfico 8:56 - Distribuição da força horizontal: Modelo III Caso III: F+X: Membro B	337
Gráfico 8:57 - Distribuição da força horizontal: Modelo III Caso III: F+X: Membro C.....	338
Gráfico 8:58 - Distribuição da força horizontal: Modelo III – Caso III: F-X: Membro A.....	340
Gráfico 8:59 - Distribuição da força horizontal: Modelo III – Caso III: F-X: Membro B.....	341
Gráfico 8:60 - Distribuição da força horizontal: Modelo III – Caso III: F-X: Membro C.....	341
Gráfico 8:61 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso III: F+X: Membro A.....	344
Gráfico 8:62 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso III: F+X: Membro B.....	345
Gráfico 8:63 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso III: F+X: Membro C.....	345
Gráfico 8:64 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A – Caso III: F-X: Membro A.....	347
Gráfico 8:65 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A – Caso III: F-X: Membro B.....	348
Gráfico 8:66 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A – Caso III: F-X: Membro C.....	348
Gráfico 8:67 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso III: F+X: Membro A.....	351
Gráfico 8:68 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso III: F+X: Membro B.....	352
Gráfico 8:69 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso III: F+X: Membro C.....	352
Gráfico 8:70 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B – Caso III: F-X: Membro A.....	354
Gráfico 8:71 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B – Caso III: F-X: Membro B.....	355
Gráfico 8:72 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B – Caso III: F-X: Membro C.....	355
Gráfico 8:73 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV - Caso III: F+X: Membro A.....	358
Gráfico 8:74 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV - Caso III: F+X: Membro B.....	359
Gráfico 8:75 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV - Caso III: F+X: Membro C.....	359
Gráfico 8:76 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV – Caso III: F-X: Membro A.....	361
Gráfico 8:77 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV – Caso III: F-X: Membro B.....	362
Gráfico 8:78 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV – Caso III: F-X: Membro C.....	362
Gráfico 8:79 - Distribuição da força horizontal: Modelo V – Caso III: F+X e F-X: Membro A.....	365
Gráfico 8:80 - Distribuição da força horizontal: Modelo V – Caso III: F+X e F-X: Membro B.....	365
Gráfico 8:81 - Distribuição da força horizontal: Modelo V – Caso III: F+X e F-X: Membro C.....	365

Lista de Tabelas

Tabela 2:1 - Dimensões de abas ou flanges (ACI, EC-6 e NBR 10837).....	69
Tabela 2:2 - Efeito da relação h/t nas deflexões por cisalhamento (DRYSDALE et al., 1994)	74
Tabela 3:1 - Propriedades elásticas da alvenaria (parede e flanges).....	118
Tabela 3:2 - Propriedades inelásticas da parede.....	118
Tabela 3:3 - Propriedades inelásticas dos flanges de alvenaria.....	118
Tabela 4-1 - Resposta da estrutura à variação dos parâmetros inelásticos do modelo	131
Tabela 4:2: Forças de pico das análises de sensibilidade.....	131
Tabela 4:3 - Condição de carregamento dos modelos estudados.....	132
Tabela 4:4: Súmula das análises: Caso II.....	136
Tabela 4:5: Súmula das análises: Caso III	136
Tabela 4:6 - Comparação das rigidezes de pico dos modelos estudados: Caso II - Dir +X	138
Tabela 4:7 - Comparação das rigidezes de pico dos modelos estudados: Caso II - Dir -X	139
Tabela 4:8 - Comparação das rigidezes de pico dos modelos estudados: Caso III - Dir +X	149
Tabela 4:9 - Comparação das rigidezes de pico dos modelos estudados: Caso III - Dir -X	150
Tabela 8:1 - Distribuição de força cortante - Modelo I - Caso II : Fase Elástica - F+X - Proc. Clássico	242
Tabela 8:2 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I - Caso II : Fase Elástica - F+X.....	242
Tabela 8:3 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I - Caso II: Fase Elástica - F+X_+G+Q.....	243
Tabela 8:4 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso II - Fase de Pico - F+X ...	244
Tabela 8:5 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso II : Fase de $F_{max}/2$ - F+X	244
Tabela 8:6 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso II : Fase Pós Pico - F+X..	245
Tabela 8:7 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I - Caso II : Fase Elástica - F-X.....	245
Tabela 8:8 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I - Caso II: Fase Elástica - F-X_+G+Q.....	246
Tabela 8:9 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso II - Fase de Pico - F-X.....	247
Tabela 8:10 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso II : Fase de $F_{max}/2$ - F-X	247
Tabela 8:11 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso II : Fase Pós Pico - F-X..	248
Tabela 8:12 - Distribuição de força cortante - Modelo I-A - Caso II : Fase Elástica - F+X - Proc. Clássico	249
Tabela 8:13 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I-A - Caso II : Fase Elástica - F+X.....	249
Tabela 8:14 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I-A - Caso II: Fase Elástica - F+X_+G+Q.....	249
Tabela 8:15 - Distribuição da força horizontal - Modelo I-A - Caso II - Fase de Pico - F+X	250
Tabela 8:16 - Distribuição da força horizontal - Modelo I-A - Caso II : Fase de $F_{max}/2$ - F+X	251

Lista de Tabelas

Tabela 8:17 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A – Caso II : Fase Pós Pico – F+X	252
Tabela 8:18 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-A – Caso II : Fase Elástica – F-X.....	253
Tabela 8:19 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-A – Caso II: Fase Elástica – F-X ₊ G+Q.....	253
Tabela 8:20 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A – Caso II - Fase de Pico – F-X	254
Tabela 8:21 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A – Caso II : Fase de F _{max} /2 – F-X.....	255
Tabela 8:22 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A – Caso II : Fase Pós Pico – F-X	256
Tabela 8:23 - Distribuição de força cortante – Modelo I-B – Caso II : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico	256
Tabela 8:24 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-B – Caso II : Fase Elástica – F+X.....	257
Tabela 8:25 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-B – Caso II: Fase Elástica – F+X ₊ G+Q.....	257
Tabela 8:26 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B – Caso II - Fase de Pico – F+X	258
Tabela 8:27 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B – Caso II : Fase de F _{max} /2 – F+X	260
Tabela 8:28 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B – Caso II : Fase Pós Pico – F+X	261
Tabela 8:29 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-B – Caso II : Fase Elástica – F-X.....	262
Tabela 8:30 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-B – Caso II: Fase Elástica – F-X ₊ G+Q.....	263
Tabela 8:31 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B – Caso II - Fase de Pico – F-X	264
Tabela 8:32 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B – Caso II : Fase de F _{max} /2 – F-X.....	265
Tabela 8:33 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B – Caso II : Fase Pós Pico – F-X	266
Tabela 8:34 - Distribuição de força cortante – Modelo II – Caso II : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico	267
Tabela 8:35 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo II – Caso II : Fase Elástica – F+X.....	268
Tabela 8:36 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo II – Caso II: Fase Elástica – F+X ₊ G+Q.....	268
Tabela 8:37 - Distribuição da força horizontal – Modelo II – Caso II - Fase de Pico – F+X	269
Tabela 8:38 - Distribuição da força horizontal – Modelo II – Caso II : Fase de F _{max} /2 – F+X	270
Tabela 8:39 - Distribuição da força horizontal – Modelo II – Caso II : Fase Pós Pico – F+X	271
Tabela 8:40 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo II – Caso II : Fase Elástica – F-X.....	271
Tabela 8:41 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo II – Caso II: Fase Elástica – F-X ₊ G+Q.....	272

Lista de Tabelas

Tabela 8:42 - Distribuição da força horizontal – Modelo II – Caso II - Fase de Pico – F-X	273
Tabela 8:43 - Distribuição da força horizontal – Modelo II – Caso II : Fase de $F_{max}/2$ – F-X	273
Tabela 8:44 - Distribuição da força horizontal – Modelo II – Caso II : Fase Pós Pico – F-X	274
Tabela 8:45 - Distribuição de força cortante – Modelo III – Caso II : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico	275
Tabela 8:46 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III – Caso II : Fase Elástica – F+X	275
Tabela 8:47 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III – Caso II: Fase Elástica – F+X ₋ +G+Q	276
Tabela 8:48 - Distribuição da força horizontal – Modelo III – Caso II - Fase de Pico – F+X	276
Tabela 8:49 - Distribuição da força horizontal – Modelo III – Caso II : Fase de $F_{max}/2$ – F+X	276
Tabela 8:50 - Distribuição da força horizontal – Modelo III – Caso II : Fase Pós Pico – F+X	277
Tabela 8:51 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III – Caso II : Fase Elástica – F-X	278
Tabela 8:52 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III – Caso II: Fase Elástica – F-X ₋ +G+Q	279
Tabela 8:53 - Distribuição da força horizontal – Modelo III – Caso II - Fase de Pico – F-X	279
Tabela 8:54 - Distribuição da força horizontal – Modelo III – Caso II : Fase de $F_{max}/2$ – F-X	279
Tabela 8:55 - Distribuição da força horizontal – Modelo III – Caso II : Fase Pós Pico – F-X	280
Tabela 8:56 - Distribuição de força cortante – Modelo III-A – Caso II : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico	282
Tabela 8:57 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-A – Caso II : Fase Elástica – F+X	282
Tabela 8:58 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-A – Caso II: Fase Elástica – F+X ₋ +G+Q	282
Tabela 8:59 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-A – Caso II - Fase de Pico – F+X	283
Tabela 8:60 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-A – Caso II : Fase de $F_{max}/2$ – F+X	283
Tabela 8:61 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-A – Caso II : Fase Pós Pico – F+X	283
Tabela 8:62 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-A – Caso II : Fase Elástica – F-X	285
Tabela 8:63 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-A – Caso II: Fase Elástica – F-X ₋ +G+Q	285
Tabela 8:64 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-A – Caso II - Fase de Pico – F-X	285
Tabela 8:65 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-A – Caso II : Fase de $F_{max}/2$ – F-X	286
Tabela 8:66 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-A – Caso II : Fase Pós Pico – F-X	286
Tabela 8:67 - Distribuição de força cortante – Modelo III-B – Caso II : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico	288
Tabela 8:68 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-B – Caso II : Fase Elástica – F+X	288

Lista de Tabelas

Tabela 8:69 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-B – Caso II: Fase Elástica – $F+X_+G+Q$	289
Tabela 8:70 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B – Caso II - Fase de Pico – $F+X$	289
Tabela 8:71 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B – Caso II : Fase de $F_{max}/2$ – $F+X$	289
Tabela 8:72 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B – Caso II : Fase Pós Pico – $F+X$	290
Tabela 8:73 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-B – Caso II : Fase Elástica – $F-X$	291
Tabela 8:74 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-B – Caso II: Fase Elástica – $F-X_+G+Q$	292
Tabela 8:75 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B – Caso II - Fase de Pico – $F-X$	292
Tabela 8:76 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B – Caso II : Fase de $F_{max}/2$ – $F-X$	292
Tabela 8:77 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B – Caso II : Fase Pós Pico – $F-X$	293
Tabela 8:78 - Distribuição de força cortante – Modelo IV – Caso II : Fase Elástica – $F+X$ – Proc. Clássico	295
Tabela 8:79 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo IV – Caso II : Fase Elástica – $F+X$	295
Tabela 8:80 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo IV – Caso II: Fase Elástica – $F+X_+G+Q$	295
Tabela 8:81 - Distribuição da força horizontal – Modelo IV – Caso II - Fase de Pico – $F+X$	295
Tabela 8:82 - Distribuição da força horizontal – Modelo IV – Caso II : Fase de $F_{max}/2$ – $F+X$	296
Tabela 8:83 - Distribuição da força horizontal – Modelo IV – Caso II : Fase Pós Pico – $F+X$	296
Tabela 8:84 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo IV – Caso II : Fase Elástica – $F-X$	298
Tabela 8:85 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo IV – Caso II: Fase Elástica – $F-X_+G+Q$	298
Tabela 8:86 - Distribuição da força horizontal – Modelo IV – Caso II - Fase de Pico – $F-X$	298
Tabela 8:87 - Distribuição da força horizontal – Modelo IV – Caso II : Fase de $F_{max}/2$ – $F-X$	299
Tabela 8:88 - Distribuição da força horizontal – Modelo IV – Caso II : Fase Pós Pico – $F-X$	299
Tabela 8:89 - Distribuição de força cortante–Modelo V– Caso II: Fase Elástica– $F+X$ e $F-X$ – Proc. Clássico	301
Tabela 8:90 - Comparação de distribuição de força cortante–Modelo V–Caso II: Fase Elástica– $F+X$ e $F-X$	301
Tabela 8:91 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo IV – Caso II: Fase Elástica – $F+X_+G+Q$ e $F-X_+G+Q$	302
Tabela 8:92 - Distribuição da força horizontal – Modelo V – Caso II - Fase de Pico – $F+X$ e $F-X$	302
Tabela 8:93 - Distribuição da força horizontal – Modelo V – Caso II : Fase de $F_{max}/2$ – $F+X$ e $F-X$	303

Lista de Tabelas

Tabela 8:94 - Distribuição da força horizontal – Modelo V – Caso II : Fase Pós Pico – F+X e F-X	303
Tabela 8:95 - Distribuição de força cortante–Modelo VI– Caso II: Fase Elástica–F+X e F-X– Proc. Clássico	305
Tabela 8:96 - Comparação de distribuição de força cortante–Modelo VI–Caso II: Fase Elástica–F+X e F-X.....	305
Tabela 8:97 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo VI – Caso II: Fase Elástica – F+X ₊ G+Q e F-X ₊ G+Q.....	305
Tabela 8:98 - Distribuição da força horizontal – Modelo VI – Caso II - Fase de Pico – F+X e F-X	306
Tabela 8:99 - Distribuição da força horizontal – Modelo VI – Caso II : Fase de F _{max} /2 – F+X e F-X	306
Tabela 8:100 - Distribuição da força horizontal – Modelo V – Caso II : Fase Pós Pico – F+X e F-X	307
Tabela 8:101 - Distribuição de força cortante – Modelo I – Caso III : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico	309
Tabela 8:102 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I – Caso III : Fase Elástica – F+X.....	309
Tabela 8:103 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I – Caso III: Fase Elástica – F+X ₊ G+Q.....	309
Tabela 8:104 - Distribuição da força horizontal – Modelo I – Caso III - Fase de Pico – F+X	309
Tabela 8:105 - Distribuição da força horizontal – Modelo I – Caso III : Fase de F _{max} /2 – F+X	310
Tabela 8:106 - Distribuição da força horizontal – Modelo I – Caso III : Fase Pós Pico – F+X	310
Tabela 8:107 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I – Caso III : Fase Elástica – F-X.....	312
Tabela 8:108 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I – Caso III: Fase Elástica – F-X ₊ G+Q.....	312
Tabela 8:109 - Distribuição da força horizontal – Modelo I – Caso III - Fase de Pico – F-X	312
Tabela 8:110 - Distribuição da força horizontal – Modelo I – Caso III : Fase de F _{max} /2 – F-X.....	313
Tabela 8:111 - Distribuição da força horizontal – Modelo I – Caso III : Fase Pós Pico – F-X	313
Tabela 8:112 - Distribuição de força cortante – Modelo I-A – Caso III : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico	315
Tabela 8:113 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-A – Caso III : Fase Elástica – F+X.....	315
Tabela 8:114 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-A – Caso III: Fase Elástica – F+X ₊ G+Q.....	316
Tabela 8:115 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A – Caso III - Fase de Pico – F+X	316
Tabela 8:116 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A – Caso III : Fase de F _{max} /2 – F+X	316
Tabela 8:117 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A Caso III : Fase Pós Pico – F+X	317
Tabela 8:118 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-A Caso III : Fase Elástica – F-X.....	318

Lista de Tabelas

Tabela 8:119 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-A Caso III: Fase Elástica – $F-X_{+G+Q}$	319
Tabela 8:120 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A Caso III - Fase de Pico – $F-X$	319
Tabela 8:121 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – $F-X$	319
Tabela 8:122 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A Caso III : Fase Pós Pico – $F-X$	320
Tabela 8:123 - Distribuição de força cortante – Modelo I-B – Caso III : Fase Elástica – $F+X$ – Proc. Clássico	322
Tabela 8:124 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-B – Caso III : Fase Elástica – $F+X$	322
Tabela 8:125 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-B – Caso III: Fase Elástica – $F+X_{+G+Q}$	322
Tabela 8:126 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B – Caso III - Fase de Pico – $F+X$	323
Tabela 8:127 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B – Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – $F+X$	323
Tabela 8:128 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B Caso III : Fase Pós Pico – $F+X$	323
Tabela 8:129 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-B Caso III : Fase Elástica – $F-X$	325
Tabela 8:130 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-B Caso III: Fase Elástica – $F-X_{+G+Q}$	325
Tabela 8:131 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B Caso III - Fase de Pico – $F-X$	325
Tabela 8:132 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – $F-X$	326
Tabela 8:133 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B Caso III : Fase Pós Pico – $F-X$	326
Tabela 8:134 - Distribuição de força cortante – Modelo II – Caso III : Fase Elástica – $F+X$ – Proc. Clássico	328
Tabela 8:135 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo II – Caso III : Fase Elástica – $F+X$	328
Tabela 8:136 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo II – Caso III: Fase Elástica – $F+X_{+G+Q}$	329
Tabela 8:137 - Distribuição da força horizontal – Modelo II – Caso III - Fase de Pico – $F+X$	329
Tabela 8:138 - Distribuição da força horizontal – Modelo II – Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – $F+X$	329
Tabela 8:139 - Distribuição da força horizontal – Modelo II Caso III : Fase Pós Pico – $F+X$	330
Tabela 8:140 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo II Caso III : Fase Elástica – $F-X$	331
Tabela 8:141 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo II Caso III: Fase Elástica – $F-X_{+G+Q}$	332
Tabela 8:142 - Distribuição da força horizontal – Modelo II Caso III - Fase de Pico – $F-X$	332
Tabela 8:143 - Distribuição da força horizontal – Modelo II Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – $F-X$	332
Tabela 8:144 - Distribuição da força horizontal – Modelo II Caso III : Fase Pós Pico – $F-X$	333

Lista de Tabelas

Tabela 8:145 - Distribuição de força cortante – Modelo III – Caso III : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico	335
Tabela 8:146 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III – Caso III : Fase Elástica – F+X.....	335
Tabela 8:147 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III – Caso III: Fase Elástica – F+X_+G+Q.....	335
Tabela 8:148 - Distribuição da força horizontal – Modelo III – Caso III - Fase de Pico – F+X	336
Tabela 8:149 - Distribuição da força horizontal – Modelo III – Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – F+X	336
Tabela 8:150 - Distribuição da força horizontal – Modelo III Caso III : Fase Pós Pico – F+X	337
Tabela 8:151 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III Caso III : Fase Elástica – F-X.....	338
Tabela 8:152 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III Caso III: Fase Elástica – F-X_+G+Q.....	338
Tabela 8:153 - Distribuição da força horizontal – Modelo III Caso III - Fase de Pico – F-X.....	339
Tabela 8:154 - Distribuição da força horizontal – Modelo III Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – F-X	339
Tabela 8:155 - Distribuição da força horizontal – Modelo III Caso III : Fase Pós Pico – F-X	340
Tabela 8:156 - Distribuição de força cortante – Modelo III-A – Caso III : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico	342
Tabela 8:157 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-A – Caso III : Fase Elástica – F+X.....	342
Tabela 8:158 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-A – Caso III: Fase Elástica – F+X_+G+Q.....	343
Tabela 8:159 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-A – Caso III - Fase de Pico – F+X	343
Tabela 8:160 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-A – Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – F+X	343
Tabela 8:161 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-A - Caso III : Fase Pós Pico – F+X	344
Tabela 8:162 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-A - Caso III : Fase Elástica – F-X.....	345
Tabela 8:163 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-A - Caso III: Fase Elástica – F-X_+G+Q.....	346
Tabela 8:164 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-A - Caso III - Fase de Pico – F-X.....	346
Tabela 8:165 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-A - Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – F-X	346
Tabela 8:166 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-A -Caso III : Fase Pós Pico – F-X.....	347
Tabela 8:167 - Distribuição de força cortante – Modelo III-B – Caso III : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico	349
Tabela 8:168 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-B – Caso III : Fase Elástica – F+X.....	349
Tabela 8:169 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-B – Caso III: Fase Elástica – F+X_+G+Q.....	350

Lista de Tabelas

Tabela 8:170 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B – Caso III - Fase de Pico – F+X	350
Tabela 8:171 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B – Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – F+X	350
Tabela 8:172 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B - Caso III : Fase Pós Pico – F+X	351
Tabela 8:173 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-B - Caso III : Fase Elástica – F-X.....	352
Tabela 8:174 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-B - Caso III: Fase Elástica – F-X ₊ +G+Q.....	353
Tabela 8:175 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B - Caso III - Fase de Pico – F-X	353
Tabela 8:176 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B - Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – F-X	353
Tabela 8:177 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B -Caso III : Fase Pós Pico – F-X.....	354
Tabela 8:178 - Distribuição de força cortante – Modelo IV – Caso III : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico	356
Tabela 8:179 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo IV – Caso III : Fase Elástica – F+X.....	356
Tabela 8:180 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo IV – Caso III: Fase Elástica – F+X ₊ +G+Q.....	357
Tabela 8:181 - Distribuição da força horizontal – Modelo IV – Caso III - Fase de Pico – F+X	357
Tabela 8:182 - Distribuição da força horizontal – Modelo IV – Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – F+X	357
Tabela 8:183 - Distribuição da força horizontal – Modelo IV - Caso III : Fase Pós Pico – F+X	358
Tabela 8:184 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo IV - Caso III : Fase Elástica – F-X.....	359
Tabela 8:185 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo IV - Caso III: Fase Elástica – F-X ₊ +G+Q.....	360
Tabela 8:186 - Distribuição da força horizontal – Modelo IV - Caso III - Fase de Pico – F-X	360
Tabela 8:187 - Distribuição da força horizontal – Modelo IV - Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – F-X.....	360
Tabela 8:188 - Distribuição da força horizontal – Modelo IV -Caso III : Fase Pós Pico – F-X	361
Tabela 8:189 - Distribuição de força cortante–Modelo V- Caso III: Fase Elástica–F+X e F-X– Proc. Clássico	363
Tabela 8:190 - Comparação de distribuição de força cortante–Modelo V–Caso III: Fase Elástica–F+X e F-X.....	363
Tabela 8:191 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo V – Caso III: Fase Elástica – F+X ₊ +G+Q e F-X ₊ +G+Q.....	363
Tabela 8:192 - Distribuição da força horizontal – Modelo V – Caso III - Fase de Pico – F+X e F-X	364
Tabela 8:193 - Distribuição da força horizontal – Modelo V – Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – F+X e F-X	364

Lista de Tabelas

Tabela 8:194 - Distribuição da força horizontal – Modelo V – Caso III : Fase Pós Pico – F+X e F-X	364
Tabela 8:195 - Distribuição de força cortante–Modelo VI– Caso III: Fase Elástica–F+X e F-X–Proc. Clássico.....	366
Tabela 8:196 - Comparação de distribuição de força cortante–Modelo VI–Caso III: Fase Elástica–F+X e F-X.....	366
Tabela 8:197 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo VI – Caso III: Fase Elástica – F+X_ ₊ G+Q e F-X_ ₊ G+Q.....	366
Tabela 8:198 - Distribuição da força horizontal – Modelo VI – Caso III - Fase de Pico – F+X e F-X	367
Tabela 8:199 - Distribuição da força horizontal – Modelo VI – Caso III : Fase de F _{max} /2 – F+X e F-X	367
Tabela 8:200 - Distribuição da força horizontal – Modelo V – Caso III : Fase Pós Pico – F+X e F-X	368

Sumário

Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Resumo	vi
Abstract.....	vii
Lista de Figuras	viii
Lista de Gráficos.....	xvii
Lista de Tabelas	xxii
Sumário.....	xxx
1. Introdução	38
1.1 Considerações preliminares	38
1.2 Objetivos.....	39
1.2.1 Objetivos gerais	39
1.2.2 Objetivos específicos.....	39
1.3 Estruturação e Organização do Trabalho	40
2. Revisão Bibliográfica	42
2.1 Alvenaria não armada - Comportamento ao cisalhamento no plano	45
2.2 Métodos de Análise Estrutural de Paredes de Contraventamento de Alvenaria com Aberturas	58
2.2.1 Métodos Numéricos de Análise.....	58
2.2.1.1 Método das Ligações Rígidas.....	59
2.2.1.2 Método das Ligações Flexíveis.....	60
2.2.1.3 Método das Ligações Flexíveis Modificado	60
2.2.2 Métodos de Análise Utilizando Abordagens Simples.....	61
2.2.2.1 Análise Elástica.....	61
2.2.2.1.1 Paredes sem efeito de acoplamento.....	61
2.2.2.1.2 Paredes com efeito de acoplamento	62
2.2.2.2 Análise Limite.....	64
2.3 Rigidez de paredes com aberturas.....	66
2.3.1 Método I	70
2.3.2 Método II.....	74
2.3.3 Método III.....	75
2.4 Distribuição de forças cortantes em paredes com aberturas	76
2.5 Ductilidade de estruturas de alvenaria não armada.....	77
2.6 Resumo do capítulo	79
3. Modelagem numérica da alvenaria.....	83
3.1 Considerações iniciais	83
3.2 Plasticidade	85
3.2.1 Plasticidade perfeita.....	87
3.2.1.1 Critérios de escoamento	87
3.2.1.1.1 Tipos de critérios de escoamento.....	89
3.2.1.1.1.1 Critério de escoamento de von Mises	89
3.2.1.1.1.2 Critério de escoamento de Rankine.....	90
3.2.1.2 Lei de fluxo.....	92
3.2.2 Plasticidade com endurecimento.....	93
3.2.2.1 Endurecimento isotrópico.....	93
3.2.2.2 Endurecimento cinemático	94

3.2.2.3	Endurecimento misto	94
3.3	Macro modelos – Modelagem contínua anisotrópica.....	95
3.3.1	Alvenaria em compressão.....	97
3.3.2	Alvenaria em tração.....	97
3.3.3	Propriedades dos materiais	98
3.3.4	Aspectos relativos ao fenômeno do amolecimento.....	100
3.4	Método dos elementos finitos e solução do sistema de equações não lineares ...	103
3.4.1	O Método dos elementos finitos	103
3.4.2	Elemento finito bi-dimensional.....	106
3.4.3	Solução do sistema de equações não lineares	107
3.4.3.1	Critério de convergência	111
3.4.3.2	Técnicas adicionais.....	112
3.5	Modelo de Rankine/von Mises : Características e Validação	114
3.6	Resumo do capítulo	121
4.	Análise numérica.....	123
4.1	Considerações iniciais	123
4.2	Características geométricas dos modelos analisados	124
4.3	Descrição geral do programa de análise numérica	127
4.3.1	Descrição geral.....	127
4.3.2	Malha de elementos finitos.....	128
4.4	Resultados e Discussão.....	133
4.4.1	Perfil Global de Deslocamentos dos Modelos	133
4.4.2	Comportamento Individualizado dos Membros Verticais	150
4.4.3	Distribuição da força cortante	156
4.5	Paredes de contraventamento de edificações de múltiplos andares.....	172
4.5.1	Curva de capacidade dos modelos.....	174
4.5.2	Perfil de tensões e deformações dos modelos.....	184
4.5.2.1	Modelo I: Dir. +X e Dir. -X.....	185
4.5.2.2	Modelo IA: Dir. -X e Dir. -X	186
4.5.2.3	Modelo IB: Dir. -X e Dir. -X.....	187
4.5.2.4	Modelo V: Dir. +X e -X.....	188
4.5.2.5	Modelo VI: Dir. +X e -X.....	189
4.5.2.6	Modelos I, IA, V e VI: Dir. +X.....	190
4.5.3	Distribuição da força cortante aplicada	190
4.6	Súmula das análises numéricas realizadas.....	205
4.6.1	Configuração da Parede e Sentido de Atuação da Força Horizontal	205
4.6.1.1	Efeito do sentido de atuação da força horizontal	205
4.6.1.2	Efeito da localização das aberturas.....	209
4.6.1.3	Efeito do desnivelamento das aberturas.....	212
4.6.1.4	Efeito da área de aberturas	216
4.7	Síntese dos modos de ruptura observados.....	219
5.	Conclusões e sugestões.....	223
5.1	Conclusões	223
5.2	Sugestões	225
6.	Referências bibliográficas	226
7.	Anexo A – Exemplos de arquivos do DIANA.....	232
8.	Anexo B – Resultados dos outros modelos	242
8.1	Modelo I : Caso II – Fase Elástica – F+X	242

8.1.1	Modelo I : Caso II – Fase de Pico – F+X	243
8.1.2	Modelo I : Caso II – Fase $F_{max}/2$ – F+X.....	244
8.1.3	Modelo I : Caso II – Fase Pós Pico – F+X	244
8.2	Modelo I : Caso II – Fase Elástica – F-X.....	245
8.2.1	Modelo I : Caso II – Fase de Pico – F-X	246
8.2.2	Modelo I : Caso II – Fase de $F_{max}/2$ – F-X.....	247
8.2.3	Modelo I : Caso II – Fase Pós Pico – F-X	248
8.3	Modelo I-A : Caso II – Fase Elástica – F+X	248
8.3.1	Modelo I-A : Caso II – Fase de Pico – F+X.....	250
8.3.2	Modelo I-A : Caso II – Fase $F_{max}/2$ – F+X	251
8.3.3	Modelo I-A : Caso II – Fase Pós Pico – F+	252
8.4	Modelo I-A : Caso II – Fase Elástica – F-X	252
8.4.1	Modelo I-A : Caso II – Fase de Pico – F-X.....	254
8.4.2	Modelo I-A : Caso II – Fase de $F_{max}/2$ – F-X.....	255
8.4.3	Modelo I-A : Caso II – Fase Pós Pico – F-X.....	256
8.5	Modelo I-B : Caso II – Fase Elástica – F+X.....	256
8.5.1	Modelo I-B : Caso II – Fase de Pico – F+X	258
8.5.2	Modelo I-B : Caso II – Fase $F_{max}/2$ – F+X.....	259
8.5.3	Modelo I-B : Caso II – Fase Pós Pico – F+X	260
8.6	Modelo I-B : Caso II – Fase Elástica – F-X.....	262
8.6.1	Modelo I-B : Caso II – Fase de Pico – F-X	263
8.6.2	Modelo I-B : Caso II – Fase de $F_{max}/2$ – F-X.....	264
8.6.3	Modelo I-B : Caso II – Fase Pós Pico – F-X.....	266
8.7	Modelo II : Caso II – Fase Elástica – F+X	267
8.7.1	Modelo II : Caso II – Fase de Pico – F+X.....	268
8.7.2	Modelo II : Caso II – Fase $F_{max}/2$ – F+X	269
8.7.3	Modelo II : Caso II – Fase Pós Pico – F+X.....	270
8.8	Modelo II : Caso II – Fase Elástica – F-X	271
8.8.1	Modelo II : Caso II – Fase de Pico – F-X.....	272
8.8.2	Modelo II : Caso II – Fase $F_{max}/2$ – F-X.....	273
8.8.3	Modelo II : Caso II – Fase Pós Pico – F-X.....	274
8.9	Modelo III – Caso II – F+X	275
8.9.1	Distribuição da Força Horizontal	275
8.9.1.1	Fase Elástica	275
8.9.1.2	Fase de Pico	276
8.9.1.3	Fase de $F_{max}/2$	276
8.9.1.4	Fase de Pós Pico.....	277
8.9.2	Modelo III – Caso II – F+X – Gráficos	277
8.10	Modelo III – Caso II – F-X	278
8.10.1	Distribuição da Força Horizontal	278
8.10.1.1	Fase Elástica	278
8.10.1.2	Fase de Pico	279
8.10.1.3	Fase de $F_{max}/2$	279
8.10.1.4	Fase de Pós Pico.....	280
8.10.2	Modelo III – Caso II – F-X – Gráficos	280
8.11	Modelo III-A – Caso II – F+X.....	281
8.11.1	Distribuição da Força Horizontal	282
8.11.1.1	Fase Elástica	282

8.11.1.2 Fase de Pico	282
8.11.1.3 Fase de $F_{max}/2$	283
8.11.1.4 Fase de Pós Pico.....	283
8.11.2 Modelo III – Caso II – $F+X$ – Gráficos	284
8.12 Modelo III-A – Caso II – $F-X$	285
8.12.1 Distribuição da Força Horizontal	285
8.12.1.1 Fase Elástica	285
8.12.1.2 Fase de Pico	285
8.12.1.3 Fase de $F_{max}/2$	286
8.12.1.4 Fase de Pós Pico.....	286
8.12.2 Modelo III-A – Caso II – $F-X$ – Gráficos	287
8.13 Modelo III-B – Caso II – $F+X$	288
8.13.1 Distribuição da Força Horizontal	288
8.13.1.1 Fase Elástica	288
8.13.1.2 Fase de Pico	289
8.13.1.3 Fase de $F_{max}/2$	289
8.13.1.4 Fase de Pós Pico.....	290
8.13.2 Modelo III-B – Caso II – $F+X$ – Gráficos.....	290
8.14 Modelo III-B – Caso II – $F-X$	291
8.14.1 Distribuição da Força Horizontal	291
8.14.1.1 Fase Elástica	291
8.14.1.2 Fase de Pico	292
8.14.1.3 Fase de $F_{max}/2$	292
8.14.1.4 Fase de Pós Pico.....	293
8.14.2 Modelo III-B – Caso II – $F-X$ – Gráficos.....	293
8.15 Modelo IV – Caso II – $F+X$	294
8.15.1 Distribuição da Força Horizontal	295
8.15.1.1 Fase Elástica	295
8.15.1.2 Fase de Pico	295
8.15.1.3 Fase de $F_{max}/2$	296
8.15.1.4 Fase de Pós Pico.....	296
8.15.2 Modelo IV – Caso II – $F+X$ – Gráficos	297
8.16 Modelo IV – Caso II – $F-X$	298
8.16.1 Distribuição da Força Horizontal	298
8.16.1.1 Fase Elástica	298
8.16.1.2 Fase de Pico	298
8.16.1.3 Fase de $F_{max}/2$	299
8.16.1.4 Fase de Pós Pico.....	299
8.16.2 Modelo IV – Caso II – $F-X$ – Gráficos	300
8.17 Modelo V – Caso II – $F+X$ e $F-X$	301
8.17.1 Distribuição da Força Horizontal	301
8.17.1.1 Fase Elástica	301
8.17.1.2 Fase de Pico	302
8.17.1.3 Fase de $F_{max}/2$	302
8.17.1.4 Fase de Pós Pico.....	303
8.17.2 Modelo V – Caso II – $F+X$ e $F-X$ – Gráficos	303
8.18 Modelo VI – Caso II – $F+X$ e $F-X$	304
8.18.1 Distribuição da Força Horizontal	305

8.18.1.1 Fase Elástica	305
8.18.1.2 Fase de Pico	305
8.18.1.3 Fase de $F_{max}/2$	306
8.18.1.4 Fase de Pós Pico	306
8.18.2 Modelo VI – Caso II – F+X e F-X – Gráficos	307
8.19 Modelo I – Caso III – F+X	308
8.19.1 Distribuição da Força Horizontal	309
8.19.1.1 Fase Elástica	309
8.19.1.2 Fase de Pico	309
8.19.1.3 Fase de $F_{max}/2$	310
8.19.1.4 Fase de Pós Pico	310
8.19.2 Modelo I – Caso III – F+X – Gráficos	311
8.20 Modelo I – Caso III – F-X	312
8.20.1 Distribuição da Força Horizontal	312
8.20.1.1 Fase Elástica	312
8.20.1.2 Fase de Pico	312
8.20.1.3 Fase de $F_{max}/2$	313
8.20.1.4 Fase de Pós Pico	313
8.20.2 Modelo I – Caso III – F-X – Gráficos	314
8.21 Modelo I-A – Caso III – F+X	315
8.21.1 Distribuição da Força Horizontal	315
8.21.1.1 Fase Elástica	315
8.21.1.2 Fase de Pico	316
8.21.1.3 Fase de $F_{max}/2$	316
8.21.1.4 Fase de Pós Pico	317
8.21.2 Modelo I-A Caso III – F+X – Gráficos	317
8.22 Modelo I-A Caso III – F-X	318
8.22.1 Distribuição da Força Horizontal	318
8.22.1.1 Fase Elástica	318
8.22.1.2 Fase de Pico	319
8.22.1.3 Fase de $F_{max}/2$	319
8.22.1.4 Fase de Pós Pico	320
8.22.2 Modelo I-A Caso III – F-X – Gráficos	320
8.23 Modelo I-B – Caso III – F+X	321
8.23.1 Distribuição da Força Horizontal	322
8.23.1.1 Fase Elástica	322
8.23.1.2 Fase de Pico	322
8.23.1.3 Fase de $F_{max}/2$	323
8.23.1.4 Fase de Pós Pico	323
8.23.2 Modelo I-B Caso III – F+X – Gráficos	324
8.24 Modelo I-B Caso III – F-X	325
8.24.1 Distribuição da Força Horizontal	325
8.24.1.1 Fase Elástica	325
8.24.1.2 Fase de Pico	325
8.24.1.3 Fase de $F_{max}/2$	326
8.24.1.4 Fase de Pós Pico	326
8.24.2 Modelo I-B Caso III – F-X – Gráficos	327
8.25 Modelo II – Caso III – F+X	328

8.25.1 Distribuição da Força Horizontal	328
8.25.1.1 Fase Elástica	328
8.25.1.2 Fase de Pico	329
8.25.1.3 Fase de $F_{max}/2$	329
8.25.1.4 Fase de Pós Pico.....	330
8.25.2 Modelo II Caso III – F+X – Gráficos	330
8.26 Modelo II Caso III – F-X	331
8.26.1 Distribuição da Força Horizontal	331
8.26.1.1 Fase Elástica	331
8.26.1.2 Fase de Pico	332
8.26.1.3 Fase de $F_{max}/2$	332
8.26.1.4 Fase de Pós Pico.....	333
8.26.2 Modelo II Caso III – F-X – Gráficos.....	333
8.27 Modelo III – Caso III – F+X.....	334
8.27.1 Distribuição da Força Horizontal	335
8.27.1.1 Fase Elástica	335
8.27.1.2 Fase de Pico	335
8.27.1.3 Fase de $F_{max}/2$	336
8.27.1.4 Fase de Pós Pico.....	336
8.27.2 Modelo III Caso III – F+X – Gráficos	337
8.28 Modelo III Caso III – F-X.....	338
8.28.1 Distribuição da Força Horizontal	338
8.28.1.1 Fase Elástica	338
8.28.1.2 Fase de Pico	339
8.28.1.3 Fase de $F_{max}/2$	339
8.28.1.4 Fase de Pós Pico.....	340
8.28.2 Modelo III Caso III – F-X – Gráficos	340
8.29 Modelo III-A Caso III – F+X.....	342
8.29.1 Distribuição da Força Horizontal	342
8.29.1.1 Fase Elástica	342
8.29.1.2 Fase de Pico	343
8.29.1.3 Fase de $F_{max}/2$	343
8.29.1.4 Fase de Pós Pico.....	344
8.29.2 Modelo III-A Caso III – F+X – Gráficos.....	344
8.30 Modelo III-A Caso III – F-X	345
8.30.1 Distribuição da Força Horizontal	345
8.30.1.1 Fase Elástica	345
8.30.1.2 Fase de Pico	346
8.30.1.3 Fase de $F_{max}/2$	346
8.30.1.4 Fase de Pós Pico.....	347
8.30.2 Modelo III-A Caso III – F-X – Gráficos.....	347
8.31 Modelo III-B Caso III – F+X	349
8.31.1 Distribuição da Força Horizontal	349
8.31.1.1 Fase Elástica	349
8.31.1.2 Fase de Pico	350
8.31.1.3 Fase de $F_{max}/2$	350
8.31.1.4 Fase de Pós Pico.....	351
8.31.2 Modelo III-B Caso III – F+X – Gráficos	351

8.32 Modelo III-B Caso III – F-X	352
8.32.1 Distribuição da Força Horizontal	352
8.32.1.1 Fase Elástica	352
8.32.1.2 Fase de Pico	353
8.32.1.3 Fase de $F_{max}/2$	353
8.32.1.4 Fase de Pós Pico.....	354
8.32.2 Modelo III-B Caso III – F-X – Gráficos	354
8.33 Modelo IV Caso III – F+X.....	356
8.33.1 Distribuição da Força Horizontal	356
8.33.1.1 Fase Elástica	356
8.33.1.2 Fase de Pico	357
8.33.1.3 Fase de $F_{max}/2$	357
8.33.1.4 Fase de Pós Pico.....	358
8.33.2 Modelo IV Caso III – F+X – Gráficos.....	358
8.34 Modelo IV Caso III – F-X.....	359
8.34.1 Distribuição da Força Horizontal	359
8.34.1.1 Fase Elástica	359
8.34.1.2 Fase de Pico	360
8.34.1.3 Fase de $F_{max}/2$	360
8.34.1.4 Fase de Pós Pico.....	361
8.34.2 Modelo IV Caso III – F-X – Gráficos	361
8.35 Modelo V – Caso III – F+X e F-X.....	362
8.35.1 Distribuição da Força Horizontal	363
8.35.1.1 Fase Elástica	363
8.35.1.2 Fase de Pico	363
8.35.1.3 Fase de $F_{max}/2$	364
8.35.1.4 Fase de Pós Pico.....	364
8.35.2 Modelo V – Caso II – F+X e F-X – Gráficos	365
8.36 Modelo VI – Caso III – F+X e F-X	366
8.36.1 Distribuição da Força Horizontal	366
8.36.1.1 Fase Elástica	366
8.36.1.2 Fase de Pico	367
8.36.1.3 Fase de $F_{max}/2$	367
8.36.1.4 Fase de Pós Pico.....	368

1. Introdução

1.1 Considerações preliminares

Por conta de sua importância como elementos estruturais resistentes às ações laterais, as paredes de contraventamento de alvenaria têm sido objeto de estudos em importantes centros de pesquisa por todo o mundo ao longo dos últimos anos. Relevantes avanços no entendimento do seu comportamento estrutural e do seu mecanismo de sustentação de cargas, frente às variadas hipóteses de carregamento, geometria e condições de contorno, foram obtidos. Entretanto, o foco das pesquisas realizadas tem privilegiado as paredes de contraventamento sem aberturas, não obstante nas situações práticas a ocorrência de aberturas seja freqüente.

A introdução de aberturas, dependendo de sua quantidade, tamanho e localização, pode gerar importantes modificações no comportamento global e local das paredes de contraventamento com influência direta no seu perfil de deformação, na redução de sua resistência à flexão e ao cisalhamento e na alteração de sua rigidez. Do ponto de vista da análise estrutural, a disposição de aberturas torna o problema fortemente hiperestático demandando a determinação das tensões e deformações nas proximidades das mesmas, de forma a possibilitar a avaliação da necessidade de disposição de armações em quadro a envolvê-las.

Uma estimativa realista da rigidez das paredes de contraventamento dotadas de abertura é de fundamental importância para a correta distribuição das ações laterais aplicadas entre os diversos membros verticais que a compõem, bem como para o cálculo dos deslocamentos laterais que permitirão a verificação dos estados limites de utilização da edificação. Infelizmente, a estimativa desta rigidez não se constitui em uma tarefa de implementação fácil, haja vista sua dependência de uma gama variada de fatores, dentre os quais destacam-se: o processo de fissuração, o nível de pré-compressão, a configuração geométrica da parede e a relação de forma dos membros verticais.

Para fins de projeto, a distribuição das forças laterais totais entre os diversos membros verticais das paredes de contraventamento dotadas de aberturas se realiza na proporção direta das rigidezes relativas destes membros. O cálculo destas rigidezes é usualmente conduzido através de métodos aproximados que utilizam as rigidezes elásticas não fissuradas das paredes, negligenciando desta forma o processo de

redistribuição das forças cortantes que ocorre em cada membro devido à deformação inelástica da parede. Para que possam ser utilizados, estes métodos precisam ser alterados a fim de que sejam levados em conta os efeitos da fissuração, da força axial e flexibilidade devido aos modos de deformação, aspectos que usualmente não são considerados pela teoria elástica, sobre qual estes métodos se fundamentam.

Outro aspecto de importância no estudo das paredes de contraventamento dotadas de abertura são efeitos de acoplamento gerados pelos lintéis que introduzem complexidades adicionais ao comportamento destas paredes.

Dentre deste contexto, a pesquisa realizada busca oferecer contribuições para o entendimento do comportamento estrutural destas paredes, através da implementação de um estudo analítico fundamentado em análises numéricas lineares e não lineares através do Método dos Elementos Finitos realizadas em paredes de contraventamento com geometrias usualmente encontradas em edificações de alvenaria estrutural.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

O objetivo principal deste trabalho é o entendimento do comportamento estrutural de paredes de contraventamento de alvenaria não armada dotadas de aberturas, solicitadas por ações laterais em seu próprio plano, com ênfase no exame da distribuição da força cortante aplicada entre diversos membros verticais que a compõem.

1.2.2 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, o presente trabalho se propõe a:

- Analisar, através do Método dos Elementos Finitos, paredes de contraventamento de alvenaria não armada dotadas de aberturas, mostrando a evolução do processo de fissuração durante o carregamento da parede, de forma a possibilitar o entendimento do mecanismo de sustentação de cargas destes elementos estruturais nas fases de pré-pico, pico e pós-pico;
- Avaliar e apresentar a distribuição da força cortante aplicada entre os diversos membros verticais que compõem as paredes de

contraventamento dotadas de aberturas, durante seu processo de carga, de forma a permitir o entendimento do processamento desta distribuição nas fases de pré-pico, pico e pós-pico;

1.3 Estruturação e Organização do Trabalho

A fim de guiar o leitor ao longo da Tese, apresenta-se a seguir uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo.

Capítulo 1: Este capítulo apresenta a contextualização do tema da pesquisa realizada apresentando sua relevância e definindo os objetivos a serem atingidos.

Capítulo 2: Este capítulo contém a revisão bibliográfica relativa aos trabalhos, numéricos e experimentais, já realizados na temática da análise de paredes de contraventamento de alvenaria com aberturas, com ênfase na alvenaria não armada. Aborda também uma discussão sobre os aspectos intervenientes na rigidez e ductilidade de paredes de alvenaria, com foco nas paredes de contraventamento dotadas de aberturas. São apresentados os métodos disponíveis na literatura para a estimativa da rigidez destas paredes bem como os conceitos de ductilidade usualmente empregados para a avaliação do seu comportamento estrutural.

Capítulo 3: Este capítulo trata da análise numérica da alvenaria e nele são discutidos os aspectos relativos às estratégias de modelagens e ao comportamento deste material alvenaria frente às solicitações usualmente encontradas na prática. Adicionalmente, são também discutidos aspectos relativos à teoria da plasticidade, com ênfase nos temas que são de interesse para a descrição constitutiva do comportamento da alvenaria.

Capítulo 4: Este capítulo contempla a análise numérica realizada com a descrição pormenorizada dos modelos estudados, suas condições de contorno e carregamentos. Seu conteúdo permite a formulação do entendimento do

comportamento estrutural das paredes de contraventamento com aberturas solicitadas por carregamento lateral.

Capítulo 5: Este capítulo contempla o sumário, as conclusões e recomendações para pesquisas futuras.

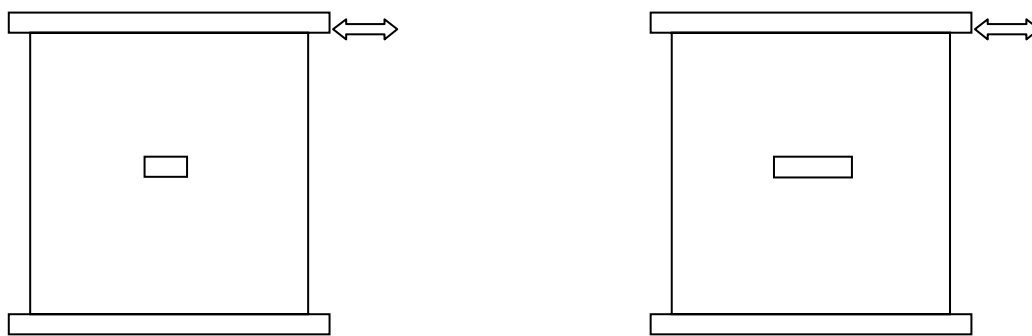
2. Revisão Bibliográfica

Não obstante as paredes de contraventamento com aberturas serem o tipo mais comum de paredes encontradas em obras de alvenaria estrutural (armada ou não), um número limitado de pesquisa experimental e numérica tem sido desenvolvida no sentido de se entender o comportamento destes elementos frente às ações que lhe são usualmente impostas.

Aponta a literatura que a pesquisa do comportamento de paredes de contraventamento com aberturas teve importante interesse a partir da década de 70 nos Estados Unidos quando se constatou que grande parte dos danos em elementos estruturais causados por terremotos se concentrava nas paredes de contraventamento com aberturas (CHEN et al., 1978; SCRIVENER J. C., 1986).

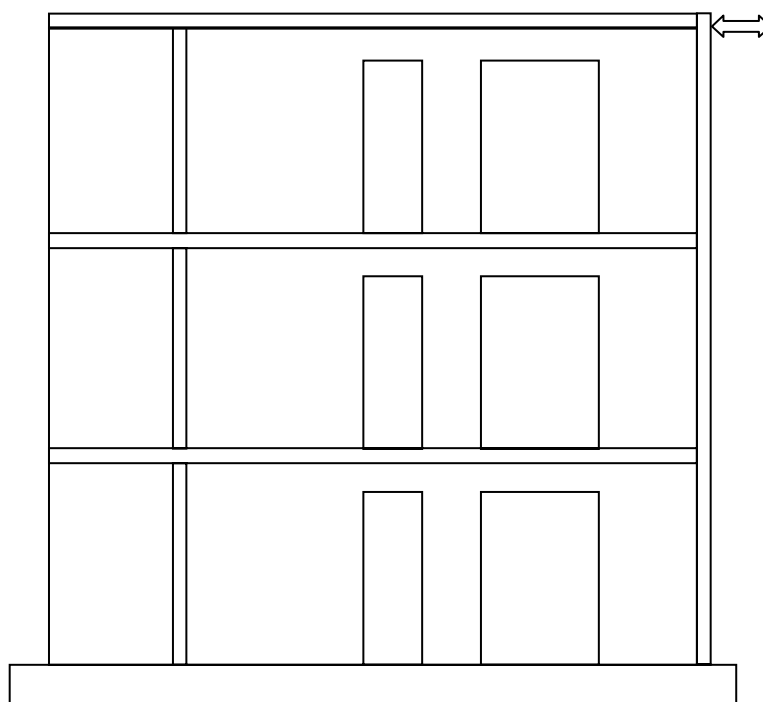
As primeiras pesquisas realizadas com elementos de alvenaria estrutural armada (MAYES et al., 1976), entretanto não apresentaram resultados conclusivos, porém indicavam a necessidade de promoção de investigações mais aprofundadas com a finalidade de se obter informações sobre o comportamento das paredes de contraventamento dotadas de abertura.

Um extensivo programa experimental e analítico foi implementado nos Estados Unidos na década de 80 conjuntamente com similar programa no Japão, cujo foco era o desenvolvimento de procedimentos para o projeto de obras em alvenaria estrutural armada em estado limite último submetidas à ação de vento e sismos (NOLAND, J. L., 1990). No escopo deste programa, os ensaios realizados no Japão por Irmã (IRMAI e MIYAMOTO, 1988; 1989) em seis paredes de alvenaria armada com pequena abertura (Figura 2-1) e submetidas a forças cortantes cíclicas e pré-compressão constante mostraram que fissuras diagonais apareciam para baixos valores de tensão de cisalhamento. As fissuras se iniciavam nos cantos da abertura e se estendiam para os lados da parede. Os resultados obtidos indicaram que as resistências à flexão e ao cisalhamento de paredes com pequenas aberturas poderiam ser avaliadas pelas mesmas fórmulas utilizadas para paredes de concreto armado sem aberturas.



**Figura 2-1 - Esquema das paredes com pequenas aberturas ensaiadas por Irmal e Miyamoto
(ELSHAFI H., 1997)**

Ainda no âmbito deste programa, MATSUNO et al. (1987) utilizaram um modelo de pórtico plano com molas inelásticas de flexão nas extremidades dos elementos e molas inelásticas de cisalhamento no centro dos mesmos para analisar uma parede de alvenaria armada de blocos cerâmicos de três andares, submetida a carregamento lateral cíclico (Figura 2-2). O modelo utilizado conseguiu prevê de maneira satisfatória o comportamento verificado nos ensaios experimentais realizados.



**Figura 2-2 - Esquema da paredes ensaiada por MATSUMO et al. 1987
(ELSHAFI H., 1997)**

SEIBE et al. (1987) e YAMAZAKI et al. (1988) realizaram ensaios num módulo típico de uma edificação em escala real de cinco andares no Japão em alvenaria armada com blocos de concreto, na qual as paredes de contraventamento apresentavam

expressiva área de aberturas (Figura 2-3). As cargas de projeto dos elementos foram determinadas através de uma análise linear com recurso a um modelo de pórtico plano com regiões rígidas nas intersecções dos elementos de viga e coluna, resultantes da modelagem da estrutura. A estrutura foi dimensionada de acordo com o código japonês para construções de alvenaria e sua resistência última foi determinada a partir da análise limite considerando um modelo de rótulas plásticas. Os resultados obtidos mostraram que a estrutura teve um comportamento estável e dúctil e sua capacidade de sustentação de cargas foi superior às exigências de projeto, aspecto que permitiu a conclusão de que estruturas de alvenaria armada adequadamente projetadas satisfazem de maneira eficiente às exigências para construções submetidas a carregamentos laterais.



Figura 2-3 – Modelo de ensaio da edificação de 5 Pavimentos (SEIBE et al., 1987)

PAULSON e ABRAMS (1990), ainda no âmbito do mesmo programa, testaram modelos em escala reduzida ($1/4$ do tamanho real) de três construções em alvenaria armada de blocos de concreto de três andares com paredes de contraventamento dotadas de aberturas e submetidas, duas delas, a carregamento simulado de terremoto e a terceira a carregamento lateral cíclico com história de deslocamentos similar às anteriores. As duas primeiras estruturas foram dimensionadas com taxas de armaduras mínimas ao passo que a terceira foi dimensionada com maiores taxas de armaduras horizontais e verticais de forma a se suprimir a ruptura por cisalhamento. Os resultados obtidos mostraram que, não obstante a configuração simétrica dos modelos, a distribuição da força

de cisalhamento não se processou de maneira idêntica para os diversos membros da parede de contraventamento por conta de que o comportamento de dado elemento (rigidez e resistência) foi influenciado pela mudança da força axial gerada pelo momento de tombamento. Ademais, foi observado que os modelos com maior taxa de armadura apresentaram uma maior ductilidade, tanto à flexão quanto ao cortante, e romperam pela formação de rótulas plásticas nas extremidades dos elementos.

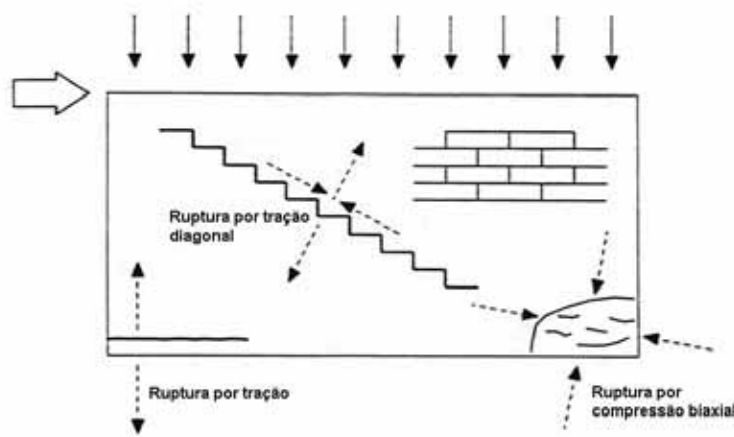
KLINGER et al. (1990) ensaiaram seis paredes de alvenaria armada de blocos de concreto de dois andares em escala real, dotadas de aberturas de portas e janelas com e sem lintéis. As paredes foram ensaiadas com carregamento quasi-estático lateral e algumas delas foram também submetidas a carregamento compressivo vertical. Os modelos ensaiados apresentaram comportamento dúctil, conforme se pretendia no dimensionamento dos elementos e, baseado nos resultados obtidos, os autores formularam um modelo para previsão da carga de colapso fundamentado no mecanismo de ruptura pela formação de rótulas plásticas.

De uma maneira geral, todos os modelos ensaiados apresentaram uma ruptura dúctil caracterizada pela formação de rótulas plásticas nas extremidades das vigas de acoplamento seguidas de rótulas plásticas nas bases dos membros verticais (*piers*) do primeiro pavimento. Nenhuma informação sobre o perfil de distribuição da força cortante aplicada entre os diversos membros verticais das paredes ensaiadas se acha disponível nestes ensaios.

2.1 Alvenaria não armada - Comportamento ao cisalhamento no plano

No caso da alvenaria estrutural não armada, os ensaios experimentais de modelos em escala real ou reduzida são bastante escassos na literatura. Quando estas paredes são dotadas de aberturas, esta escassez de informação ganha ainda mais expressão, aspecto que torna ainda mais árdua a tarefa de formular um entendimento do comportamento deste tipo de parede. Não obstante estas dificuldades, serão apresentadas a seguir, de maneira sucinta, os resultados mais relevantes nesta área disponíveis na literatura.

A Figura 2-4 (GOTTFREDSSEN, F. R. , 1997) ilustra os possíveis modos de ruptura para paredes de alvenaria não armada carregadas biaxialmente em seu próprio plano e continuamente apoiada em sua base.



**Figura 2-4 – Modos de ruptura de painel de alvenaria submetido a cargas biaxiais no plano
(GOTTFREDSSEN, F. R, 1997)**

O primeiro modo corresponde à ruptura por tração na extremidade inferior esquerda do painel. Este modo é caracterizado pelo desenvolvimento de tensões de tração normais às juntas horizontais de argamassa que geram fissuras horizontais, resultantes do deslizamento ao longo do plano destas juntas. Usualmente, este tipo de ruptura ocorre para baixos valores da carga vertical comparados com a carga horizontal aplicada.

A ruptura por tração diagonal, segundo modo de ruptura, é caracterizada pela formação de fissuras diagonais no formato indicado que, dependendo da magnitude das cargas verticais, da qualidade da argamassa de assentamento e dos blocos utilizados, podem se localizar unicamente nas juntas de argamassas (para baixos valores da carga vertical e argamassa de baixa qualidade) ou também podem se manifestar nos blocos (para elevados valores da carga vertical e blocos de resistência muito baixa).

A ruptura por compressão biaxial que ocorre na extremidade inferior direita do painel, terceiro modo de ruptura, aparece como resultado do desenvolvimento das fissuras de tração na base da parede, sendo a força cortante incremental totalmente absorvida pela alvenaria comprimida. A ruptura final ocorre por tombamento do painel e/ou pelo esmagamento do canto comprimido. Este tipo de ruptura ocorre usualmente em paredes com elevada relação de forma (altura/comprimento) e pode exibir grandes deslocamentos (movimento de rotação de corpo rígido) que reduzem a capacidade da parede de suportar acréscimos de carga vertical.

A Figura 2-5 a seguir ilustra os três modos de ruptura citados para um elemento vertical dentro de uma parede de contraventamento de alvenaria não armada.

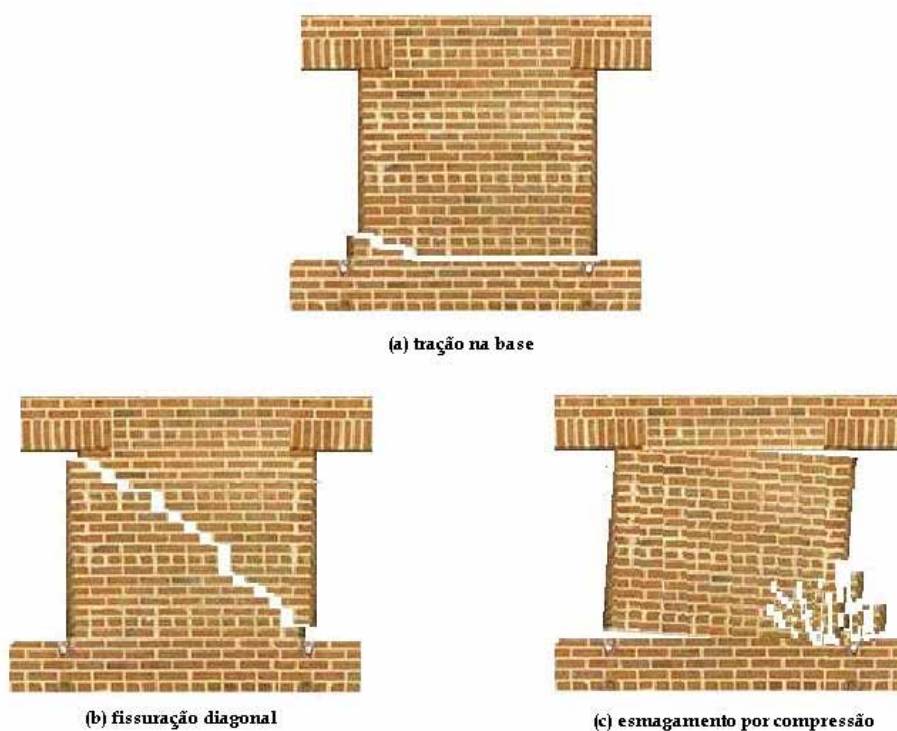


Figura 2-5 – Tipos de ruptura no plano de elemento de alvenaria não armada

A distribuição de tensões no interior de uma parede de alvenaria é relativamente complexa e, dependendo do tipo de alvenaria, das condições de contorno, da geometria e do tipo de carregamento aplicado, a ruptura pode ocorrer na base ou no centro do painel. Por outro lado, a menos que grandes descontinuidades estejam presentes (existência de aberturas, por exemplo), nenhuma das rupturas localizadas indicadas na Figura 2-4 levará ao completo colapso da parede, haja vista que após a instalação de uma delas a parede sofrerá um processo gradativo de degradação de sua rigidez e resistência sendo a ruptura final caracterizada por uma combinação de dois ou três dos modos de ruptura citados.

Diferentes critérios de ruptura de paredes de alvenaria não armada têm sido formulados no sentido de reproduzir matematicamente os modos de ruptura descritos anteriormente. A seguir, apresenta-se uma síntese destes critérios.

BENJAMIN e WILLIAMS (1958) promoveram análises experimentais sobre a efetividade das paredes de alvenaria não armada, de um andar, resistirem às forças cortantes aplicadas em seu próprio plano. Foram investigados modelos em escala real e reduzida, com e sem a consideração de confinamento com pórticos de contorno de concreto armado ou de aço. Foram ensaiados ao todo 24 painéis dos quais apenas um,

confinado por pórtico de aço, é dotado de uma abertura central de janela correspondente a 1/9 de sua área total. A ruptura e a carga última dos painéis analisados foram caracterizadas pela formação de fissuras nas paredes, essencialmente na diagonal comprimida, e foi observada, ainda, que qualquer alteração da qualidade da mão-de-obra influenciava a localização destas fissuras. Os autores sugerem uma relação linear entre a máxima tensão de cisalhamento e a máxima tensão normal, expressa através da Equação 2:1, para a determinação da carga última de paredes de alvenaria confinada por pórtico de concreto armado.

$$\tau_{xy} = C(1,517 + 1,1\sigma_y) \quad \text{Equação 2:1}$$

onde:

C = fator redutor para consideração da influência da mão-de-obra (variando de 0.6 a 1.0, segundo indicação dos autores)

σ_y = tensão normal de compressão na fronteira bloco-argamassa (MPa)

Adotando hipóteses usuais da Resistência dos Materiais para o cálculo das tensões máximas de compressão e de cisalhamento no centro do painel, os autores sugerem a Equação 2:2 para a determinação da carga última do painel.

$$P = \frac{1,517 C a t \frac{a}{b}}{1,5 \frac{a}{b} - 1,1 C} \quad \text{Equação 2:2}$$

onde:

a = comprimento do painel;

b = altura do painel;

t = espessura do painel;

P = força cortante aplicada.

Deve ser ressaltado, no entanto, que a formulação proposta pelos autores, além de não levar em conta a fissuração que se manifesta na parede ao longo do processo de carga, tem restrita aplicabilidade às unidades de alvenaria e a qualidade da mão-de-obra utilizada nos ensaios realizados. Ademais, não há qualquer indicação da possibilidade de utilização da formulação proposta nos casos onde o painel é dotado de abertura. A Figura 2-6 a seguir mostra o modo de ruptura da única parede com abertura

ensaiada pelos autores - parede com abertura central e confinada por pórtico de aço -, onde é visível a formação de fissuras diagonais nos membros verticais adjacentes à abertura (*piers*), referenciadas na Figura 2-4.



**Figura 2-6 – Ruptura de parede com aberturas confinada por pórtico de aço
(BENJAMIN R. e WILLIAMS H.A, 1958)**

TURNSEK e CACOVIC (1971) realizaram ensaios em paredes submetidas à ação combinada de tensões normais e de cisalhamento. Os autores admitiram a hipótese de que a ruptura por cisalhamento com fissuração diagonal ocorre quando a tensão principal de tração atinge um valor limite f_{tu} , assumido como resistência à tração convencional da alvenaria. Assume-se portanto que, relativamente ao estado limite de ruptura por cisalhamento com fissuração diagonal, a anisotropia da alvenaria pode ser desprezada, o que permite a utilização de um único parâmetro de resistência (f_{tu}). Admitindo que o painel seja suficientemente esbelto para que possa ser associado a um sólido de Saint Venant ¹, o critério proposto pelos autores é expresso pela Equação 2:3.

$$\tau_u = \frac{f_{tu}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_n}{f_{tu}}} \quad ; \quad \sigma_n = \frac{N}{dt} \quad \text{Equação 2:3}$$

onde b é a relação entre a tensão de cisalhamento máxima e a tensão de cisalhamento média numa determinada seção transversal, usualmente considerada como 1,5, t representa a espessura da parede, d seu comprimento e N a força vertical aplicada. A aplicação da Equação 2:3 a painéis rígidos resultou na sugestão de se utilizar valores de b variáveis com a relação altura/comprimento (h/d) do painel (TURNSEK e SEPPARD, 1980). Um critério aproximado (Benedetti e Tomazevic, 1984) adota $b = 1,5$ para $h/d \geq 1,5$, $b = 1$ para $h/d \leq 1,5$ e $b = h/d$ para $1 < h/d < 1,5$. Esta formulação reproduz de maneira

¹ Define-se um Sólido de Saint Venant como sendo um sólido do tipo monodimensional (uma dimensão muito maior do que a outra), constituído de material elástico, homogêneo e isótropo e cujo carregamento e condições de vínculo são aplicados unicamente em sua base.

suficientemente acurada a dependência da resistência ao cisalhamento do carregamento vertical que atua sobre a parede submetida a ensaio de cisalhamento, no qual se mantém o paralelismo da base inferior e superior do painel, que representa a condição de duplo engaste. Por outro lado, não há certeza quanto à validade desta formulação quando se varia a relação de forma da parede e suas condições de vínculo, sobretudo quando a alvenaria apresentar um comportamento marcadamente anisotrópico. A Figura 2-7 apresenta o mecanismo típico de ruptura por cortante, previsto pela formulação dos autores, no nível térreo de uma edificação de alvenaria estrutural de três pavimentos com aberturas.

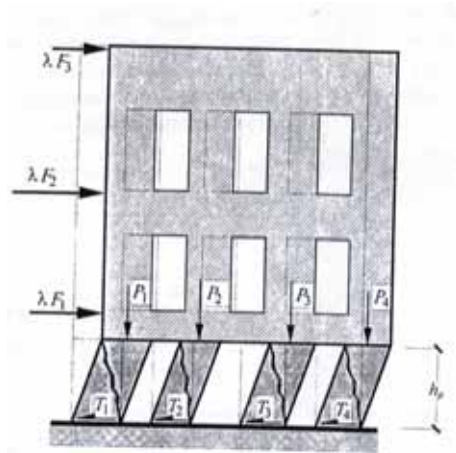


Figura 2-7 – Mecanismo de colapso por ruptura a cortante (figura de LIBERATORI D. et al, 2000)

MANN e MULLER (1976) desenvolveram uma teoria que prevê para qual par de tensões σ e τ a ruptura é caracterizada, partindo da hipótese de que não há transferência de tensões de cisalhamento nas juntas de argamassa vertical localizada entre os blocos, o que significa dizer que não há carga vertical nestas juntas capaz de produzir atrito (Figura 2-8).

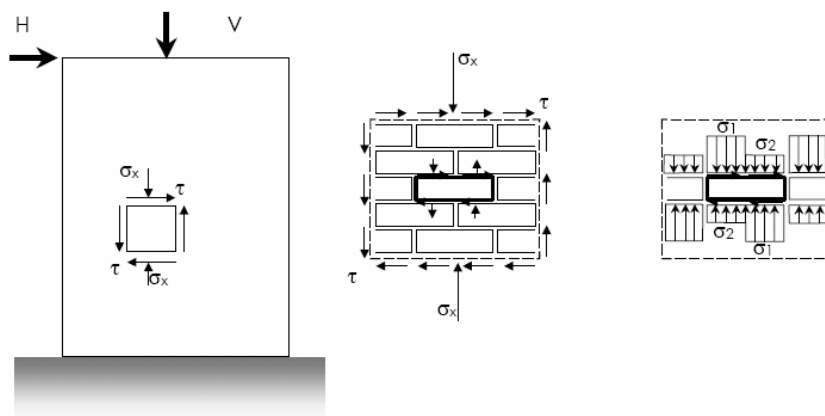


Figura 2-8 – Elemento submetido a cisalhamento

Sustentam esta hipótese considerando que as juntas verticais não são frequentemente preenchidas ou, quando o são, a argamassa fissa devido à retração. Este aspecto foi confirmado pelos autores nos ensaios realizados, nos quais as fissuras por cisalhamento sempre se originam nas juntas de argamassa verticais. A ruptura pode ocorrer de várias maneiras, dependendo da relação entre a tensão normal e a tensão de cisalhamento. Os critérios de ruptura definidos pelos autores são os seguintes: *ruptura por atrito nas juntas de argamassa horizontais* com o critério de falha sendo expresso através de uma modificação da Lei de Coulomb com a introdução de um coeficiente de atrito reduzido e uma coesão reduzida (Equação 2:4), determinados a partir da coesão inicial, do coeficiente de atrito da junta horizontal de argamassa e das dimensões do bloco; *ruptura por fissuração dos blocos*, quando se tem um elevado valor da tensão vertical, com critério de falha sendo definido através da Equação 2:5.

$$\tau = \bar{\kappa} + \bar{\mu}\sigma_v \quad \text{Equação 2:4}$$

$$\tau_u = \frac{\beta_{zst}}{2.3} \sqrt{1 + \frac{\sigma_v}{\beta_{zst}}} \quad \text{Equação 2:5}$$

onde β_{zst} é a resistência à compressão do bloco; *ruptura por compressão da alvenaria* que ocorre para elevados valores da tensão normal vertical com critério de falha formulado através da Equação 2:6.

$$\tau_u = (\beta_M - \sigma_v) \frac{\Delta y}{2\Delta x} \quad \text{Equação 2:6}$$

onde β_M é a resistência à compressão da alvenaria (obtida das normas ou regulamentos nacionais), Δx e Δy são as dimensões do bloco na direção x e y , respectivamente.

O Gráfico 2:1 apresenta as tensões de cisalhamento aceitáveis de acordo com os critérios definidos pelos autores. A envoltória destas curvas se acha indicada por uma linha contínua, que delimita o contorno da região formada pelas curvas que representam os três critérios de ruptura. Acha-se também representada no gráfico a Lei de Coulomb.

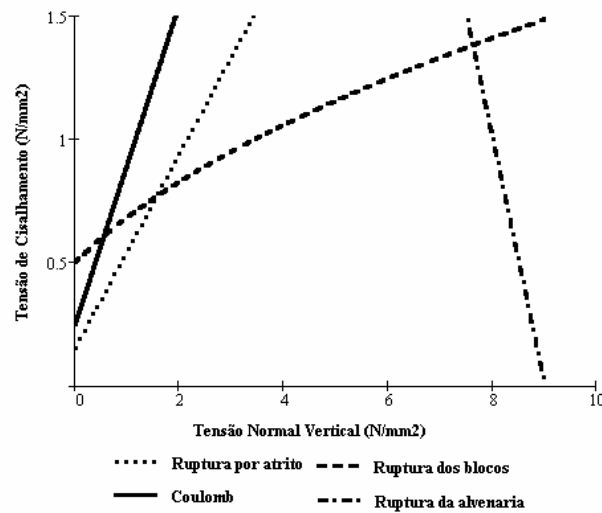


Gráfico 2:1 - Envoltória das tensões de ruptura (MANN e MULLER, 1976)

Deve-se ressaltar, no entanto, que as relações propostas pelos autores foram desenvolvidas para paredes sem juntas a prumo e são restritas a este tipo de assentamento, não podendo ser extrapoladas para outras tipologias.

YOKEL e FATTAL (1976) formularam hipóteses de ruptura de paredes de contraventamento baseado nos resultados de 32 ensaios em paredes de alvenaria de blocos cerâmicos. O estudo contempla a avaliação da capacidade de carga de paredes de alvenaria com blocos cerâmicos submetidas a uma carga de compressão diagonal combinada com uma carga de compressão aplicada nos lados normais às juntas horizontais de argamassa (Figura 2-9), que visam reproduzir condições de carregamento similares àquelas usualmente encontradas em paredes de contraventamento de edifícios.

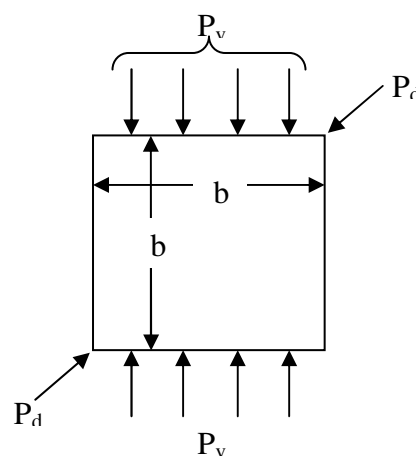


Figura 2-9 - Condições de carregamento do ensaio (YOKEL e FATTAL, 1976)

As rupturas observadas foram agrupadas em três categorias: (1) *separação ao longo da junta de argamassa* que pode ser formulada com recurso à Equação 2.3 com um coeficiente de atrito (μ) igual a 0,4; (2) *separação na direção da tensão principal de tração no centro do painel*; (3) *separação aproximadamente na direção da tensão principal, mas não em direção do centro do elemento*. Um indicador da mudança do modo de ruptura é proposto pelos autores baseado na relação entre a resistência nominal ao cisalhamento obtida de ensaios com cisalhamento diagonal e a resistência à flexão de uma secção horizontal que depende da resistência à tração da argamassa e da ligação entre os blocos e a argamassa.

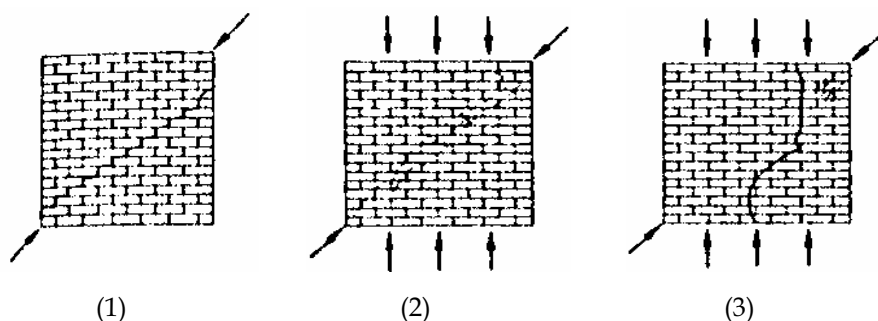


Figura 2-10 - Modos de ruptura típicos dos modelos ensaiados YOKEL e FATTAL (1976)

Nas análises realizadas foi assumido que a resistência pode ser relacionada com hipotéticos níveis de tensão na ruptura, calculados mediante recurso a modelos linearmente elásticos e isotrópicos, devido à indisponibilidade de informações sobre a variação das propriedades direcionais dos modelos ensaiados. Fundamentado em análises numéricas utilizando uma relação de 2 para 1 entre os módulos de elasticidade ortogonais, os autores concluem que a consideração do comportamento ortotrópico não alteraria de maneira significativa os resultados obtidos. Além disto, no caso particular da ruptura por separação das unidades (rotulada de (2) acima), a hipótese se baseia num estado de tensão puramente elástico no centro do painel, hipótese que só se verifica se a ruptura for frágil (não haja importante redistribuição de tensões em níveis de carga inferiores àqueles definidos pelas cargas de ruptura) e se as seções críticas se situarem perto ou no centro do painel, situações que nem sempre são verificadas, principalmente no caso de paredes dotadas de aberturas. Nenhuma evidência de rupturas por esmagamento das unidades de alvenaria ou juntas de argamassa foi observada nos ensaios realizados pelos autores.

DRYSDALE et al. (1979) apresentaram resultados de 74 ensaios de cisalhamento em paredes, com e sem aplicação de pré-compressão. Os resultados obtidos mostraram que a resistência de aderência para a alvenaria sem aberturas é afetada pela condição da superfície e pela taxa inicial de absorção de água das unidades. Não foi observada importante correlação entre a resistência da argamassa, a resistência à compressão do prisma e a resistência de aderência.

SAMARASINGHE et al. (1981) apresentaram uma abordagem analítica na qual a ruptura localizada de paredes de contraventamento é formulada através de um critério de falha baseado em tensões biaxiais. A formulação proposta, fundamentada em ensaios experimentais de paredes submetidas à ação combinada de pré-compressão e carregamento horizontal, é expressa através de uma superfície de ruptura tridimensional (σ_1 , σ_2 e θ), onde θ é a inclinação de σ_1 com relação à junta horizontal de argamassa. A ruptura pode ser prevista pela superfície de ruptura proposta (Figura 2-11) para valores particulares de θ e pela relação σ_1/σ_2 sendo o modo de ruptura variável com a localização do ponto na superfície. Utilizando este critério, os autores definiram curvas de ruptura local da alvenaria em termos das tensões normais (σ_x e σ_y) e tensões de cisalhamento. A Figura 2-12 mostra a ruptura localizada da alvenaria em função de σ_y e τ para variados valores de σ_x . Como se trata de um critério de ruptura localizado, não pode ser diretamente comparado com os resultados obtidos da aplicação dos critérios que consideram o comportamento global do painel, a não ser que a ruptura ocorra imediatamente após a formação da primeira fissura.

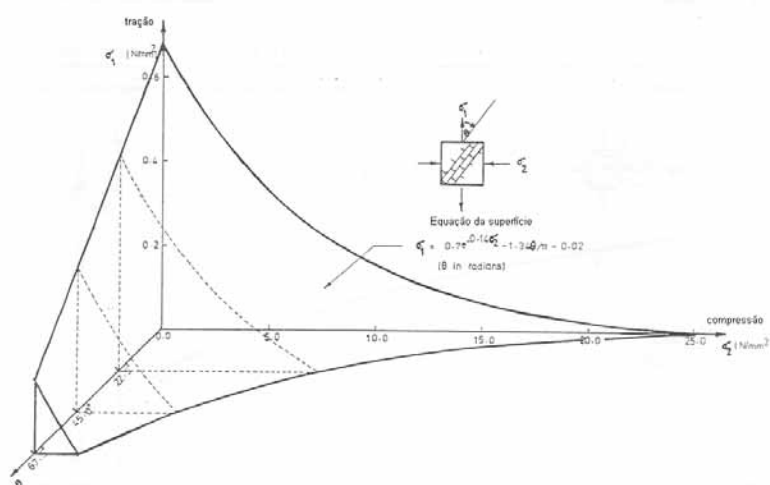


Figura 2-11 - Critério de ruptura biaxial (SAMARASINGHE et al., 1981)

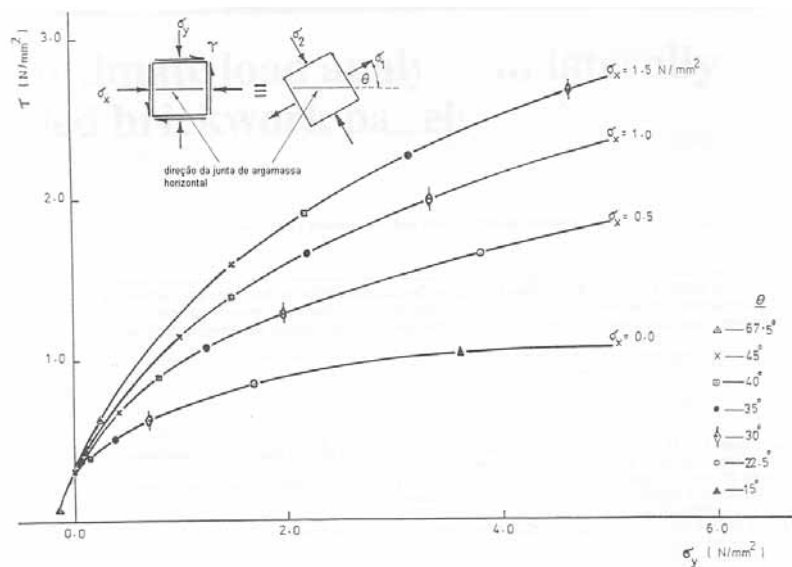


Figura 2-12 – Critério de ruptura em termos de τ e σ_y para σ_x variável

O EC-6 (EUROCÓDIGO 6, 1995) estabelece que a resistência característica ao cortante da alvenaria não armada, utilizando argamassa de uso geral e com todas as juntas preenchidas, pode ser tomada como o menor dos seguintes valores entre a Equação 2:7 e a Equação 2:8.

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0,4\sigma_d \quad \text{Equação 2:7}$$

ou

$$f_{vk} = 0,065f_b \quad \text{mas não menor do que } f_{vk0} \quad \text{Equação 2:8}$$

onde:

f_b é a resistência normalizada à compressão das unidades de alvenaria;

σ_d é o valor de projeto da tensão de compressão perpendicular ao corte no elemento de alvenaria no piso em análise;

f_{vk0} é a resistência ao cisalhamento, sob compressão nula

considerando um valor limite para f_{vk} relacionado com a classe da argamassa e a qualidade das unidades da alvenaria.

No caso de alvenaria com juntas transversais não preenchidas, ainda que com as faces contíguas das unidades de alvenaria firmemente encostadas, a resistência característica ao cortante da alvenaria não armada, segundo o EC-6, deve ser tomada como o menor dos seguintes valores:

$$f_{vk} = 0.5 f_{vk0} + 0,4 \sigma_d$$

ou

$$f_{vk} = 0,045 f_b \text{ mas não menor do que } f_{vk0} \quad \text{Equação 2:9}$$

considerando um valor limite para f_{vk} igual a 70% dos limites anteriores.

Finalmente, para a alvenaria com juntas descontínuas (parede na qual apenas os septos longitudinais, onde se efetua o assentamento, são argamassados), o EC-6 indica que a resistência característica ao cisalhamento deva ser tomada como o menor dos seguintes valores:

$$f_{vk} = \frac{g}{t} f_{vk0} + 0,4 \sigma_d \quad \text{Equação 2:10}$$

onde g é igual à largura total das duas faixas de argamassa e t é a espessura da parede

ou

$$f_{vk} = 0,05 f_b \text{ mas não menor do que } f_{vk0} \quad \text{Equação 2:11}$$

considerando os mesmos valores limites de f_{vk} nas juntas transversais não preenchidas.

A Norma do American Concrete Institute para alvenaria (ACI 530/05/ASCE 5-05/TMS 402-05) estabelece que as tensões de cisalhamento na alvenaria não armada, devidas a forças agindo na direção considerada, devem ser calculadas pela Equação 2:12.

$$f_v = \frac{VQ}{Ib} \quad \text{Equação 2:12}$$

onde:

V = esforço cortante de projeto;

Q = momento estático da seção transversal do elemento em estudo;

b = base da seção transversal e

I = momento de inércia da seção transversal líquida.

Estabelece ainda este regulamento que as tensões de cisalhamento no plano não devem exceder os seguintes valores:

(a) $1.5\sqrt{f'_m}$; sendo f'_m = resistência à compressão da alvenaria

(b) 120 psi (827 kPa)

(c) $\nu + 0.45 N_v / A_n$; sendo N_v e A_n força de compressão vertical e área líquida da seção transversal, respectivamente e:

$\nu = 37$ psi (225 kPa) para alvenarias não grauteadas com juntas verticais não aprumadas;

$\nu = 37$ psi (225 kPa) para alvenaria grauteada com juntas verticais aprumadas;

$\nu = 60$ psi (414 kPa) para alvenaria grauteada com juntas verticais não aprumadas;

(d) 15 psi (103 kPa) para alvenaria com outro tipo de assentamento

A Norma brasileira (NBR-10837/89) estabelece que nas paredes de alvenaria armada solicitadas por esforço cortante horizontal, a tensão convencional de cisalhamento (τ_{alv}) seja calculada pela Equação 2:13:

$$\tau_{alv} = \frac{V}{bt} \quad \text{Equação 2:13}$$

onde:

V = esforço cortante horizontal correspondente às cargas de serviço sem majoração;

b = largura efetiva da seção transversal e

t = espessura efetiva.

Estabelece ainda que a tensão convencional de cisalhamento assim calculada não deva exceder os seguintes valores, para alvenaria não armada:

(a) 0.25 MPa para construção com blocos vazados ou maciços e $12 \text{ MPa} \leq f_a \leq 17 \text{ MPa}$;

(b) 0.15 MPa para construção com blocos vazados ou maciços e $5,0 \text{ MPa} \leq f_a \leq 12 \text{ MPa}$.

e, para alvenaria armada, estabelece as seguintes limitações:

(c) $0,09\sqrt{f_p}$ MPa para peças fletidas sem armadura, limitada a 0,35 MPa;

- (d) $0,07\sqrt{f_p}$ MPa para pilares paredes, se $\frac{M}{Vd} \geq 1$, limitada a 0,25 MPa;
- (e) $0,17\sqrt{f_p}$ MPa para pilares paredes, se $\frac{M}{Vd} < 1$, limitada a 0,35 MPa;
- (f) $0,25\sqrt{f_p}$ MPa para peças fletidas com armadura para absorver todas as tensões de cisalhamento, limitada a 1,00 MPa;
- (g) $0,12\sqrt{f_p}$ MPa para pilares paredes, se $\frac{M}{Vd} \geq 1$ e com armadura para absorver todas as tensões de cisalhamento, limitada a 0,50 MPa;
- (h) $0,17\sqrt{f_p}$ MPa para pilares paredes e $\frac{M}{Vd} > 1$ e com armadura para absorver todas as tensões de cisalhamento, limitada a 0,80 MPa;

onde:

f_a = resistência à compressão da argamassa de assentamento;

f_p = resistência média à compressão dos prismas;

M = momento fletor;

V = força cortante e

d = altura útil

2.2 Métodos de Análise Estrutural de Paredes de Contraventamento de Alvenaria com Aberturas

A análise de paredes de contraventamento dotadas de aberturas se constitui um dos aspectos mais difíceis no processo de dimensionamento porque a introdução de aberturas empresta complexidade ao seu comportamento estrutural. Do ponto de vista meramente didático, pode-se hierarquizar os métodos de análise de paredes de contraventamento de alvenaria com abertura em duas categorias: métodos de análises utilizando abordagens simples e métodos numéricos, normalmente baseado no Método dos Elementos Finitos.

A seguir apresenta-se uma breve caracterização destas duas categorias, ressaltando as abordagens mais relevantes disponíveis na literatura.

2.2.1 Métodos Numéricos de Análise

Paredes de contraventamento com aberturas podem ser analisadas utilizando-se programas comerciais baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF),

utilizando análise 2D ou 3D em regime linear ou não linear. Modelos avançados para a representação física do comportamento da alvenaria já se acham disponíveis, conforme se mostrará mais adiante, mas sua utilização tem sido restrita a fins de pesquisa, tendo em vista a excessiva demanda de esforço e tempo na geração dos modelos e interpretação dos resultados. Dentro deste, têm surgido ao longo dos últimos anos modelos mais simples de análise que têm apresentado resultados satisfatórios quando comparados com os números decorrentes de ensaios experimentais realizados ou mesmo análises com o MEF. A seguir uma revisão bibliográfica sobre estes modelos.

2.2.1.1 Método das Ligações Rígidas

Este método foi inicialmente desenvolvido para paredes de edifício de múltiplos andares carregadas no seu próprio plano e foi sucessivamente estendido a problemas tridimensionais (MAGENES G. , BOLOGNINI D. e BRAGGIO C. , 2000). Considera-se primeiramente o problema de uma parede de alvenaria com aberturas, carregada no plano, submetida a carregamento vertical constante e força horizontal crescente aplicada ao nível de cada um dos pisos da edificação. Se a geometria da parede e das aberturas for suficientemente regular, é possível idealizar uma parede de alvenaria como um pórtico equivalente constituído por colunas, vigas e nós conforme indicado na Figura 2-13 a seguir.

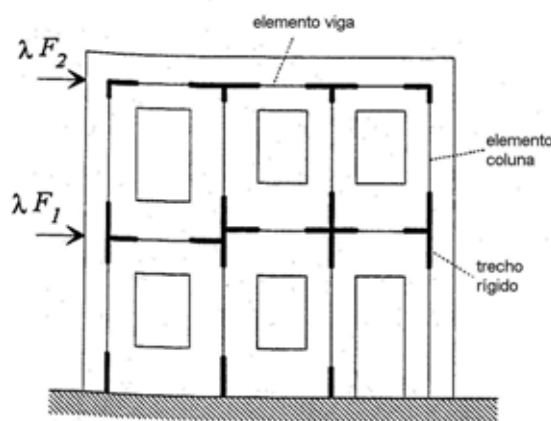


Figura 2-13 - Esquema de pórtico equivalente de uma parede carregada no plano

Se se admite que os elementos “nós” são infinitamente rígidos e resistentes é possível modelá-los numericamente através da introdução de trecho rígidos nas extremidades dos elementos de vigas e colunas e o modelo estrutural resultante é, portanto, equivalente a um pórtico plano com ligações rígidas nas extremidades dos

elementos. As vigas são curtas e de grande altura e as colunas são baixas e largas, aspecto que demanda a consideração da deformação por cisalhamento nos elementos.

2.2.1.2 Método das Ligações Flexíveis

Desenvolvido por SAFARINI e WILSON (1983), este método, a exemplo do Método das Ligações Rígidas, utiliza o mesmo conceito de Pórtico Equivalente, porém com pequena alteração na modelagem dos elementos que ligam as vigas e colunas. Com efeito, neste método a ligação é realizada através de elementos flexíveis, que são, na verdade, elementos finitos isoparamétricos de quatro nós para estado plano de tensões, usualmente referidos como elementos de junção, com dois graus de liberdade por nó. Os elementos de viga e coluna, que são elementos de barra com três graus de liberdade por nó, são transformados em elementos planos equivalentes através de uma matriz que relaciona os esforços nas extremidades do elemento plano com os esforços nas extremidades dos elementos de barra (viga ou coluna). Adicionalmente deve ser mantida a compatibilidade de deformações entre os elementos e também devem ser impostas equações de compatibilidade nas situações em que um nó intercepta o meio de um lado, aspecto comum nos casos de aberturas irregulares. A Figura 2-14 a seguir exhibe os detalhes deste modelo.

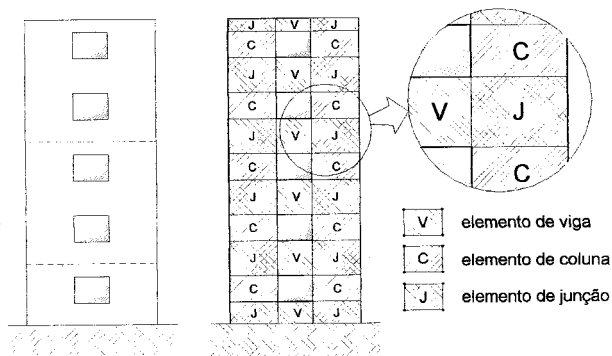


Figura 2-14 - Método das Ligações Flexíveis (G. Gonchorovski, 2001)

2.2.1.3 Método das Ligações Flexíveis Modificado

Desenvolvido por ALMEIDA e LAROVERE (1995), consiste numa evolução do Método das Ligações Flexíveis com o objetivo de melhorar sua precisão, de forma a aproximar os resultados obtidos daqueles que se consegue com a análise através do Método dos Elementos Finitos. A estratégia de modificação adotada consiste em

sucessivas reduções do comprimento dos elementos rígidos nas extremidades dos elementos de viga-coluna.

Todos os modelos acima referidos podem ser facilmente implementados em programas de análise matricial de estruturas, já tendo sido mostrado pelos seus autores satisfatória eficiência quando se comparam os resultados com aqueles decorrentes de análises em estado plano de tensões pelo MEF.

2.2.2 Métodos de Análise Utilizando Abordagens Simples

Não obstante a razoável disponibilidade de programas de computador, de menor ou maior complexidade, a análise de paredes de contraventamento dotadas de abertura através da utilização de abordagens simplificadas ainda se faz necessária, seja para que o projetista tenha uma rápida estimativa e possa criticar os resultados obtidos por programas computacionais, seja para possibilitar um melhor entendimento do comportamento da estrutura em análise.

A análise através de abordagens simplificadas pode ser hierarquizada em função do estágio de carga a que a estrutura está submetida, a saber: análise elástica para cargas de serviço e análise limite para cargas últimas.

2.2.2.1 Análise Elástica

A análise em regime elástico deve levar em consideração, ainda, o grau de acoplamento existente entre os membros da parede, sendo comum uma diferenciação de abordagem em função da magnitude deste acoplamento, da seguinte maneira:

2.2.2.1.1 Paredes sem efeito de acoplamento

Quando não existem lintéis sobre as aberturas e as paredes são ligadas exclusivamente pelas lajes de pisos (Figura 2-15), o efeito de acoplamento é desprezível e as paredes podem ser consideradas como vigas em balanço, interconectadas através de elementos rígidos, que absorvem parcela da força lateral total aplicada na proporção direta de suas inércias.

$$V_i = \left(\frac{I_i}{\sum I_i} \right) V$$

Equação 2:14

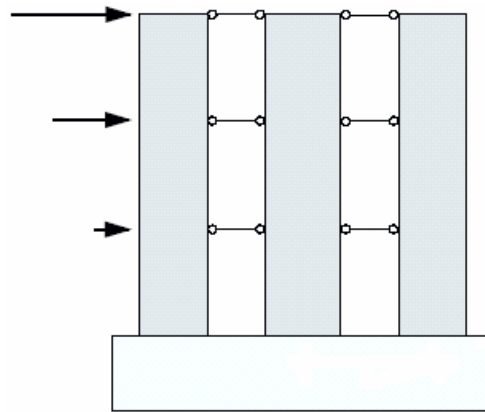


Figura 2-15 – Parede de contraventamento sem acoplamento

2.2.2.1.2 Paredes com efeito de acoplamento

Quando os lintéis existentes sobre as aberturas são suficientemente rígidos para produzirem acoplamento entre os elementos verticais contíguos às aberturas, as paredes de contraventamento com aberturas podem ser analisadas por um dos métodos descritos na seção 2.2.1.

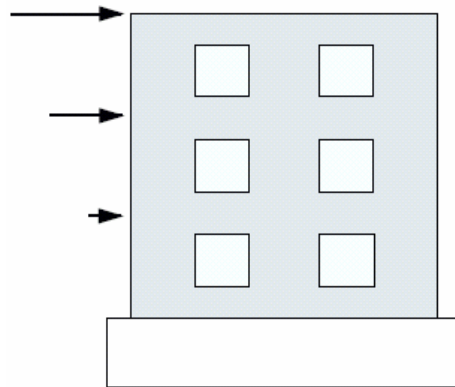


Figura 2-16 – Parede de contraventamento com acoplamento

As forças internas e os momentos fletores podem ser calculados mediante recurso a procedimentos simples, conforme se indica a seguir. Para tal considere a Figura 2-17.

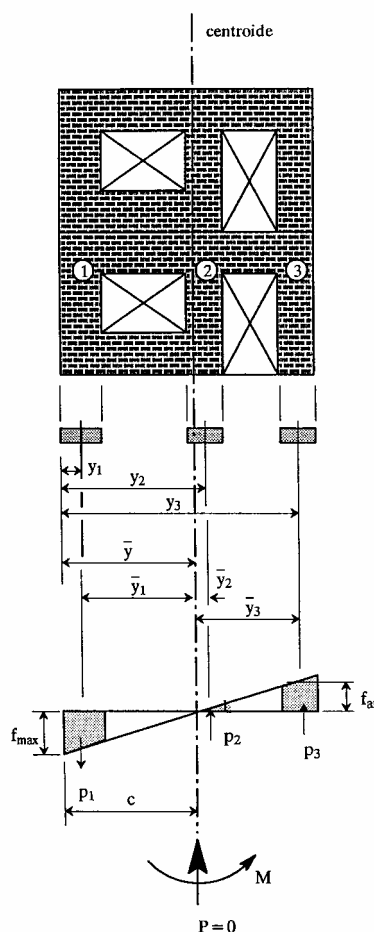


Figura 2-17 – Distribuição do momento de tombamento

i) Cálculo das forças axiais nos membros verticais entre aberturas

O momento de tombamento devido às forças laterais é resistido por uma combinação de momentos fletores na base dos elementos verticais e por forças axiais de acoplamento nestes elementos. As forças axiais, devido ao momento de tombamento, podem ser estimadas considerando-se os elementos engastados em suas extremidades e assumindo a condição de seções planas após a deformação (distribuição linear de deformações), através da Equação 2:15.

$$p_i = \left(\frac{A_i \bar{y}_i}{\sum A_i \bar{y}_i^2} \right) M \quad \text{Equação 2:15}$$

Na qual $\bar{y}_i$ é a distância do centro do elemento ao centro de gravidade da estrutura e A_i é a área deste elemento. O momento de tombamento decorrente das forças horizontais aplicada ao nível de cada piso da edificação é calculado em relação ao topo das aberturas do térreo (local ① da Figura 2-17).

ii) *Distribuição da força lateral entre os elementos verticais*

A força cortante total aplicada V é repartida entre os elementos verticais na proporção direta de suas rigidezes, conforme de indica na Equação 2:16.

$$V_i = \left(\frac{R_i}{\sum R} \right) V \quad \text{Equação 2:16}$$

O cálculo da rigidez relativa destes elementos verticais é usualmente conduzido por processos aproximados (DRYSDALE et al., 1993), onde são consideradas as contribuições da flexão e do cisalhamento. Na seção a seguir serão aprofundados detalhes sobre este procedimento.

iii) *Cálculo dos momentos fletores nos elementos verticais*

Uma vez conhecida a força cortante que atua em cada elemento (determinada no item ii), os momentos fletores nas extremidades dos elementos podem ser calculados admitindo-se a condição de extremidades engastadas através da Equação 2:17.

$$M_i = \left(\frac{h_i}{2} \right) V_i \quad \text{Equação 2:17}$$

Na qual h_i representa a altura do elemento vertical em estudo.

Deve-se ressaltar que a consideração de extremidades engastadas pode conduzir a valores não realistas para os momentos fletores. Com efeito, as extremidades dos elementos verticais no interior de uma parede de contraventamento não se acham totalmente impedidas de girar, sendo diferente o ponto de inflexão da deformada daquele considerado na Equação 2:17 - $\frac{h_i}{2}$ - gerando com isto momentos fletores maiores na base dos elementos.

2.2.2.2 Análise Limite

Os métodos de análise limite empregados para a determinação das cargas de colapso de estruturas são fundamentados no teorema do limite inferior ou superior. O

primeiro, estabelece que a carga de colapso obtida a partir de qualquer campo de tensões estaticamente admissível fornecerá um valor subestimado para a verdadeira carga de colapso da estrutura. Entende-se como campo de tensões estaticamente admissível aquele que: (a) satisfaça as equações de equilíbrio, (b) satisfaça as condições de contorno em termos de tensões e (c) não viole o critério de escoamento adotado. O segundo, postula um mecanismo de colapso compatível com as condições de vínculo da estrutura e a partir deste mecanismo se calcula a carga de colapso, que neste caso representa um limite superior para a verdadeira carga de colapso.

No caso de paredes de alvenaria armada que apresentem um comportamento predominantemente caracterizado pela flexão (a ruptura por cisalhamento é suprimida pela disposição de armaduras), um método baseado no mecanismo de ruptura através da formação de rótulas plásticas nas extremidades dos elementos verticais foi desenvolvido (LEIAVA, G. e E. KLINGNER, 1994 e LEIVA, G. e R. E. KLINGNER, 1991).

Usualmente referido como método das rótulas plásticas, este método idealiza a parede com aberturas como um pórtico equivalente ou um pórtico com colunas largas, onde o mecanismo de ruptura é caracterizado pela formação de rótulas plásticas nas extremidades dos membros, de forma que o sistema estrutural de pórtico equivalente se torne instável. A Figura 2-18, Figura 2-19 e Figura 2-20 a seguir ilustram os possíveis mecanismos de ruptura que devem ser investigados para obtenção da força lateral última por este método.

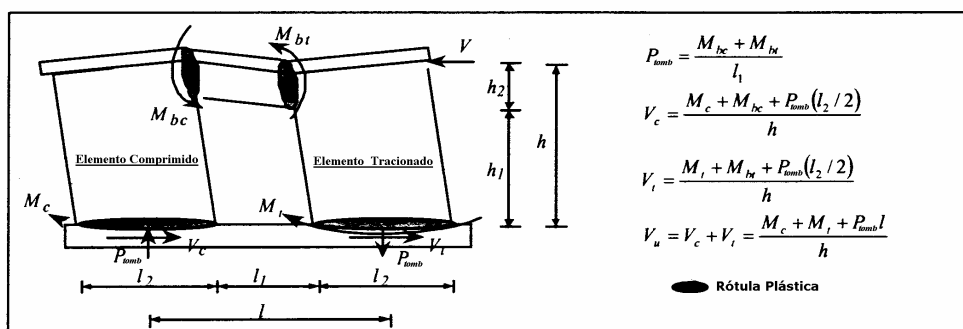


Figura 2-18 - Mecanismo de ruptura - Elemento Forte/Viga Fraca

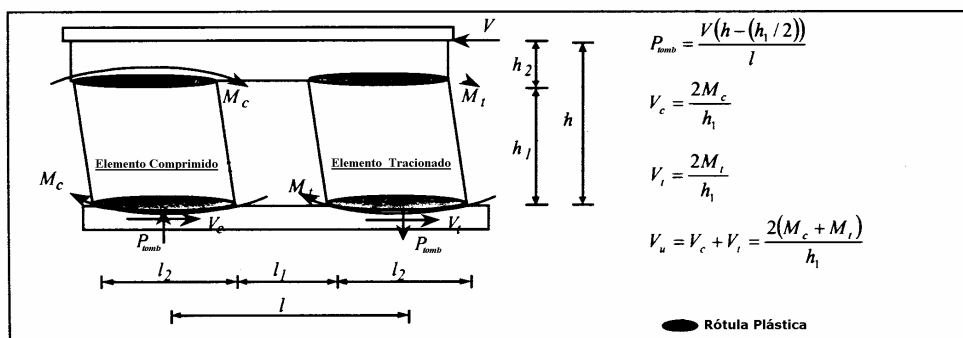


Figura 2-19 - Mecanismo de ruptura – Viga Forte/Elemento Fraco

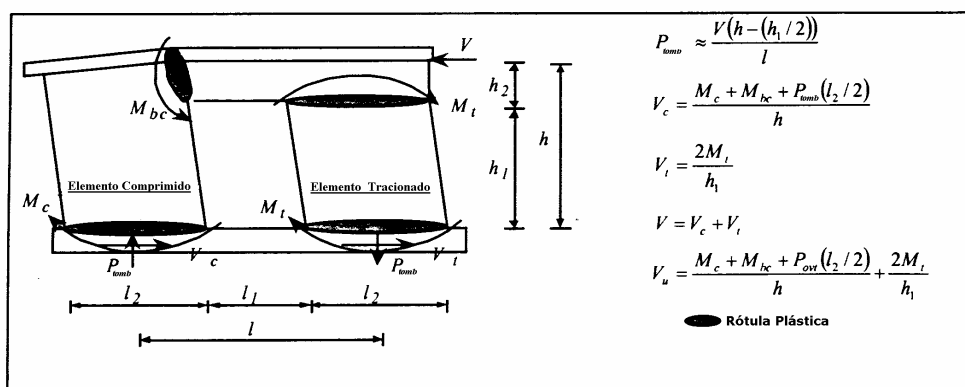


Figura 2-20 - Mecanismo combinado de ruptura

Uma vez determinada a carga última, sua distribuição entre os elementos verticais que compõem a parede com aberturas se processa na proporção direta de suas rigidezes. Maiores detalhes sobre a aplicabilidade e eficiência deste método podem ser obtidos em El-SHAFIE (1997).

No caso de paredes de alvenaria não armadas dotadas de aberturas, a disponibilidade de métodos simplificados de análise limite para a determinação da força lateral última em paredes com aberturas é bastante reduzida.

2.3 Rigidez de paredes com aberturas

As cargas horizontais que agem diretamente sobre os painéis de alvenaria são, em geral, de origem sísmica, provenientes da ação de vento ou decorrentes da modelagem de desaprumo. A Figura 2-21 a seguir apresenta de maneira esquemática as ações atuantes e os elementos resistentes de uma parede típica de alvenaria solicitada por carregamento lateral.

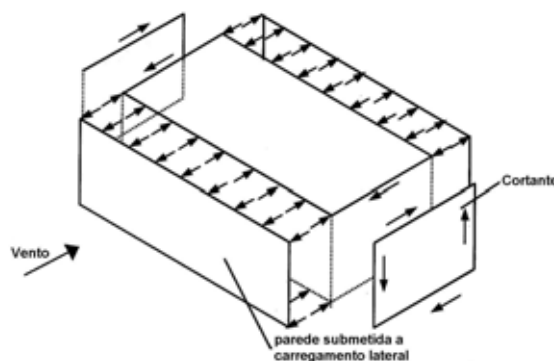


Figura 2-21 - Carregamento lateral e paredes de contraventamento (HENDRY, 1998)

A resistência às ações horizontais nas paredes de contraventamento é geralmente realizada por um sistema formado pelos pisos da edificação e pela própria parede. Devido à elevada rigidez em seu próprio plano, os pisos da edificação, que são geralmente constituídos por lajes de concreto armado, se comportam como diafragmas rígidos e transmitem às paredes de contraventamento os esforços decorrentes das ações laterais aplicadas sobre a edificação. Esta distribuição de esforços depende da rigidez do diafragma, da posição do centro de massa e do centro de torção do sistema estrutural da edificação.

A distribuição das forças laterais do diafragma para os elementos verticais resistentes é função da rigidez relativa do diafragma e da própria rigidez da parede de contraventamento. O diafragma rígido, por seu turno, distribui as forças horizontais para os elementos da parede de contraventamento na proporção direta de sua rigidez relativa. Sob a ação de carregamento simétrico, um diafragma rígido proporcionará a todos os elementos verticais da parede a mesma deflexão, o que implica dizer que cada elemento resistirá à parcela da força lateral compatível com a proporção da rigidez que este elemento tem em relação à rigidez total da parede no mesmo nível e na mesma direção. Adicionalmente, o valor do cortante horizontal máximo numa parede, calculado através de uma análise elástica linear, pode ser alterado tirando partido da possível redistribuição de esforços devido à fissuração controlada da parede nos estados limites últimos e o cortante numa parede única pode ser reduzido de 15%, desde que o cortante nas paredes paralelas seja aumentado do mesmo valor, de forma a assegurar o equilíbrio sob a ação do valor de cálculo das cargas (EUROCÓDIGO 6, 1995).

Diafragmas flexíveis, por outro lado, são considerados menos rígidos do que as paredes de contraventamento e distribuirão as forças laterais para os elementos da mesma numa maneira análoga a uma viga contínua, o que significa dizer que a

distribuição das forças laterais se processará segundo a área de influência da parede e não na proporção direta de sua rigidez.

A magnitude das forças laterais totais em qualquer piso da edificação depende fundamentalmente do sistema estrutural adotado e da proporção da carga horizontal total que é suportada por um elemento particular de uma parede de contraventamento. É função da rigidez relativa deste elemento com relação à rigidez total da parede neste mesmo nível que é inversamente proporcional à deflexão causada por uma força horizontal unitária.

A deflexão total no topo é a soma da deformação por corte e por flexão somadas a eventuais deformações que possam ocorrer devido à rotação na base da parede (Figura 2-22).

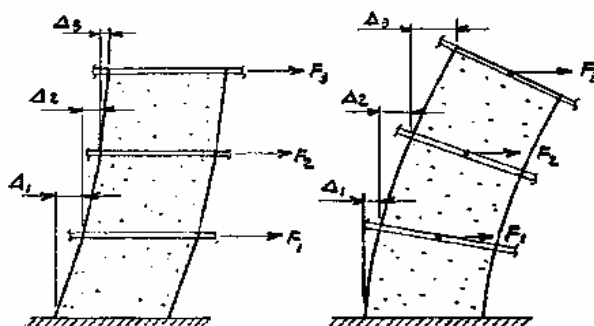


Figura 2-22 - Deformações numa parede de contraventamento: (a) Cortante, (b) Flexão

Vários fatores afetam a rigidez dos elementos de uma parede de contraventamento, dentre os quais destacam-se:

- A existência de juntas de dilatação/juntas de retração (juntas de controle)

Juntas de dilatação e juntas de retração são separações completas que dividem a parede em elementos e são dispostos para controlar a fissuração na alvenaria, resultante da retração das unidades de concreto. Para se controlar a deformabilidade na alvenaria com blocos cerâmicos, são utilizadas as juntas de expansão. Os elementos da parede de contraventamento dotados de juntas de controle devem, portanto, ser considerados como membros estruturais isolados durante a análise da rigidez da parede. O número e localização destas juntas de controle dentro do comprimento total da parede podem afetar de maneira significativa as rigidezes dos elementos, com efeito mais notável nas deformações devidas à flexão.

- A existência de aberturas

As aberturas de portas e janelas reduzem a rigidez das paredes de contraventamento e, se as suas dimensões forem significativamente grandes ou estas forem numerosas e com marcada irregularidade, precisam ser consideradas no cálculo da rigidez da parede. Pequenas aberturas conduzem a pequenas alterações no estado de tensão global da parede ao passo que grandes aberturas necessariamente produzem efeitos mais pronunciados. A questão que se coloca é como estabelecer uma classificação de uma abertura em grande ou pequena. ALBIGES e GOULET (1960) oferecem uma possibilidade de classificação das aberturas em paredes de alvenaria em estrutural em três tipos - pequenas, médias e grandes aberturas -, em função de um parâmetro que representa o grau de monolitismo da parede. Alguns métodos de análise já vistos anteriormente consideram a parede com aberturas como um pórtico, no qual os pilares são constituídos pelos elementos verticais e as vigas pelos lintéis. Deve-se, no entanto, ter em mente que esta hipótese pode apresentar uma precisão ilusória haja vista que, em razão da largura dos pilares, é pouco provável que a variação de esforços e deformações acuse a descontinuidade indicada pelo diagrama de momentos fletores oriundo do cálculo como pórtico.

- A geometria dos elementos

Elementos de canto de uma parede de contraventamento geralmente têm seção L ou T que apresentam maior rigidez do que elementos retilíneos. Este aumento de rigidez, por outro lado, é limitado e geralmente difícil de quantificar. Como forma de expressar esta limitação, os códigos definem as dimensões máximas das abas ou flanges das paredes de seção composta. A Tabela 2:1 a seguir sumariza as recomendações de alguns códigos sobre este tema.

Código		
ACI	Eurocódigo 6 (o menor dos seguintes valores)	NBR 10837
6t	2h/10 L/2 Distância entre pisos/2	6t

t = espessura da parede; h = altura da parede de contraventamento;
L = distância entre paredes de contraventamento

Tabela 2:1 - Dimensões de abas ou flanges (ACI, EC-6 e NBR 10837)

A estimativa da rigidez de paredes de contraventamento dotadas de aberturas se constitui uma das etapas mais árduas do processo de dimensionamento. Uma avaliação realista desta rigidez é de fundamental importância para a correta distribuição das forças laterais entre os diversos elementos verticais que a compõem bem como para o cálculo dos deslocamentos laterais que permitirão a verificação dos estados limites de utilização da edificação. Infelizmente, a estimativa desta rigidez não se constitui uma tarefa de implementação fácil, haja vista sua dependência de uma gama variada de fatores, tais como: fissuração, nível de pré-compressão, configuração geométrica da parede, relação de forma dos membros verticais, entre outros.

Para fins de projeto, a rigidez elástica não fissurada de paredes de contraventamento dotadas de aberturas é usualmente calculada mediante recurso a procedimentos empíricos aproximados disponíveis na literatura, que são a seguir discutidos.

2.3.1 Método I

Neste método, a parede de contraventamento em análise é dividida numa série de segmentos, conforme indicado na Figura 2-23, e as deflexões de todos os segmentos são calculadas, utilizando princípios da teoria elástica e propriedades brutas da seção transversal da parede, e somadas para se obter a deflexão total da parede.

As deflexões dos segmentos contendo aberturas são calculadas admitindo a hipótese de engaste no topo e na base do segmento e as deflexões dos elementos que não contêm aberturas são calculadas assumindo a hipótese de engaste na base e extremidade livre no topo.

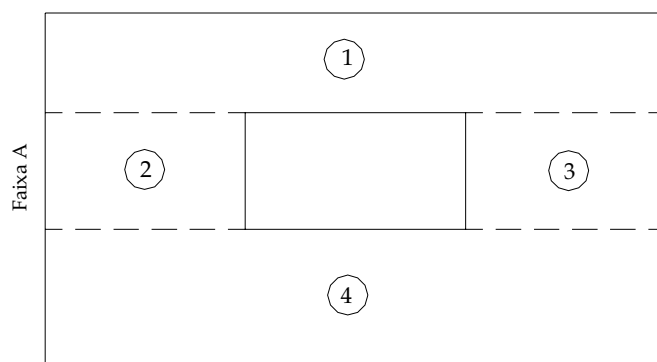


Figura 2-23 – Parede de Contraventamento com Aberturas

O procedimento para a determinação da rigidez da parede indicada na Figura 2-23 é a seguir ilustrado.

$$\begin{aligned}
 R_{parede} &= \frac{1}{\Delta_{parede}} = \frac{1}{\Delta_{1(B)} + \Delta_{2,3(E)} + \Delta_{4(E)}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{R_{1(B)}} + \frac{1}{R_{2,3(E)}} + \frac{1}{R_{4(E)}}}
 \end{aligned}$$

Equação 2:18

com

 $\Delta = \text{deflexão} ; R = \text{rigidez}$

$$R_{2,3(E)} = R_{2(E)} + R_{3(E)}$$

Na Equação 2:18 os índices B e E indicam as condições de contorno dos diversos segmentos da parede, sendo B representativo da extremidade em balanço e E representativo de extremidades engastadas.

Se ambas as extremidades do segmento acham-se fixas, ou no caso de segmentos contíguos a aberturas (Figura 2-24), a deflexão total, calculada no domínio elástico linear, é definida pela Equação 2:19.

$$\Delta = \Delta_f + \Delta_c = \frac{Hh^3}{12E_m I} + \frac{H}{A_c} \frac{1}{G} h$$

Equação 2:19

onde:

 $\Delta_f =$ deflexão devida à flexão; $\Delta_c =$ deflexão devida ao cisalhamento; $A_c =$ área de cisalhamento da seção transversal do segmento; $I =$ momento de inércia da seção transversal do segmento na direção da flexão; $E_m =$ módulo de elasticidade longitudinal da alvenaria; $G =$ módulo de elasticidade transversal da alvenaria; $h =$ altura do segmento.

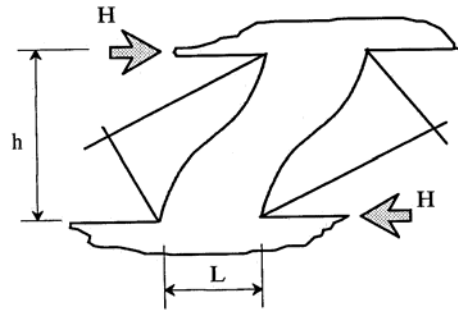


Figura 2-24 - Segmento entre aberturas

Se se admite que a parede tem seção transversal retangular com área $A = Lt$, momento de inércia $I = L^3t/12$ e considerando ainda que $A_v = 5/6 A_g$ e $G = 0.4 E_m$ (EUROCÓDIGO 6, 1995), a Equação 2:19 pode ser escrita sob a seguinte forma:

$$\Delta = \frac{H}{tE_m} \left(\frac{h}{L} \right) \left[\left(\frac{h}{L} \right)^2 + 3 \right] \quad \text{Equação 2:20}$$

onde:

t = espessura do segmento;

L = comprimento do segmento

e a correspondente rigidez é dada por:

$$k = \frac{H}{\Delta} = \frac{tE_m}{\left(\frac{h}{L} \right) \left[\left(\frac{h}{L} \right)^2 + 3 \right]} \quad \text{Equação 2:21}$$

Se os elementos forem fixos apenas na base, criando uma condição de engaste (Figura 2-25), a deflexão total será dada pela seguinte expressão:

$$\Delta = \Delta_f + \Delta_c = \frac{Hh^3}{3E_m I} + \frac{H}{A_c} \frac{1}{G} h \quad \text{Equação 2:22}$$

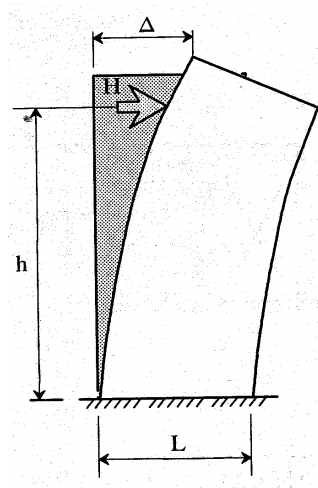
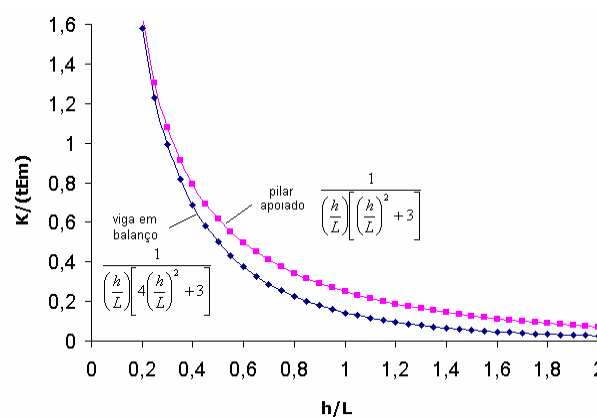


Figura 2-25 - Parede sem aberturas (viga em balanço)

Admitindo as mesmas hipóteses anteriormente referidas, a Equação 2:22 pode ser escrita sob a seguinte forma:

$$k = \frac{H}{\Delta} = \frac{tE_m}{\left(\frac{h}{L}\right) \left[4\left(\frac{h}{L}\right)^2 + 3 \right]} \quad \text{Equação 2:23}$$

O Gráfico 2:2 a seguir mostra a variação do parâmetro k/tE_m contra a relação h/L da parede, para as situações de vínculo fixo em ambas as extremidades do segmento e engaste apenas na base. Nele, pode ser observado que a rigidez das paredes com extremidades fixas é sempre maior do que aquela fixa apenas em uma extremidade.

Gráfico 2:2 - Variação da rigidez da parede com a relação h/L

As equações apresentadas anteriormente são válidas exclusivamente para cargas aplicadas no topo da parede e mudam para outras configurações de carga. Ademais, a contribuição relativa da flexão e do cortante no cálculo da deformação total

depende da relação h/L e, desta forma, a rigidez varia ao longo da altura da edificação. Por outro lado, para valores elevados da relação h/L , o efeito da deformação devida ao cortante tende a ser menor e a determinação da rigidez da parede utilizando-se apenas a contribuição da flexão apresenta razoável precisão, muito embora se reconheça que as distorções de cisalhamento são mais significativas nas paredes com flanges com grandes incrementos na rigidez à flexão mas com pouca mudança na deformação por cisalhamento. A Tabela 2:2 a seguir apresenta os efeitos da relação h/L na deflexão devida ao cortante para paredes fixas em uma ou duas extremidades, utilizando-se as equações apresentadas anteriormente.

Relação h/L	Porcentagem da Deflexão Devida ao Cortante	
	Parede c/ um engaste	Parede c/ dois engastes
0,25	92	98
1,00	43	75
2,00	16	43
4,00	5	16
8,00	1	4,5

Tabela 2:2 - Efeito da relação h/t nas deflexões por cisalhamento (DRYSDALE et al., 1994)

A maior parte dos manuais de projetos de obras em alvenaria estrutural bem como os livros textos que tratam do assunto recomendam a utilização das equações apresentadas anteriormente para se determinar as deflexões e conseqüentemente a rigidez dos membros das paredes de contraventamento, sem entretanto chamar a atenção para as hipóteses simplificadoras em que fundamentam estas equações. AMRHEIN (1983) recomenda a utilização de uma altura igual à altura das aberturas entre as quais elas estão localizadas para paredes com aberturas niveladas. O mesmo procedimento é também recomendado para paredes com aberturas desniveladas sendo que, neste caso, a menor das alturas é freqüentemente considerada como altura efetiva do elemento em estudo.

2.3.2 Método II

Considerando ainda a Figura 2-23, neste método, primeiramente, a deflexão no topo é calculada com a hipótese de extremidade livre e considerando a parede de contraventamento como uma parede sólida (sem aberturas). Na seqüência, a deflexão da

faixa interior é calculada e subtraída da deflexão da parede sólida. Finalmente, as deflexões dos elementos verticais entre as aberturas, que foram subtraídas no passo anterior, são calculadas com a hipótese de extremidades fixas e são somadas ao valor obtido no passo anterior. O procedimento para a determinação da rigidez da parede indicada por este método acha-se detalhado a seguir. O cálculo das rigidezes envolvidas na Equação 2:24 é realizado mediante recurso à Equação 2:21 e à Equação 2:23.

$$\begin{aligned}
 R_{\text{parede}} &= \frac{1}{\Delta_{\text{parede}}} = \frac{1}{\Delta_{\text{Parede_Sólida (B)}} - \Delta_{\text{FaixaA (B)}} + \Delta_{2,3(E)}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{Parede_Sólida (B)}}} - \frac{1}{R_{\text{FaixaA (B)}}} + \frac{1}{R_{2,3(E)}}}
 \end{aligned}
 \tag{Equação 2:24}$$

2.3.3 Método III

Neste método, a rigidez total da parede é calculada considerando apenas a soma da contribuição das rigidezes individuais dos elementos verticais no interior da parede (modelo de “pier”), não sendo levado em conta as contribuições dos segmentos sobre e sob as aberturas (BENJAMIN, DERCHO e SCHINEDER, 1954). Trata-se do método mais difundido para cálculo da rigidez de paredes de contraventamento dotadas de aberturas. O cálculo das rigidezes de cada um dos elementos verticais que compõem a parede é realizado mediante recurso à Equação 2:21 e Equação 2:23.

O cálculo da rigidez de quarenta e cinco paredes de contraventamento com uma, duas e três aberturas foi realizado utilizando os três métodos acima (QAMARUDDIN et al., 1996) e ficou demonstrado uma expressiva variação nos resultados, dependendo da configuração da parede, aspecto que empresta pouca confiabilidade a estes procedimentos.

Com base nos resultados obtidos, QAMARUDDIN et al. (1996) propuseram um novo método para o cálculo da rigidez de paredes de contraventamento com aberturas que inova em relação aos demais métodos disponíveis por admitir uma certa flexibilidade na ligação entre os membros verticais e os lintéis. As deformações laterais dos lintéis são desprezadas mas sua rotação na região de ligação com os membros verticais é levada em consideração no desenvolvimento das equações do método proposto. Comparação com análises numéricas através do Método dos Elementos Finitos em regime elástico-linear realizada por Silva e Filho (2005) indicou razoável discrepância de resultados.

2.4 Distribuição de forças cortantes em paredes com aberturas

As aberturas no interior de uma parede de alvenaria criam um sistema resistente às forças cortantes formado por membros verticais e lintéis, conforme se mostra esquematicamente na Figura 2-26.

A distribuição de uma força lateral aplicada é usualmente processada admitindo que os diversos membros verticais (*piers*) que integram este sistema resistente se comportam isoladamente, sem que haja interação entre eles.

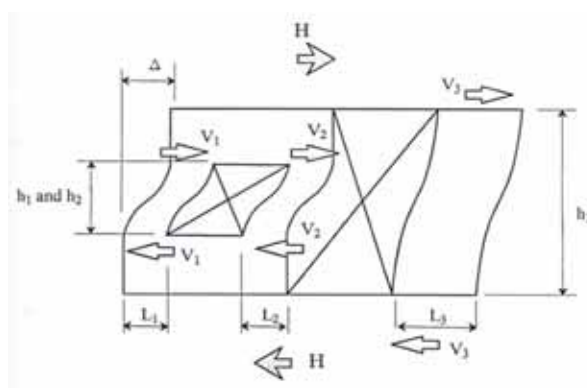


Figura 2-26 - Distribuição de força cortante para os membros verticais

A parcela da força cortante que é absorvida por um dado membro vertical é apropriada na proporção direta de sua rigidez relativa (Equação 2:16) e as dimensões destes membros, comprimento e altura, necessários ao cálculo de sua rigidez, são definidos em função da localização e tamanho das aberturas existentes na parede. Usualmente referido como modelo de “pier”, trata-se do procedimento mais utilizado para distribuição de forças cortantes em paredes com aberturas.

A eficiência deste procedimento já foi examinada (SALIBA, 1991 e SILVA, 2005), para paredes com aberturas niveladas, desniveladas e com variada localização no interior da parede, tendo sido observada, através de cotejo com diversas análises numéricas realizadas com o Método dos Elementos Finitos, uma expressiva variabilidade nos resultados. Muito embora os modelo de elementos finitos utilizado como paradigma nas análises realizadas não tenham sido avaliados por resultados experimentais, os resultados obtidos pelos autores têm importante valia no entendimento dos fatores que influenciam a eficiência do modelo de “pier” para a distribuição das ações laterais em paredes com aberturas. As principais observações formuladas nos trabalhos referidos podem ser coligidas com se segue:

- pequenos erros na determinação da rigidez dos membros verticais mais rígidos podem causar importantes e inaceitáveis erros na determinação das rigidezes dos elementos menos rígidos, gerando subestimação nas forças cortantes que os solicitam;
- mesmo em situações onde a geometria da parede contempla aberturas niveladas, o modelo de “pier” conduziu a resultados inaceitáveis;
- a explicação para a divergência de resultados observada no modelo de “pier” parece ser a hipótese de comportamento isolado dos diversos membros verticais, à semelhança de uma barra prismática, considerado distante da realidade, sendo atribuído à determinação da altura efetiva de cada membro vertical (definida pelo posicionamento das aberturas) o principal fato gerador desta divergência;
- os resultados se mostraram muito variáveis com a geometria e condições de contorno das paredes analisadas;
- a relação de forma (h/L) dos membros verticais e a rigidez dos elementos de acoplamento (lintéis) exibiram marcada influência nos resultados;
- tendo como paradigma os resultados do MEF, o procedimento de QAMARUDDIN et al. (1986) mostrou resultados mais próximos do que aqueles do modelo de “pier”, muito embora em alguns modelos estudados importantes divergências de resultados também tenham sido observadas naquele procedimento;

2.5 Ductilidade de estruturas de alvenaria não armada

Entende-se por ductilidade a capacidade que as estruturas possuem de se deformarem além dos limites elásticos sem apresentarem uma excessiva degradação de sua resistência. Costuma ser definida como a relação entre o deslocamento último (δ_u) e o deslocamento no início do escoamento (δ_y).

A ductilidade da alvenaria estrutural não armada, no entanto, não é uma ductilidade no sentido convencional, tal como aquela das estruturas de concreto armado que advém da deformação plástica da armadura. No caso da alvenaria não armada a ductilidade está associada ao deslizamento relativo dos elementos da parede ao longo das superfícies de fissuração sem perda significativa de resistência. É portanto uma função da força normal atuante, da geometria, expressa através da relação entre altura e comprimento, das propriedades dos materiais e das condições de contorno da parede.

O cálculo do deslocamento no início do escoamento pode ser definido a partir de uma curva elasto-plástica, idealizada de forma que a rigidez elástica inicial e o valor da força cortante última (V_u) desta curva seja equivalente, em termos de energia, à curva real (experimental), conforme indicado na Figura 2-27. Estudos realizados por TOMAZEVIC (1996) mostraram que adotar $V_u = 0,9 V_{max}$ é suficiente para assegurar esta equivalência, em paredes que atingem a ruptura por cisalhamento. A rigidez secante inicial é avaliada em $0,75V_u$.

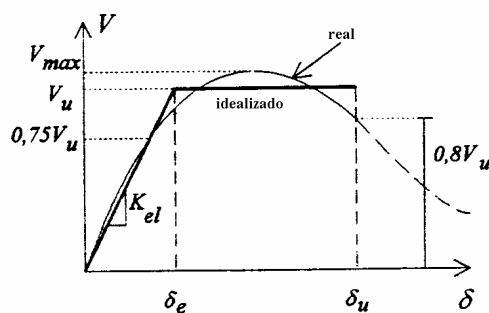


Figura 2-27 – Definição de uma curva elasto-plástica para ruptura por cisalhamento

O deslocamento último está geralmente associado a um nível de degradação da resistência da parede. Diferentes considerações têm sido propostas para o estabelecimento de um valor que caracterize este nível de degradação (SHING et al. , 1986, PRIESTLEY e PARK, 1987) , muito embora haja um certo consenso em adotar, para fins de projeto, um valor do deslocamento último correspondente a uma redução de 20% da força lateral última da parede.

Ensaio experimentais realizados em paredes de alvenaria não armadas sólidas (sem aberturas), submetidas a carregamentos laterais monotônicos e cíclicos (MAGENES, G., CALVI, G. M., 1997) e que apresentaram uma resposta estrutural predominantemente relacionada com o cisalhamento, indicaram expressiva variabilidade na avaliação do ponto correspondente ao deslocamento no início do escoamento, calculado conforme descrito acima, não sendo observada, entretanto, relação consistente entre esta variabilidade e o nível de força axial e esbeltez, muito embora interpretações físicas sugiram um aumento na rigidez com o aumento da forças axial e uma diminuição desta rigidez com o aumento da esbeltez da parede. Mesmo fato foi observado para a distorção no escoamento (relação entre o deslocamento no início do escoamento e a altura da parede). Por outro lado, foi verificado que a distorção última (relação entre o

deslocamento último e a altura da parede) apresentava uma extraordinária regularidade (coeficiente de variação da ordem de 10%), demonstrando ser este um parâmetro mais confiável para a avaliação da ductilidade de paredes de alvenaria.

2.6 Resumo do capítulo

A revisão bibliográfica apresentada ressaltou que o estudo do efeito das aberturas em paredes de contraventamento de alvenaria estrutural carregadas no seu próprio plano ainda não foi completamente exaurido. No caso da alvenaria armada, se acha disponível relativa quantidade de informações de origem experimental mas no caso da alvenaria estrutural não armada a lacuna de conhecimentos é mais expressiva.

O processo de ruptura de paredes de alvenaria não armadas carregadas em seu próprio plano depende, como foi visto, de uma gama variada de fatores dentre os quais se destacam: a qualidade dos materiais empregados, o nível de pré-compressão, as condições de contorno, a relação de forma e até mesmo a qualidade da mão-de-obra utilizada. Os tipos de ruptura podem ser itemizados e descritos de maneira sumária como se segue, tendo com base a Figura 2-4,:

- Ruptura por tração na base da parede

Caracterizada pelo desenvolvimento de tensões de tração normais às juntas horizontais de argamassa que geram fissuras horizontais, resultantes do deslizamento ao longo do plano destas juntas. Este tipo de ruptura foi observado por SINHA (1968), MANN e MULLER (1976) e YOKEL e FATTAL (1976).

- Ruptura por compressão biaxial

Aparece como resultado do desenvolvimento das fissuras de tração na base da parede, sendo a força cortante incremental totalmente absorvida pela alvenaria comprimida. A ruptura final ocorre por tombamento do painel e/ou pelo esmagamento do canto comprimido. Este tipo de ruptura foi observado por MANN e MULLER (1976) e SAMARASINGHE et al. (1981).

- Ruptura por tração diagonal

Caracterizada pela formação de fissuras diagonais que podem se localizar unicamente nas juntas de argamassas (para baixos valores da carga vertical e argamassa de pobre qualidade) ou também podem se manifestar nos blocos (para elevados valores da carga

vertical e os blocos de resistência muito baixa). Este tipo de ruptura foi observado por BENJAMIN e WILLIAMS (1958), SINHA (1968), TURNSEK e CACOVIC (1971), MANN e MULLER (1976), YOKEL e FATTAL (1976) e YANASAKI et al. (1988).

O entendimento do comportamento global/local de paredes de alvenaria estrutural não armadas dotadas de abertura solicitadas por cargas no seu próprio plano pode também ser avaliado mediante recursos a métodos de análises utilizando abordagens simples ou métodos mais complexos, utilizando programas computacionais baseados no Método dos Elementos Finitos.

Dentre os métodos que recorrem a programas computacionais, à exceção do Método dos Elementos Finitos, todos se fundamentam na representação da parede com aberturas mediante recurso a um modelo de pórtico equivalente. Dentre estes métodos destacam-se os seguintes:

- Métodos das Ligações Rígidas
- Métodos das Ligações Flexíveis e
- Método das Ligações Flexíveis Modificado

A diferença entre estes métodos reside na maneira pela qual se modelam os elementos que ligam as vigas e colunas no modelo de pórtico, através da introdução de hipóteses que possibilitam uma maior ou menor flexibilidade nestas regiões. De uma maneira geral, a introdução destas hipóteses visa aproximar os resultados obtidos por estes métodos daqueles decorrentes de análises realizadas com o Método dos Elementos Finitos.

Todos estes métodos podem ser facilmente implementados em programas de análise matricial de estruturas e apresentam satisfatória concordância quando se comparam os resultados com aqueles decorrentes de análises em estado plano de tensões pelo Método dos Elementos Finitos, podendo ser uma alternativa de valia na impossibilidade deste método.

Em adição aos métodos acima descritos, ainda se acham disponíveis os métodos que recorrem a abordagens mais simplificadas, função do estágio de carga a que a estrutura está submetida, tais como a análise linear mediante recurso a expressões usuais da Resistência dos Materiais, para cargas de serviço, e análise limite usualmente conduzidas para cargas últimas.

A distribuição das ações horizontais para os painéis que compõem o sistema de contraventamento de uma edificação em alvenaria estrutural é usualmente processada na proporção direta da rigidez relativa de cada painel que integra este sistema. O cálculo desta rigidez é usualmente conduzido mediante recursos a procedimentos simplificados disponíveis na literatura que diferem entre si na forma pela qual se processa a determinação desta rigidez. Esta diferença de abordagens conduz a resultados divergentes, aspecto que dificulta a eleição do procedimento mais apropriado para uso, muito embora estudos realizados indiquem uma melhor performance do procedimento proposto por QAMARUDDIN et al. (1986).

A distribuição de forças cortantes em paredes com aberturas é usualmente conduzida através do modelo de “pier”. Este modelo considera que os membros verticais que compõem uma parede com abertura se comportam de maneira isolada, sem interação entre si, e que a força cortante absorvida por determinado membro é proporcional à sua rigidez relativa. Estudos realizados apontam que a hipótese de não interação entre os diversos membros verticais da parede e a consideração do comportamento destes membros à semelhança de uma barra prismática se constituem aspectos de importância na divergência de resultados apresentados pro este modelo quando comparado com análises realizadas com o MEF. O procedimento alternativo proposto por QAMARUDDIN et al. (1986), que difere do modelo de “pier” por considerar uma certa flexibilidade na região de intersecção dos lintéis com os membros verticais, apresenta melhores resultados quando comparado com análises realizadas pelo MEF, muito embora adote hipóteses semelhantes àquele modelo, no que diz respeito à não interação entre os membros verticais da parede e ao comportamento dos mesmos à semelhança de uma barra prismática. Estas duas hipóteses somadas a determinação da altura efetiva de cada membro vertical (definida pelo posicionamento das aberturas) se constituem o fator gerador da divergência de resultados observada.

O Capítulo 4 discutirá com mais detalhes a eficiência dos procedimentos de distribuição de forças cortantes em paredes com aberturas.

A ductilidade se constitui numa importante medida sobre a habilidade da parede sustentar grandes deformações inelásticas e, conforme exposto anteriormente, há duas maneiras de ser avaliada: uma medida no início do escoamento (distorção no escoamento) e outra medida para um certo nível de degradação de rigidez da parede

(distorção última). Esta última demonstrou ser uma medida mais eficiente e será utilizada para discutir a ductilidade das paredes analisada numericamente ao longo da pesquisa.

3. Modelagem numérica da alvenaria

3.1 Considerações iniciais

A seguir serão abordados os aspectos metodológicos da formulação dos materiais (quasi-)frágeis que são utilizados na modelagem numérica da alvenaria estrutural, enfatizando os diferentes modos de ruptura disponíveis nos modelos de elementos finitos encontrados na literatura, especialmente desenvolvidos para a análise com este tipo de material, com especial foco no programa de análise de elementos finitos utilizado ao longo da presente pesquisa (DIANA, 1999).

A alvenaria estrutural não armada é um material formado por blocos/tijolos (unidades) e argamassas que apresenta diferentes propriedades direcionais, devido principalmente às juntas de argamassa que se constituem potenciais planos de falha, ao longo dos quais pode se iniciar e se propagar o processo de ruptura da estrutura.

O comportamento global do compósito alvenaria é determinado pelas propriedades de seus componentes e pela resistência e orientação das interfaces unidade-argamassa. Vários fatores podem influenciar esta resistência e tornar difícil a simulação numérica da alvenaria estrutural, dentre os quais pode-se destacar: a anisotropia e dimensão das unidades, a dimensão e orientação das juntas de argamassa, a posição relativa das juntas de argamassa horizontal e vertical, as propriedades da interface unidade-argamassa e a mão-de-obra utilizada no processo de construção.

De uma maneira geral, a modelagem numérica da alvenaria estrutural pode enfatizar uma representação detalhada de todos os seus componentes (unidades, juntas de argamassa e interface unidades-argamassa), à qual normalmente se chama de micro-modelagem, ou adotar uma representação macro da estrutura (macro-modelagem) na qual o material é considerado como um compósito, dotado de propriedades elásticas médias, obtidas mediante estratégias de homogeneização. Dependendo do grau de precisão e simplicidade desejados pelo analista é possível se utilizar uma das seguintes estratégias para a análise de estruturas de alvenaria, Figura 3:1 (LOURENÇO, 1996).

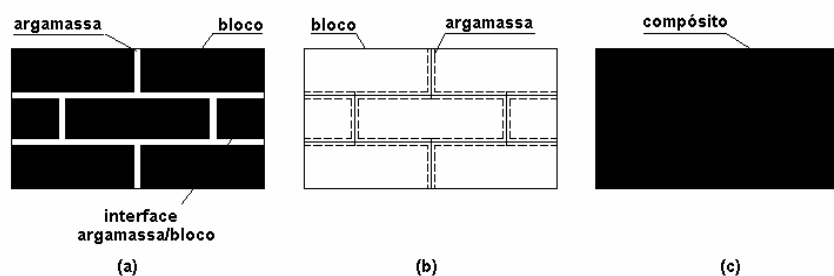


Figura 3:1 - Estratégias de Modelagens para Alvenaria: (a) micro-modelagem detalhada, (b) micro-modelagem simplificada e (c) macro-modelagem

- a) micro-modelagem detalhada: unidades e juntas de argamassa são representadas através de elementos contínuos ao passo que a interface unidade-argamassa é representada por elementos descontínuos, Figura 3:1 (a);
- b) micro-modelagem simplificada: unidades expandidas são representadas por elementos contínuos ao passo que o comportamento das juntas de argamassa e a interface unidade-argamassa são condensados em elementos descontínuos. Estes elementos representam locais preferenciais de ruptura onde ocorrem as fissuras de tração e corte, Figura 3:1 (b);
- c) macro-modelagem: unidades, juntas de argamassa e interface unidade-argamassa são condensadas no contínuo, Figura 3:1 (c).

Não se pode estabelecer uma hierarquia entre as estratégias de modelagem acima descritas tendo em vista que há campos de aplicação apropriados para micro e macro modelos. Com efeito, se se deseja obter uma visão mais detalhada (localizada) da distribuição de tensões no painel, uma abordagem com micro modelos é preferível ao passo que, em situações nas quais a estrutura em análise seja composta por paredes sólidas de grandes dimensões, de forma que as tensões ao longo de determinada dimensão possam ser consideradas essencialmente uniformes, uma abordagem com macro modelos pode ser aplicada.

Qualquer que seja o nível de detalhamento desejado pelo analista, os modelos para representação numérica do comportamento estrutural da alvenaria fazem uso da teoria matemática da plasticidade e, sendo assim, serão discutidos na seção seguintes os aspectos mais relevantes desta teoria, com foco nos tópicos de interesse para o estudo da alvenaria.

3.2 Plasticidade

A teoria matemática da plasticidade (LUBLINER, J. , 1990 ; DE SOUZA NETO, E. A. , PERIC, D. , OWEN, D. R. J. , 2002) fornece um arcabouço geral para a descrição constitutiva do comportamento de uma importante gama de materiais usualmente empregados com finalidade estrutural, tais como: metais, concreto, rochas e a alvenaria. Em linhas gerais, a teoria da plasticidade está associada a sólidos que, após serem submetidos a um processo de carregamento, apresentam deformações permanentes (deformações plásticas) quando completamente descarregados. Em particular esta teoria é restrita à descrição do comportamento de materiais nos quais as deformações permanentes não dependem da taxa de aplicação das cargas (*deformações independentes do tempo*), sendo referidos como materiais plásticos aqueles cujo comportamento pode ser adequadamente caracterizado por esta teoria.

Quando se instala o fenômeno da plasticidade, a relação entre tensão e deformação não resulta mais unívoca e a um determinado nível de tensão pode corresponder a infinitos níveis de deformação (veja Figura 3:2).

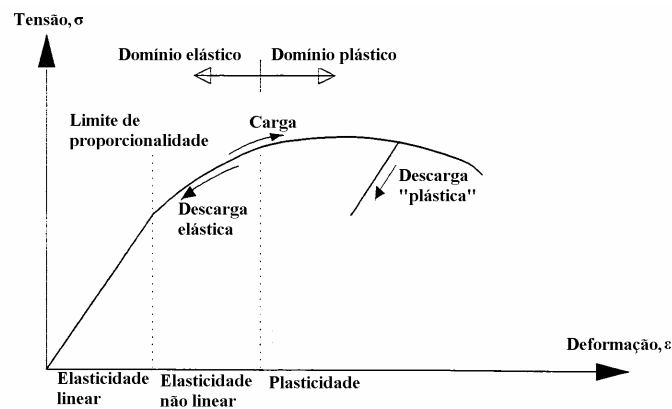


Figura 3:2 – Ilustração dos conceitos básico de elasticidade e plasticidade

A fim de se vencer esta dificuldade, as relações constitutivas que descrevem o comportamento plástico devem ser estabelecidas em termos incrementais, conforme demonstra a Equação 3:1, em sua forma matricial.

$$\{d\epsilon\} = \{d\epsilon^e\} + \{d\epsilon^p\}$$

Equação 3:1

onde: $\{d\epsilon\}$ é o incremento total de deformação

$\{d\epsilon^e\}$ é o incremento da deformação elástica

$\{d\epsilon^p\}$ é o incremento da deformação plástica

O modelo de comportamento plástico deve ainda permitir a distinção entre situações de carregamento elástico, carregamento plástico e descarregamento.

Usualmente, se admite na teoria clássica da plasticidade incremental que as situações de carga elástica e descarga obedecem a um modelo elástico, sendo aplicável o conceito generalizado da Lei de Hooke na forma incremental, conforme Equação 3:2.

$$\{d\sigma\} = [C]\{d\epsilon^e\} \quad \text{Equação 3:2}$$

ou, de forma alternativa, através da Equação 3:3.

$$\{d\epsilon^e\} = [C]^{-1}\{d\sigma\} = [D]\{d\sigma\} \quad \text{Equação 3:3}$$

Freqüentemente, é conveniente ainda considerar dois tipos de plasticidade: plasticidade perfeita (*perfect plasticity*) e plasticidade com endurecimento/amolecimento (*hardening/softening plasticity*).

A plasticidade é dita perfeita quando nenhum endurecimento é permitido, ou seja, o nível de tensão de escoamento não depende do grau de plastificação. Neste caso, a superfície de escoamento é fixa, independentemente do processo de deformação que o material possa sofrer.

Na plasticidade com endurecimento a tensão de escoamento aumenta durante o carregamento plástico ao passo que na plasticidade com amolecimento ela diminui com o aumento das deformações. A Figura 3:3 a seguir ilustra esta diferenciação, para o caso unidimensional, onde σ_y^0 e σ_y representam a tensão de escoamento inicial e a tensão de escoamento corrente, respectivamente. Nesta figura é possível também observar, conforme já mencionado anteriormente, que o processo de descarregamento é considerado sempre elástico, em qualquer um dos tipos de plasticidade representados.

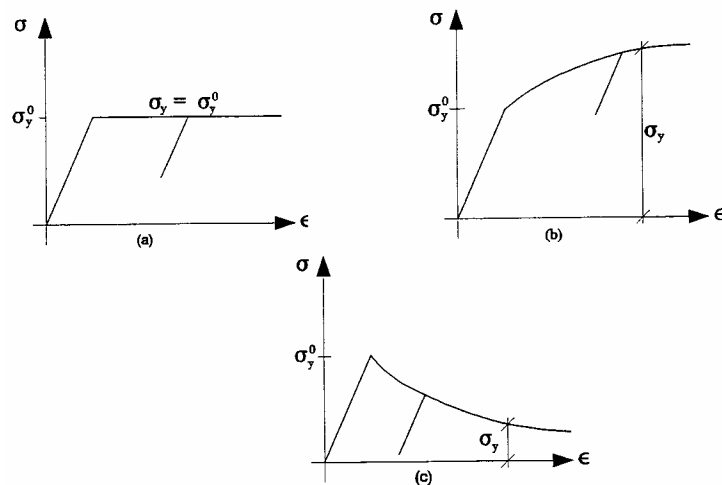


Figura 3:3 – Tipos de plasticidade - caso unidimensional : (a) plasticidade perfeita, (b) plasticidade com endurecimento e (c) plasticidade com amolecimento

3.2.1 Plasticidade perfeita

Duas importantes propriedades fenomenológicas são de maior relevância no estudo da plasticidade perfeita, a saber:

- a existência de um domínio elástico e um domínio plástico, com uma clara definição do limite entre estes dois domínios e
- a determinação do incremento de deformação plástica.

A delimitação entre os domínios elástico e plástico é usualmente realizada através dos *critérios de escoamento* e o valor do incremento de deformação plástica é avaliado mediante recurso a uma *lei de fluência* (o incremento de deformação elástica é calculado pela Equação 3:3).

3.2.1.1 Critérios de escoamento

Os critérios de escoamento têm a finalidade de estabelecer o estado limite de tensão a partir do qual a deformação plástica se manifesta no material. São tradicionalmente definidos através de uma função ou um critério de escoamento.

No caso da plasticidade perfeita, o critério de escoamento é exclusivamente definido em função do estado de tensão corrente, sendo representado de uma forma geral pela Equação 3:4.

$$f(\sigma) = 0$$

Equação 3:4

onde: f é a função de escoamento e $\{\sigma\}$ é o estado de tensão corrente.

Se um material de comportamento isotrópico é considerado, o critério de escoamento pode ser expresso em função do estado de tensões principais conforme indicado em. Equação 3:5.

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0$$

Equação 3:5

ou, de maneira alternativa, em função dos invariantes de tensão, conforme Equação 3:6.

$$f(I_1, J_2, J_3) = 0$$

Equação 3:6

O critério de escoamento definido a através da Equação 3:5 e da Equação 3:6 definem uma superfície de escoamento, dentro de seus respectivos espaços, que, no caso da plasticidade perfeita, é fixa no espaço das tensões não mudando de forma ou lugar durante o processo de carregamento.

A superfície de escoamento assim definida estabelece uma divisão do espaço das tensões em três domínios, conforme se segue:

- domínio elástico: $f(\sigma) < 0 \Rightarrow \dot{\epsilon}^p = 0$
- domínio plástico: $f(\sigma) = 0 \Rightarrow \begin{cases} \dot{\epsilon}^p = 0 \text{ para descarga elástica} \\ \dot{\epsilon}^p \neq 0 \text{ para carga adicional} \end{cases}$
- domínio não permissível: $f(\sigma) > 0$

A Figura 3:4 a seguir ilustra a divisão do espaço de tensões acima referido.

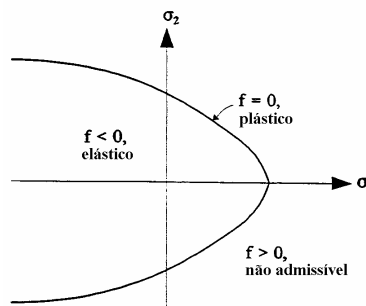


Figura 3:4 – Superfície de escoamento no espaço bidimensional das tensões principais

3.2.1.1.1 Tipos de critérios de escoamento

Fundamentado no comportamento que os materiais apresentam quando submetidos a carregamento plástico, é freqüente dividi-los em dois grupos:

- materiais insensíveis à pressão hidrostática;
- materiais sensíveis à pressão hidrostática.

Os materiais insensíveis à pressão hidrostática são aqueles em que a componente de pressão hidrostática do tensor de tensões não afeta o escoamento (o aço é um exemplo). Já o concreto e a alvenaria são exemplos de materiais que são sensíveis à pressão hidrostática, que afeta a maneira como o escoamento se processa ao longo do carregamento.

A diferenciação entre estes dois grupos de materiais pode ser facilmente estabelecida em termos dos invariantes de tensões, já que os materiais insensíveis à pressão hidrostática são, por sua vez, independentes do primeiro invariante de tensões I_1 , que contém a parte hidrostática das tensões. Isto significa que, de uma maneira geral, o critério de escoamento para materiais insensíveis à pressão hidrostática, em termos dos invariantes de tensões, pode ser expresso através da Equação 3:7.

$$f(J_2, J_3) = 0$$

Equação 3:7

Na próxima seção os critérios de escoamento de interesse para as análises numéricas realizadas serão discutidos.

3.2.1.1.1.1 Critério de escoamento de von Mises

Usualmente utilizado para descrever o escoamento plástico em metais, este critério foi proposto por von Mises em 1913. Ele estabelece que o escoamento plástico começa quando uma tensão de cisalhamento representativa atinge um valor crítico dado pela constante k .

Utilizando a tensão de cisalhamento octaédrica (Equação 3:8) como sendo esta tensão de cisalhamento representativa, o critério de von Mises pode ser formulado através da Equação 3:9.

$$\tau_{ocr}^2 = \frac{1}{9} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \frac{2}{3} J_2 \quad \text{Equação 3:8}$$

$$\tau_{oct} = \sqrt{\frac{2}{3}} k \quad \text{Equação 3:9}$$

que pode ser re-escrita, considerando a Equação 3:7, da seguinte maneira:

$$f(J_2) = J_2 - k^2 \quad \text{Equação 3:10}$$

A observação da Equação 3:10 esclarece porque a plasticidade baseada no critério de von Mises é usualmente referida como *Teoria J_2 (J_2 -Theory)*.

A constante k pode ser determinada a partir de ensaios uniaxiais ($k = f_t / \sqrt{3}$) ou a partir de ensaio de cisalhamento puro onde $k = c$, sendo f_t a resistência à tração e c a coesão.

A Figura 3:5 ilustra o critério de von Mises no espaço das tensões principais e no sub-espaço das tensões normais e de cisalhamento.

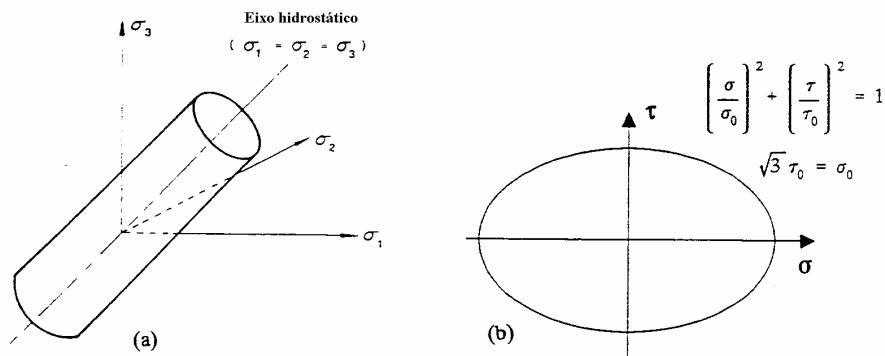


Figura 3:5 – Critério de von Mises: a) no espaço das tensões principais e b) no sub-espaço (σ, τ)

3.2.1.1.2 Critério de escoamento de Rankine

Usualmente referida como a teoria da máxima tensão normal, atribuída a W. J. M. RANKINE (1850), esta teoria estabelece que o escoamento do material ocorre quando a máxima tensão normal, no estado complexo de tensão do material, atinge a tensão de escoamento do material decorrente do ensaio de tração axial. Evidências experimentais apontam que este critério tem apresentado bom comportamento para os materiais frágeis, muito embora tenha sido desenvolvido também para materiais dúcteis. Sua extensão para caracterizar o escoamento em compressão pode ser realizada permutando a “máxima

tensão normal” pela “mínima tensão normal” e “ensaio de tração axial” por “ensaio de compressão axial”.

Graficamente, para que este critério de escoamento não seja violado, é necessário que as duas tensões principais (a máxima e a mínima) se localizem dentro da região interna do quadrilátero da Figura 3:6.

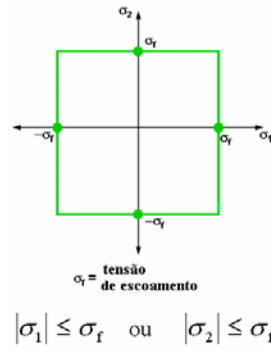


Figura 3:6 – Representação gráfica do critério de escoamento de Rankine

O critério da tensão principal de Rankine descreve a fissuração em tração de materiais como o concreto e a alvenaria, contudo, o estado de tensão em uma estrutura é freqüentemente bi-axial - uma combinação de tração e compressão. Este estado de tensão pode ser modelado através de uma combinação do critério de Rankine para descrever o regime de tração e outro critério, por exemplo von Mises, para descrever o regime de compressão.

O critério de escoamento combinado de Rankine/von Mises é caracterizado através da Equação 3:11, a seguir

$$f_R(\sigma, \kappa_R) = \sigma_1 - f_t(\kappa_R) \quad ; \dot{\kappa}_R = \dot{\epsilon}_1^p$$

$$f_{VM}(\sigma, \kappa_{VM}) = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} - f_c(\kappa_{VM}) \quad ; \dot{\kappa}_{VM} = \sqrt{\frac{2}{3} \left[(\dot{\epsilon}_1^p)^2 + (\dot{\epsilon}_2^p)^2 + (\dot{\epsilon}_3^p)^2 \right]}$$

Equação 3:11

onde σ_1 e σ_2 são as tensões principais, κ_i são as variáveis internas de estado ou deformações plásticas permanentes, $f_t(\kappa_R)$ e $f_c(\kappa_{VM})$ são as resistências à tração e compressão uniaxiais,

ε_i^p são as deformações plásticas principais e o ponto sobre uma variável indica derivação com relação ao tempo.

Graficamente, a superfície de escoamento combinada Rankine/von Mises acha-se representada na Figura 3:7.

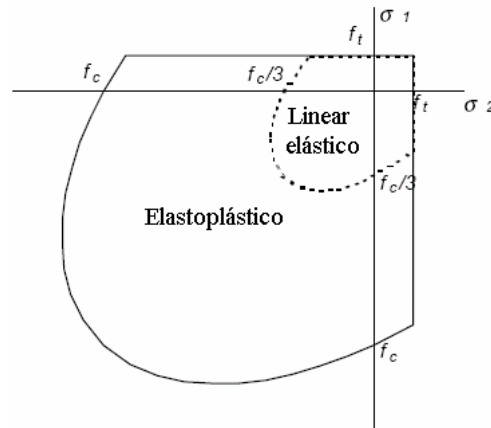


Figura 3:7 – Superfície de escoamento combinada Rankine/von Mises

3.2.1.2 Lei de fluxo

No caso de carregamento plástico, o incremento de deformação plástica, $\{d\varepsilon^p\}$, para um dado estado de tensão, $\{\sigma\}$, pode ser definido através de um potencial plástico, $g = g(\sigma)$, mediante a seguinte condição (Equação 3:12):

$$\{d\varepsilon^p\} = d\lambda \left\{ \frac{\partial g(\sigma)}{\partial \sigma} \right\} \quad \text{Equação 3:12}$$

A observação da Equação 3:12 permite concluir que a direção do incremento da deformação plástica é normal ao potencial plástico e o tamanho desta deformação é definido pelo fator escalar $d\lambda$, que, por sua vez, deve obedecer às seguintes condições:

$$d\lambda = 0 \text{ se } \begin{cases} f < 0 & (\text{carga elástica}) \\ f = 0 & (\text{descarga}) \end{cases} \quad \text{Equação 3:13}$$

$$d\lambda > 0 \text{ se } f = 0 \text{ e } df = 0 \text{ (carga plástica)} \quad \text{Equação 3:14}$$

Estas condições de carga e descarga podem ser sumarizadas conforme se segue:

$$f \leq 0$$

$$d\lambda \geq 0$$

$$fd\lambda = 0$$

Equação 3:15

3.2.2 Plasticidade com endurecimento

Quando o critério de escoamento muda durante o carregamento plástico e as tensões necessárias para se obter o escoamento também crescem, ver Figura 3:3(b), se instala no material o fenômeno conhecido como endurecimento. Quando este fenômeno ocorre, o estado de tensões torna-se dependente do caminho da carga (*path dependent*) e se faz necessário incorporar ao modelo algumas variáveis internas de estado que armazenem informações a respeito dos estados anteriores de tensão e de deformação. A deformação plástica total é utilizada para controlar o comportamento de endurecimento, embora a utilização de um parâmetro especial de endurecimento (κ) seja também freqüente.

De acordo com o nível de carregamento a que o material é submetido e pela ocorrência de carregamento/descarregamento, é possível que o limite de escoamento possa variar: aumentando no caso de “endurecimento” ou diminuindo para o caso de “amolecimento”.

Usualmente, as leis de endurecimento são categorizadas em três classes:

- endurecimento isotrópico;
- endurecimento cinemático;
- endurecimento misto.

3.2.2.1 Endurecimento isotrópico

O endurecimento é dito isotrópico se a evolução da superfície de escoamento é tal que, em qualquer estado de endurecimento, ela corresponde a uma expansão uniforme (isotrópica) da superfície de escoamento inicial, sem translação.

Duas abordagens são particularmente populares na descrição do endurecimento isotrópico e são adequadas para aplicação em uma gama variada de materiais: endurecimento por deformação (*strain hardening*) e endurecimento por trabalho (*work hardening*).

No endurecimento por deformação, a deformação plástica efetiva é escolhida como variável interna associada com o endurecimento isotrópico ao passo que no

endurecimento por trabalho o nível de tensão de escoamento é uma função do trabalho plástico dissipado. Por exemplo, no caso uniaxial, o trabalho total necessário para deformar o material até o ponto P (Figura 3:8) é dado pela área total sob a correspondente curva tensão-deformação. Parte deste trabalho, w^e , é armazenada em forma de energia elástica e é integralmente recuperada na descarga elástica. A área remanescente sob a curva, representa o trabalho plástico, w^p , que corresponde à energia dissipada pelos mecanismos plásticos e não pode ser recuperada.

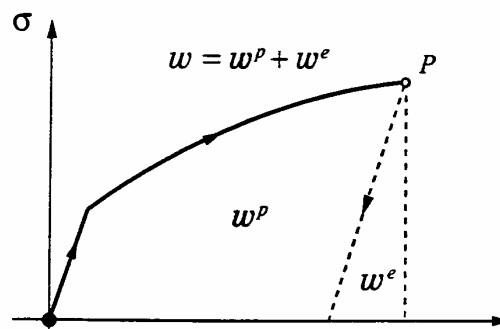


Figura 3:8 – Representação do trabalho plástico

3.2.2.2 Endurecimento cinemático

Quando a superfície de escoamento preserva sua forma e tamanho mas translada no espaço das tensões como um corpo rígido, se manifesta o fenômeno do endurecimento cinemático. Ele é freqüentemente observado em ensaios nos quais, depois de serem carregados (e endurecidos) em uma direção, muitos materiais apresentam uma reduzida resistência ao escoamento plástico em direção oposta. Este comportamento é conhecido como efeito de Bauschinger (LUBLINER, J. , 1990).

3.2.2.3 Endurecimento misto

Consiste numa combinação dos dois tipos de endurecimento anteriormente descritos, no qual a superfície de escoamento pode expandir e transladar simultaneamente no espaço das tensões. Entre outras coisas, a implementação de um endurecimento misto possibilita uma modelagem generalizada do efeito Bauschinger, que é freqüente em carregamentos cíclicos.

3.3 Macro modelos – Modelagem contínua anisotrópica

Tendo em vista que o foco das análises promovidas ao longo deste trabalho é o estudo do comportamento estrutural de paredes de contraventamento dotadas de aberturas através da utilização de macro modelos, desenvolver-se-ão a seguir aspectos relativos à macro-modelagem da alvenaria

De uma maneira geral, em grandes estruturas de alvenaria o comportamento da interação entre as unidades e as juntas de argamassa não determina o comportamento global da estrutura (LOURENÇO P. B. , 1996). Em situações como esta é preferível considerar modelos que possibilitem o estabelecimento de relação entre tensões e deformações médias na alvenaria, de forma a se obter informações globais sobre o mecanismo de sustentação de cargas da estrutura em análise com menor esforço computacional e humano. Por outro lado, devido à pouca disponibilidade de resultados experimentais e também devido à elevada complexidade na formulação do comportamento inelástico e anisotrópico da alvenaria (comportamento pré ou pós-pico), a obtenção e implementação de macro-modelos encerra importantes dificuldades.

A formulação do comportamento dos materiais quasi-frágeis leva em consideração diferentes critérios inelásticos para tração, compressão e corte, conforme se discutirá mais adiante.

Modelo desenvolvido recentemente (ROTS, 1993, LOURENÇO e ROTS, 1993, LOURENÇO et al. , 1994) combina as vantagens dos modernos conceitos da plasticidade com uma poderosa representação do comportamento anisotrópico do material, que inclui os fenômenos de endurecimento/amolecimento ao longo de cada eixo do material. O modelo inclui uma combinação de uma superfície de escoamento do tipo Rankine para tração e uma superfície de escoamento do tipo Hill para compressão.

Em termos do espaço de tensões principais o critério de escoamento de Rankine é expresso da seguinte maneira (FEENSTRA e DE BORST, 1995), Figura 3:9, parte superior esquerda:

$$\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \sqrt{\left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \right|^2 + \tau_{12}^2} = 0 \quad \text{Equação 3:16}$$

O comportamento não linear consiste em amolecimento exponencial à tração nas duas direções, com diferentes energias de fraturas para cada valor de escoamento.

A mais simples superfície de escoamento do tipo Hill, que apresenta diferentes resistências à compressão ao longo dos eixos dos materiais é dada pela Equação 3:17, no espaço das tensões principais, Figura 3:9, parte inferior esquerda:

$$A\sigma_1^2 + B\sigma_1\sigma_2 + C\sigma_2^2 + D\tau_{12}^2 = 1$$

Equação 3:17

onde A, B, C e D são quatro parâmetros tais que $B^2 - 4AC < 0$, de forma a assegurar convexidade, e podem ser deduzidos diretamente das propriedades da alvenaria (LOURENÇO, 1996).

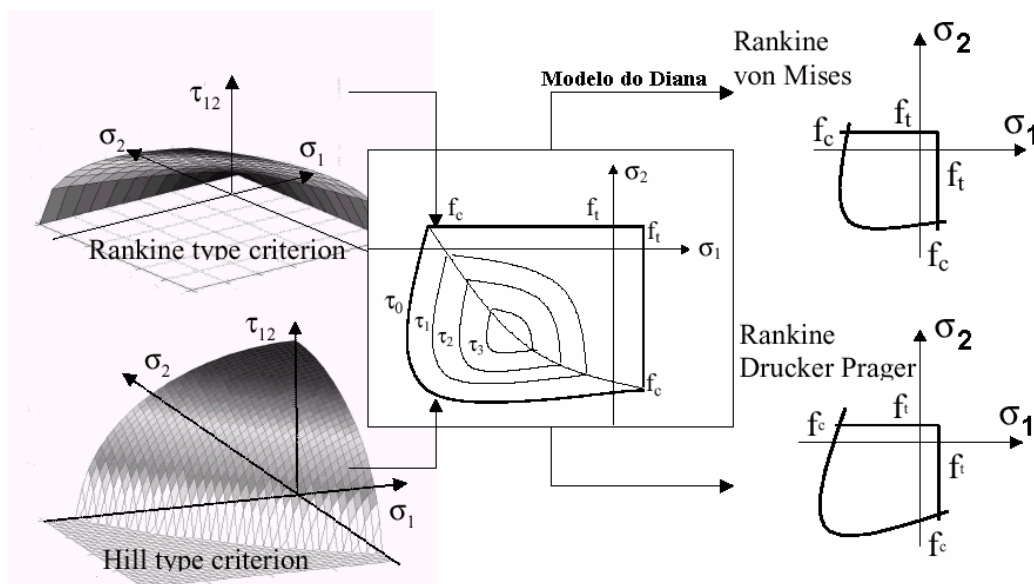


Figura 3:9 - Superfícies de escoamento Rankine e Hill para o compósito alvenaria (DAIANA, 1999)

Os diferentes comportamentos da alvenaria à tração e compressão uniaxial ao longo de duas direções ortogonais são mostrados na Figura 3:10, a seguir:

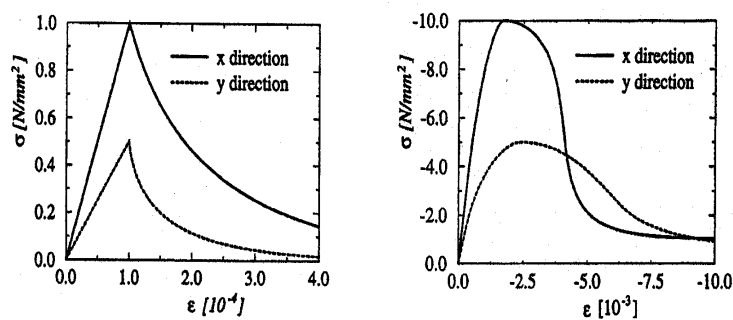


Figura 3:10 - Comportamento da alvenaria em tração uniaxial (esquerda) e compressão uniaxial (direita) ao longo de duas direções ortogonais [de acordo com (TC MMM N9, 2000: RILEM Technical Committee, Mechanical Modeling of Masonry)]

A vantagem deste modelo é a extensão anisotrópica do comportamento do material. O comportamento combinado anisotrópico do material é descrito no regime elástico, plástico e em pós-pico e sua aplicação conduz a excelentes resultados tanto em termos da carga de colapso quanto em termos de reprodução do comportamento da alvenaria.

3.3.1 Alvenaria em compressão

Para a alvenaria em compressão acham-se disponíveis diferentes modelos para o comportamento pós-pico que modelam o esmagamento da alvenaria. Particularmente, os modelos contemplados no *Diana* acham-se indicados na Figura 3:11 a seguir.

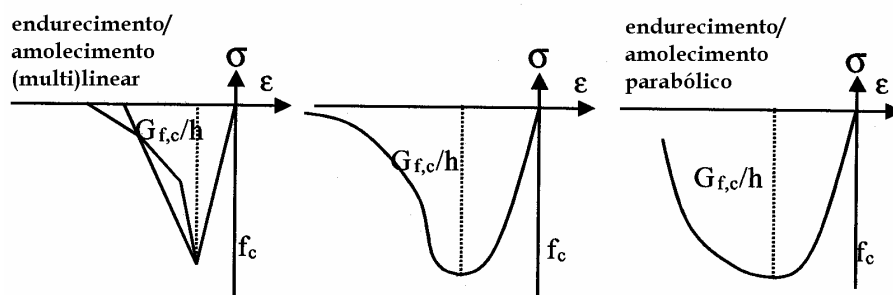


Figura 3:11 - Diferentes possibilidades para a modelagem da alvenaria em compressão (DIANA, 1999)

3.3.2 Alvenaria em tração

Para a alvenaria em tração, os critérios disponíveis no *Diana* acham-se representados na Figura 3:12, a seguir.

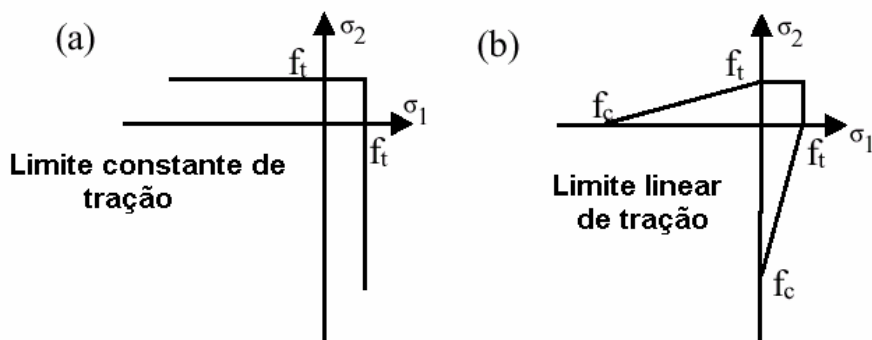


Figura 3:12 - Diferentes possibilidades para a modelagem da alvenaria à tração – Constante e Linear (DIANA, 1999)

Do ponto de vista experimental, nenhum deles é perfeito para a modelagem da alvenaria (PAGE, 1981, 1983; LOURENÇO, 1996) e considerando que é extremamente difícil se obter resultados experimentais na área de ensaios em estado biaxial de tração-compressão e levando-se em conta, ainda, que os resultados disponíveis na literatura apresentam elevada variabilidade, torna-se difícil a tarefa de eleger um modelo preferencial para a representação da alvenaria em tração (PAGE, 1981, 1983).

No que respeita ao comportamento pós-pico, diferentes possibilidades acham-se disponíveis, Figura 3:13 a seguir.

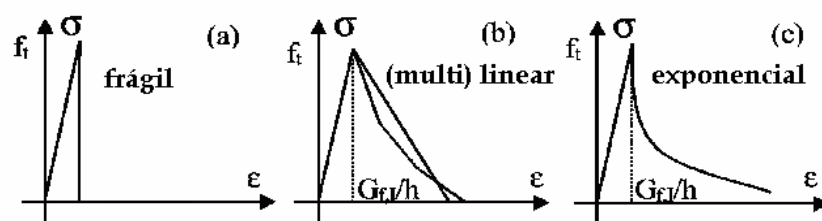


Figura 3:13 - Alvenaria em tração - comportamento pós-pico (Diana, 1999)

Extensivas pesquisas desenvolvidas na alvenaria em regime da tração (VAN DER PLUIJM, 1999) mostram que o comportamento exponencial simula bem o comportamento real da alvenaria.

3.3.3 Propriedades dos materiais

O modelo para estado plano de tensões Rankine-Hill, conforme descrito anteriormente, contempla um amolecimento no regime de tração (Rankine) e endurecimento, com subsequente amolecimento no regime compressivo (Hill) e tem larga aplicação em alvenaria. Para a completa caracterização da superfície de escoamento deste modelo são necessários os seguintes parâmetros.

- f_{tx} = resistência à tração da alvenaria na direção x ;
- f_{ty} = resistência à tração da alvenaria na direção y ;
- f_{cx} = resistência à compressão da alvenaria na direção x ;
- f_{cy} = resistência à compressão da alvenaria na direção y ;
- α = fator que determina a contribuição da tensão de cisalhamento na ruptura por tração;

- β = fator de acoplamento das tensões normais de compressão;
- γ = fator que controla a contribuição da tensão de cisalhamento na ruptura por compressão;
- G_{ftx} = energia de fratura à tração (Rankine) na direção x ;
- G_{fty} = energia de fratura à tração (Rankine) na direção y ;
- G_{fcx} = energia de fratura à compressão (Hill) na direção x ;
- G_{fcy} = energia de fratura à compressão (Hill) na direção y ;
- k_{ap} = deformação plástica equivalente corresponde ao pico de tensão de compressão;
- E = módulo de elasticidade;
- ν = coeficiente de Poisson.

O modelo tem sete parâmetros de resistência (f_{tx} , f_{ty} , f_{mx} , f_{my} , α , β e γ) e cinco parâmetros inelásticos (G_{fx} , G_{fy} , G_{fcx} , G_{fcy} e κ_p). O primeiro grupo de quatro parâmetros são as resistências à tração e compressão ao longo dos eixos do material, que são obtidas a partir de ensaios experimentais, conforme indicado na Figura 3:14. Usualmente estes ensaios são realizados em condições de controle de deslocamento a fim de que sejam obtidas as propriedades inelásticas que definem o modelo, especialmente as quatro energias de fratura e a deformação de pico na compressão.

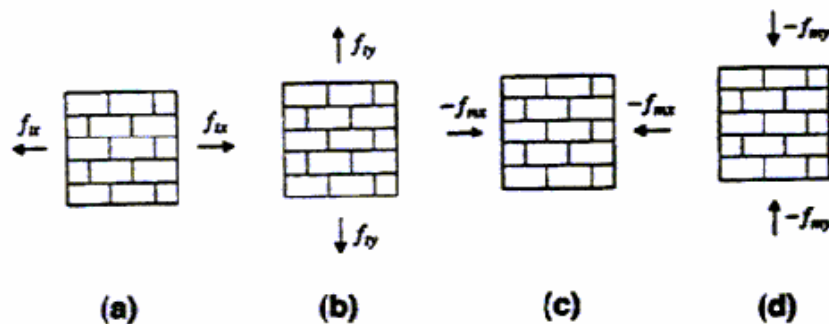


Figura 3:14 - Ensaios utilizados para determinação das propriedades dos materiais

Os valores de α , β e γ podem ser obtidos através de ensaios específicos em condições de solicitação biaxial conforme indicam três possibilidades contempladas na Figura 3:15.

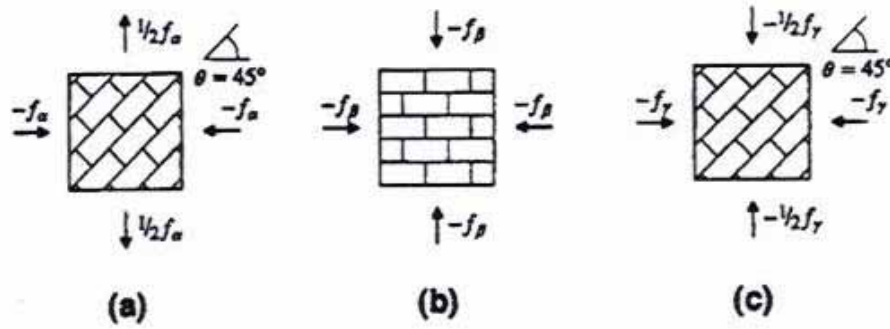


Figura 3:15 – Ensaio não padronizados para obtenção de α (a), β (b) e γ (c)

Com estes ensaios, os parâmetros α , β e γ são obtidos a partir das seguintes expressões:

$$\alpha = \frac{1}{9} \left(1 + 4 \frac{f_{tx}}{f_a} \right) \left(1 + 4 \frac{f_{ty}}{f_a} \right)$$

$$\beta = \left[\frac{1}{f_\beta^2} - \frac{1}{f_{mx}^2} - \frac{1}{f_{my}^2} \right] f_{mx} f_{my}$$

Equação 3:18

$$\gamma = \left[\frac{16}{f_\gamma^2} - 9 \left(\frac{1}{f_{mx}^2} + \frac{\beta}{f_{mx} f_{my}} + \frac{1}{f_{my}^2} \right) \right] f_{mx} f_{my}$$

Deve-se ressaltar que é necessário um elevado número de ensaios afim de que o critério de plastificação possa ser adequadamente determinado mediante recurso ao método dos mínimos quadrados, como sugere o autor.

Devido às dificuldades de realização dos ensaios para obtenção destes parâmetros e considerando os estudos já realizados por LOURENÇO (1996) podem ser adotados os seguintes valores: $\alpha = 1.0$; $\beta = -1.0$ e $\gamma = 3.0$.

3.3.4 Aspectos relativos ao fenômeno do amolecimento

O amolecimento é uma diminuição gradual da resistência mecânica sob um aumento contínuo de deformação aplicado à estrutura. Trata-se de uma importante característica dos materiais *quasi-frágeis*, tais como alvenarias, argamassas, materiais cerâmicos, rochas ou concreto e que apresentam ruptura devido a um progressivo processo interno de fissuração, normalmente atribuído à heterogeneidade do material. As

Figura 3:16 e Figura 3:17 a seguir mostram características da curva tensão-deslocamento para materiais *quasi-frágeis* sob tração, compressão e corte, onde se admite que tanto o comportamento inelástico a tração quanto a compressão possa ser descrito pela integral da curva $\sigma\delta$, cujas quantidades, chamadas de energia de fratura G_f à tração e energia de fratura a compressão G_c , são propriedades dos materiais (LOURENÇO, 1996).

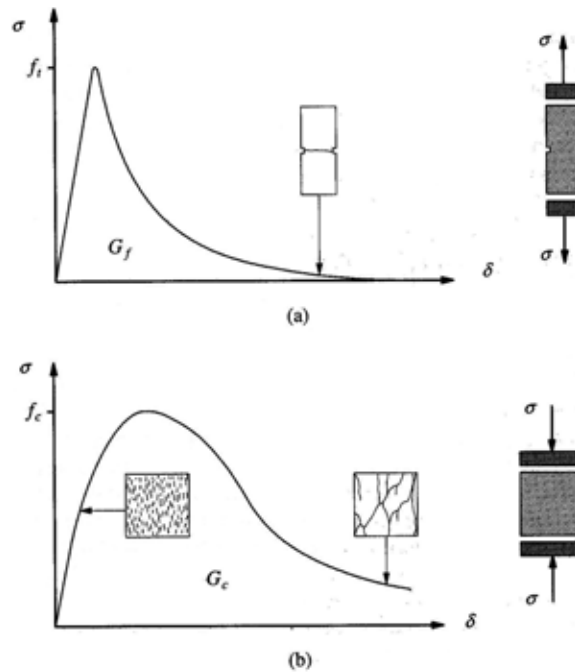


Figura 3:16 - Comportamento típico de materiais *quasi-frágeis* sobre carregamento uniaxial e definição da energia de fratura: (a) carregamento de tração (f_t indica a resistência a tração); (b) carregamento compressivo (f_c indica a resistência a compressão) (LOURENÇO, 1996)

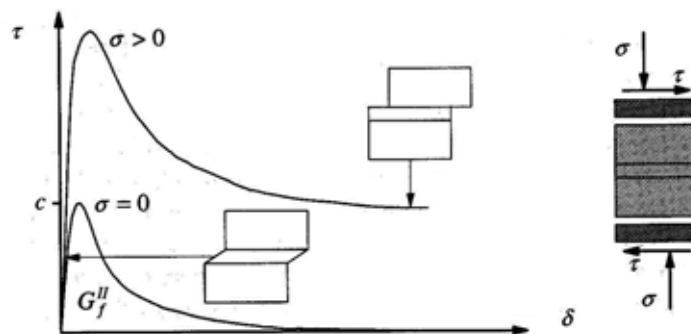


Figura 3:17 - Comportamento da alvenaria em corte e definição da energia de fratura do modo II G_{fII} (c indica a coesão) (Lourenço, 1996)

Em geral, as ligações entre as unidades e a argamassa se constituem os planos mais fracos numa estrutura de alvenaria. A resposta não linear das juntas, que é controlada pela interface unidade-argamassa, é uma das mais relevantes características do comportamento da alvenaria. Nesta interface ocorrem dois fenômenos, um associado com

a ruptura por tração (Modo I) e outro associado com a ruptura por cisalhamento (Modo II).

A Figura 3:18 a seguir mostra detalhes de ensaios com controle de deformação realizados por VAN DER PLUIJM (1992) em unidades sólidas de argila e cálcio-silicato. Os resultados obtidos indicaram uma curva exponencial de amolecimento a tração com um modo I de ruptura com energia de fratura G_{fI} , que é definida como a quantidade de energia necessária para criar uma área unitária de uma fissura ao longo da interface unidade-argamassa.

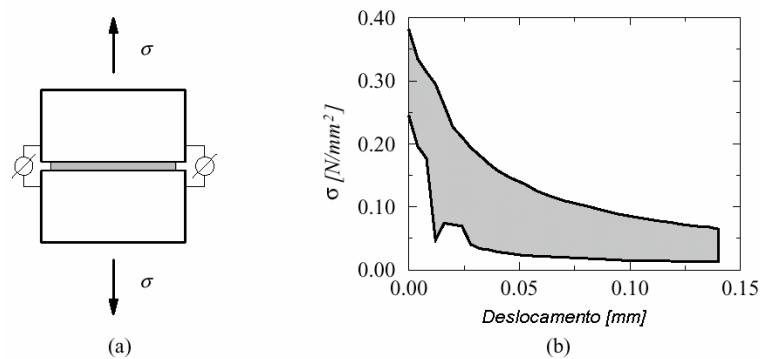


Figura 3:18 - Comportamento da alvenaria à tração de contato, Van de Pluijm: (a) corpo de prova; (b) típicos resultados experimentais de deslocamento tensão-fissura para alvenaria de blocos sólidos de argila (a área hachurada representa a envoltória de três testes)

A Figura 3:19 a seguir mostra os resultados de testes realizados (VAN DER PLUIJM, 1993) que indicam uma curva exponencial de amolecimento por corte com um nível residual de atrito seco. A área definida pela curva $\sigma - \delta$ e o nível residual de atrito seco formam o modo II de ruptura com energia de fratura G_{fII} .

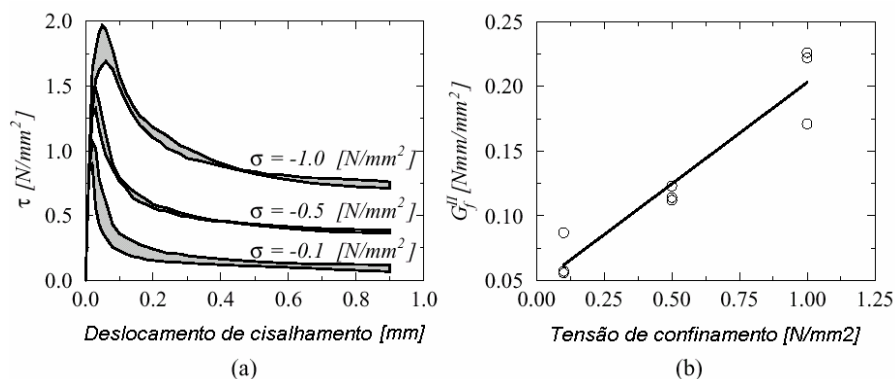


Figura 3:19 - Comportamento da alvenaria à corte de contato das juntas de unidades sólidas de argila, VAN DER PLUIJM (1993): (a) curva tensão-deslocamento para diferentes níveis de tensão normal (a área hachurada representa a envoltória de três ensaios); (b) energia do modo de fratura I G_{fII} como função do nível de tensão normal (LOURENÇO, 1996)

3.4 Método dos elementos finitos e solução do sistema de equações não lineares

O método dos elementos finitos (MEF) foi utilizado para a modelar o comportamento das paredes de contraventamento a serem analisadas ao longo do presente trabalho. A formulação teórica deste método já se encontra bem difundida e documentada (BATH, K. J. , 1995 e ZIENKIEWICZ, O. C. ,1986) e não será aqui apresentada.

Breves considerações sobre esta a formulação serão expostas a fim de introduzir algumas notações essenciais ao entendimento das estratégias adotadas. Adicionalmente, serão discutidos os aspectos relativos à formulação teórica dos tipos de elementos utilizados nas análises numéricas realizadas e à solução numérica de sistemas de equações não lineares envolvidos.

3.4.1 O Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos é um método robusto e eficiente para a obtenção de uma solução numérica aproximada para um dado modelo matemático de uma estrutura. Neste método, o domínio da solução de volume V é subdividido em um número finito de elementos de volume V_e interconectados pelos pontos nodais localizados no contorno destes elementos. Esta subdivisão do domínio da solução é usualmente referida como discretização e dela resulta um sistema de equações lineares ou não lineares que descreve o equilíbrio da global da estrutura. Este sistema deve ser resolvido para se obter as variáveis primárias do problema em exame que, no caso da análise estrutural, são os deslocamentos nodais.

A maneira mais simples de representar as equações de equilíbrio de uma estrutura é através da aplicação do princípio dos trabalhos virtuais. Este princípio estabelece que uma estrutura está em equilíbrio sob a ação de determinado carregamento se, para qualquer deslocamento virtual compatível com as condições de vínculo da estrutura, o trabalho virtual das forças externas é igual à energia de deformação virtual. Este princípio pode ser representado pela Equação 3:19.

$$\int_V \delta \epsilon^T \sigma dV = \int_V \delta u^T b dV + \int_{S_t} \delta u^T t dS_t \quad \text{Equação 3:19}$$

onde $\delta \epsilon$ são as deformações virtuais que correspondem aos deslocamentos virtuais δu , b e t são as forças de volume e cargas de superfície que atuam em V e em S_i , respectivamente.

Os deslocamentos num ponto particular (x, y, z) são supostos serem funções contínuas (u_c) expressas em termos das variáveis nodais discretas ($\bar{u}$), aproximadas pela seguinte expressão:

$$u_c(x, y, z) \approx \bar{u}(x, y, z) = \mathbf{N}(x, y, z)\mathbf{u} \quad \text{Equação 3:20}$$

onde $\mathbf{N}$ é a matriz de interpolação dos deslocamentos e $\mathbf{u}$ é o vetor de variáveis nodais. A matriz de interpolação $\mathbf{N}$ contém as funções de forma em termos das variáveis independentes, tais como coordenadas, por exemplo, e são localmente definidas para os elementos individuais.

As deformações em qualquer ponto da estrutura podem ser determinadas por

$$\epsilon = \mathbf{L}\mathbf{u} \quad \text{Equação 3:21}$$

onde $\mathbf{L}$ é um operador diferencial definindo um campo de deformações compatíveis. Agora, o campo de deformações pode ser escrito com as derivadas do vetor $\mathbf{u}$ com se segue:

$$\epsilon = \mathbf{L} \bar{u} = \mathbf{L}\mathbf{N}\mathbf{u} = \mathbf{B}\mathbf{u} \quad \text{Equação 3:22}$$

onde a matriz $\mathbf{B}$ define a relação deformação-deslocamento para um determinado ponto e é chamada matriz diferencial. Assumindo um comportamento elástico-linear, a relação tensão-deformação em um determinado ponto pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\sigma = \mathbf{D}(\epsilon - \epsilon_0) + \sigma_0 \quad \text{Equação 3:23}$$

onde $\mathbf{D}$ é a matriz constitutiva que é função das propriedades elásticas dos materiais, tais como o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν). O vetor ϵ_0 denota as deformações iniciais e o vetor σ_0 contém as tensões residuais iniciais.

Substituindo a Equação 3:20 e a Equação 3:22 na Equação 3:19 chega-se a:

$$\delta \mathbf{u}^T \int_V \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \delta \mathbf{u}^T \left(\int_V \mathbf{N}^T \mathbf{b} dV + \int_{S_t} \mathbf{N}^T \mathbf{t} dS_t \right) = \delta \mathbf{u}^T \mathbf{r} \quad \text{Equação 3:24}$$

onde $\mathbf{r}$ é o vetor de forças internas correspondentes ao vetor dos graus de liberdade nodais $\mathbf{u}$. O princípio dos trabalhos virtuais estabelece que a Equação 3:24 deve ser satisfeita para qualquer $\mathbf{u}$ de forma que

$$\int_V \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \mathbf{r} \quad \text{Equação 3:25}$$

Estas equações não garantem que o equilíbrio seja satisfeito em qualquer ponto, mas asseguram o equilíbrio de forma média. Substituindo a Equação 3:23 e a Equação 3:22, o termo do lado esquerdo da Equação 3:25 pode ser escrito como

$$\int_V \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \left(\int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV \right) \mathbf{u} - \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\epsilon}_0 dV + \int_V \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}_0 dV = \mathbf{r} \quad \text{Equação 3:26}$$

Combinando a expressão para $\mathbf{r}$ na Equação 3:24 com a Equação 3:26 obtém-se

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{f} \quad \text{Equação 3:27}$$

onde

$$\mathbf{K} = \int_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV \quad \text{Equação 3:28}$$

é a matriz de rigidez, $\mathbf{u}$ é o vetor de deslocamentos nodais e $\mathbf{f}$ é o vetor de ações nodais consistentes.

Como o corpo foi discretizado em um número n_e de elementos, a Equação 3:19 pode ser reescrita como sendo o somatório do trabalho virtual realizado pelos elementos individuais de volume V_e de contorno S_e como se segue

$$\sum_{e=1}^{n_e} \int_{V_e} \delta \boldsymbol{\epsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \sum_{e=1}^{n_e} \int_{V_e} \delta \mathbf{u}^T \mathbf{b}_e dV + \sum_{e=1}^{n_e} \int_{S_e} \delta \mathbf{u}^T \mathbf{t}_e dS \quad \text{Equação 3:29}$$

3.4.2 Elemento finito bi-dimensional

O elemento identificado como Q8MEM (DIANA, 1999) com uma formulação isoparamétrica foi utilizado para a discretização do meio contínuo. Trata-se um elemento apropriado para problemas de estado plano de tensões com dois graus de liberdade por nó, baseado numa interpolação linear e integração de Gauss. A Figura 3:20 mostra sua representação geral.

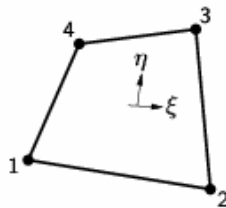


Figura 3:20 - Elemento para estado plano de tensões - Q8MEM

Os polinômios para os deslocamentos u_x e u_y são expressos a partir da seguinte equação:

$$u_i(\xi, \eta) = a_0 + a_1\xi + a_2\eta + a_3\xi\eta \quad \text{Equação 3:30}$$

Tipicamente, este polinômio leva a uma deformação $\varepsilon_{\xi\xi}$ que é constante na direção ξ e varia linearmente na direção η e uma deformação $\varepsilon_{\eta\eta}$ que é constante na direção η e varia linearmente em ξ . Através da opção por uma integração seletiva reduzida pode-se aplicar uma condição de cisalhamento constante, que conduz a uma deformação por cisalhamento $\gamma_{\xi\eta}$ constante sobre toda a área do elemento, aspecto que aprimora seu comportamento à flexão.

Na integração seletiva ou reduzida, as deformações de cisalhamento e/ou as deformações volumétricas são avaliadas exclusivamente no ponto médio do elemento, conduzindo a um operador modificado de deformação $\bar{\mathbf{B}}$, sem nenhum grau de liberdade adicional envolvido (NAGTEGAAL et al. , 1974 e HUGHES, 1987)

Para um elemento finito padrão em termos de deslocamentos, a definição da deformação em análises geometricamente lineares pelo Método dos Elementos Finitos é escrita da seguinte maneira:

$$\varepsilon = \mathbf{B} \mathbf{u} \quad \text{Equação 3:31}$$

A matriz $\mathbf{B}$ relaciona as deformações com os deslocamentos nodais e contém as derivadas das funções de interpolação. A idéia chave da aproximação $\bar{\mathbf{B}}$ é substituir o operador de deformações compatíveis $\mathbf{B}$ por um operador $\bar{\mathbf{B}}$, de modo que as propriedades do elemento passam a ser definidas pelas seguintes expressões:

$$\mathbf{K} = \int_V \bar{\mathbf{B}}^T \mathbf{D} \bar{\mathbf{B}} dV \quad \text{matriz de rigidez} \quad \text{Equação 3:32}$$

$$\mathbf{f}_{\text{int}} = \int_V \bar{\mathbf{B}}^T \boldsymbol{\sigma} dV \quad \text{forças internas no elemento} \quad \text{Equação 3:33}$$

Para o caso do estado plano de tensões, o operador padrão $\mathbf{B}$ que é escrito da seguinte maneira:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{B}_2 & \mathbf{B}_1 \end{bmatrix}$$

na qual $\mathbf{B}_1 = \partial \mathbf{N} / \partial x$, $\mathbf{B}_2 = \partial \mathbf{N} / \partial y$ e $\mathbf{N}$ contém as funções de interpolação.

Este operador padrão $\mathbf{B}$ é substituído pelo operador $\bar{\mathbf{B}}$ a seguir

$$\bar{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{B}_2 \\ \mathbf{B}_2^0 & \mathbf{B}_1^0 \end{bmatrix}$$

onde $\mathbf{B}_i^0$ sendo avaliado no ponto médio do elemento. O elemento assim resultante possui deformações por cisalhamento constantes e é superior ao elemento padrão em problemas que envolvam flexão.

3.4.3 Solução do sistema de equações não lineares

Ao se lidar com sistemas de equações não lineares o principal inconveniente é que a solução não é possível de encontrar diretamente. Some-se a isto o fato de que é possível que não haja solução para um determinado tipo de problema ou mesmo que existam várias soluções para um mesmo sistema. Estes empecilhos são resolvidos através da busca de soluções aproximadas através da combinação de métodos incrementais e iterativos.

O método incremental ou método de Euler consiste em dividir o vetor de forças $\mathbf{f}$ em vários incrementos sucessivos de carga $\Delta \mathbf{f}$ e admitir que a estrutura se comporta linearmente, ou quase, ao aplicar cada um destes incrementos, de forma que são resolvidas uma série de equações do tipo

$$\mathbf{K}_{t,i} \Delta \mathbf{u}_i = \Delta \mathbf{f}_i \quad \text{Equação 3:34}$$

onde i é um contador para os incrementos de carga e $\mathbf{K}_t$ é a matriz de rigidez tangente, obtida com base no estado da estrutura ao final do incremento $i-1$.

A configuração deformada em cada incremento de carga é calculada pela seguinte expressão

$$u_i = u_{i-1} + \Delta u_i = \sum_{j=1}^i \Delta u_j \quad \text{Equação 3:35}$$

A principal desvantagem do método incremental é que o erro vai se acumulando a cada passo de carga, especialmente se estes não forem suficientemente pequenos, conforme pode ser observado na Figura 3:21, para um sistema de uma única variável.

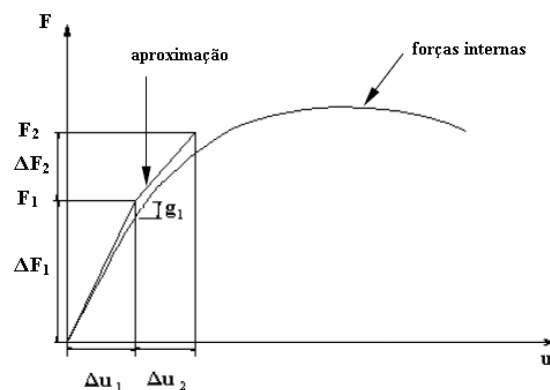


Figura 3:21 – Método incremental

Esta desvantagem pode ser superada adotando-se um método iterativo para obter uma melhor aproximação da solução em cada incremento de carga, sem que estes incrementos tenham que ser demasiadamente pequenos. Na Figura 3:21 pode-se observar

que ao se aplicar o primeiro incremento de carga ΔF_1 resulta num desequilíbrio g_1 entre a força externa ΔF_1 e a força interna associada ao deslocamento incremental Δu_1 .

Admitindo-se que tenha sido obtida uma aproximação suficiente boa para a configuração de equilíbrio após o incremento ΔF_{i-1} , se aplica, na seqüência, o incremento ΔF_i e através da Equação 3:34 se calcula uma aproximação para o incremento nos deslocamentos Δu_i . O vetor de forças de desequilíbrio é definido da seguinte maneira

$$g_i = \Delta f_i - \Delta f_{int}(\Delta u_i) \quad \text{Equação 3:36}$$

A finalidade do processo iterativo é encontrar uma correção, ou uma série de correções, ao vetor Δu_i de forma que as forças de desequilíbrio se reduzem a zero ou a quase zero. Uma maneira de implementar esta tarefa é calcular uma nova matriz de rigidez tangente e aplicar como forças externas as forças de desequilíbrio

$$K_t^j \delta u^j = g^{j-1} \quad \text{Equação 3:37}$$

O índice foi suprimido porque desta vez se está trabalhando sobre um mesmo incremento de carga. Na Equação 3:37 o índice superior j consiste no contador da iteração, δu^j representa a correção ao vetor Δu que se converte em

$$\Delta u^j = \Delta u^{j-1} + \delta u^j \quad \text{Equação 3:38}$$

De posse deste vetor corrigido, aplica-se de novo a Equação 3:36, a Equação 3:37 e a Equação 3:38 até que seja atingida a convergência estabelecida como apropriada. A seguir serão discutidos aspectos relativos aos critérios de convergência usualmente utilizados.

O procedimento acima descrito é conhecido como Método de Newton-Raphson que se acha graficamente representado na Figura 3:22 para o caso de uma variável.

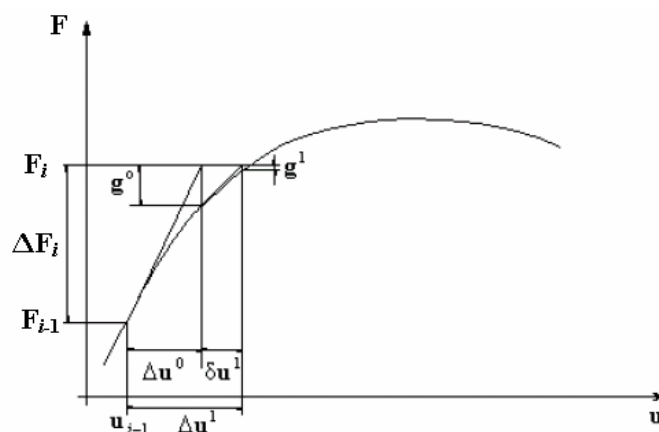


Figura 3:22 – Método de Newton-Raphson

O método de Newton-Raphson conduz a uma convergência quadrática, o que significa dizer que o método converge para a solução final em poucas iterações. Uma desvantagem, entretanto, reside no fato de que a matriz de rigidez tangente tem que ser avaliada em cada iteração, aspecto que consome tanto mais tempo quanto maior for o número de graus de liberdade do problema em análise. Além do mais, a convergência quadrática só é assegurada se a matriz de rigidez correta for utilizada e se a previsão estiver na vizinhança da solução final, caso contrário o método facilmente diverge.

Há várias possibilidades de se evitar este inconveniente e uma delas é a utilização continuada da mesma matriz de rigidez tangente, que desta forma só é invertida uma só vez, em todas as iterações necessárias para se alcançar a convergência. Este procedimento é conhecido como método de Newton-Raphson modificado (Figura 3:23). Outra modalidade deste método é o emprego, para toda a análise, da matriz de rigidez que se obtém inicialmente com as propriedades mecânicas e geométricas originais da estrutura. Com este procedimento a convergência é relativamente mais lenta entretanto a construção e inversão da matriz são realizadas uma única vez em todo o processo. Adicionalmente, se garante assim que a matriz seja positiva, definida e simétrica. Quando se utilizam na modelagem de estruturas de alvenaria elementos de interface com diferentes valores do ângulo de atrito, as matrizes são em geral assimétricas, de forma que a utilização desta abordagem se mostra especialmente útil, principalmente quando não se dispõe de rotinas para resolver sistemas de equações assimétricos ou não se deseja utilizá-las pela sua baixa eficiência quando comparadas com as rotinas para solução de problemas simétricos.

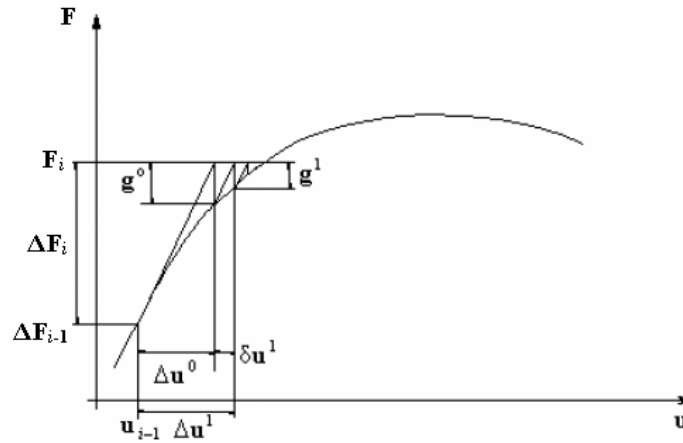


Figura 3:23 – Método de Newton-Raphson modificado

3.4.3.1 Critério de convergência

Qualquer que seja o método iterativo empregado faz-se necessário o estabelecimento de critérios de convergência que permitam a obtenção da solução desejada com uma precisão julgada apropriada ao problema em estudo.

Os critérios habitualmente adotados são baseados em diferentes normas Euclidianas e podem ser incluídos numa das três categorias seguintes: a) critérios baseados em deslocamentos, b) critérios baseados em forças e c) critérios baseados em conceitos de energia.

Nos critérios de convergência formulados em termos de deslocamentos se compara a norma do incremento nos deslocamentos na última iteração com a norma do incremento nos deslocamentos no passo de carga, mediante a seguinte relação

$$\epsilon_u = \left\| \frac{\delta u^i}{\Delta u^0} \right\| \quad \text{Equação 3:39}$$

e o processo iterativo é interrompido quando ϵ_u for menor do que a tolerância estabelecida.

De maneira análoga, os critérios de convergência formulados em termo de forças são implementados mediante a relação entre a norma do vetor de forças de desequilíbrio na última iteração e a norma do vetor de forças de desequilíbrio inicial, como se segue

$$\epsilon_F = \left\| \frac{\mathbf{g}^i}{\mathbf{g}^0} \right\|$$

Equação 3:40

Finalmente, os critérios de convergência formulados em termos energéticos são estabelecidos através da relação entre a energia interna requerida na última iteração e a energia interna requerida na primeira, em valor absoluto;

$$\epsilon_E = \left| \frac{\Delta E^0}{\Delta E^1} \right| = \left| \left(\frac{\delta u^i (F_{\text{int}}^{i+1} + F_{\text{int}}^i)}{\Delta u^0 (F_{\text{int}}^1 + F_{\text{int}}^0)} \right) \right|$$

Equação 3:41

Este critério parece ser o mais atrativo dos três, já que leva em conta, de maneira simultânea, o efeito dos deslocamentos e das forças.

A eleição de um critério de convergência a adotar bem como a indicação de que valores considerar para os critérios anteriormente mencionados se constitui uma tarefa de grande dificuldade e não se acham disponíveis na literatura recomendações específicas para tal ou, quando estas são disponíveis, apresentam um caráter muito geral. Recomendações de se assegurar que os denominadores dos critérios apresentados não sejam demasiadamente pequenos (perto de zero), de que quando se tiver um comportamento de amolecimento se devem utilizar valores menores do que aqueles utilizados quando se tem comportamento de endurecimento são exemplos da generalidade das recomendações disponíveis.

Sem prejuízo do exposto acima e em problemas de natureza estrutural, tolerâncias de 10^{-3} , para critérios baseados em deslocamento, e 10^{-4} para critérios baseados em força ou energia, conduzem a resultados confiáveis.

3.4.3.2 Técnicas adicionais

Uma severa limitação dos processos iterativos descritos anteriormente é que não são globalmente convergentes, ou seja convergentes para alguma solução do sistema de equações não lineares a partir de praticamente qualquer solução inicial.

Em problemas estruturais, a técnica mais utilizada para prosseguir de uma estimativa de solução exterior ao raio de convergência do método de Newton-Raphson é a técnica da busca linear. Esta técnica consiste em calcular uma primeira aproximação do incremento dos deslocamentos $\delta \mathbf{u}^1$ e escrever o vetor de deslocamentos como se segue

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{u}_{i-1} + \eta \delta \mathbf{u}^1$$

Equação 3:42

O tamanho ótimo do incremento de carga é governado pelo parâmetro η (fator da busca linear), que é determinado a partir da minimização da energia potencial, ou seja encontra-se o tamanho ótimo para a direção definida a partir da matriz de rigidez que se está utilizando.

Em problemas estruturais, o algoritmo de busca linear associado com o método iterativo de Newton-Raphson possibilita a obtenção de um processo de solução globalmente convergente.

Outra técnica utilizada para controlar o processo de carga em análises não lineares é a técnica do comprimento do arco (*arc-length control*). Esta técnica é bastante útil nos casos em que a sucessão de configurações deformadas se apresentam com níveis de carga que não são monotonamente crescente (Figura 3:24 a)) ou quando se deseja reduzir tanto o nível de carga quanto o nível de deslocamento para seguir a trajetória das configurações de equilíbrio (Figura 3:24 b)).

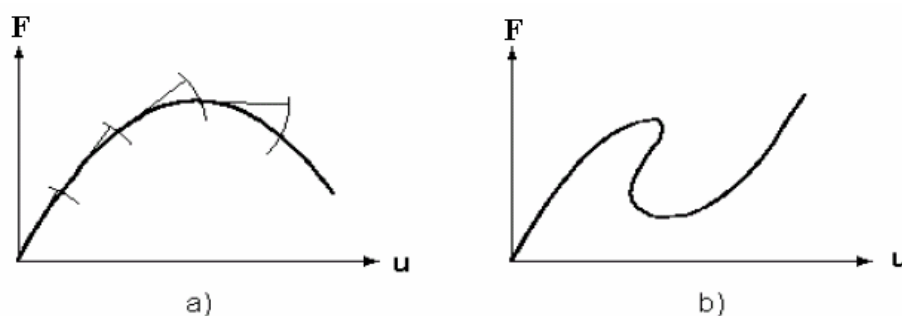


Figura 3:24 – Técnica do comprimento do arco: a) trajetória de carga ascendente-descendente (snap-through); b) trajetória da carga com retorno (snap-back)

Em qualquer destes casos, as técnicas discutidas anteriormente, baseadas em controle de cargas, permitem exclusivamente o atingimento da carga máxima, em cuja vizinhança um pequeno incremento de carga gera deslocamentos demasiadamente grandes. A técnica do controle do arco permite a solução deste problema introduzindo uma restrição ao sistema para impedir que se produzam estes grandes deslocamentos, permitido que o incremento de carga seja variável e o vetor de forças de desequilíbrio (Equação 3:36) seja expresso da seguinte forma

$$\mathbf{g}_i = \Delta \lambda_i \mathbf{F} - \mathbf{f}_{\text{int}}(\Delta \mathbf{u}_i)$$

Equação 3:43

onde λ é uma nova variável que controla o nível de carga e $\mathbf{F}$ é um vetor que estabelece a distribuição de carga. A restrição consiste em estabelecer o tamanho da norma quadrada do incremento a , no espaço definido por $\mathbf{u}$ e λ .

$$a^2 = \Delta \mathbf{u}^T \Delta \mathbf{u} + \Delta \lambda^2 \Psi^2 \mathbf{F}^T \mathbf{F}$$

Equação 3:44

onde Ψ é um fator de escala entre λ e $\mathbf{u}$.

Esta restrição se incorpora ao sistema definido pela Equação 3:37 e mediante linearização e pode ser expressa da seguinte maneira

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_t^j & -\mathbf{F} \\ -2\Delta \mathbf{u}^{T,j-1} & -2\Delta \lambda^{j-1} \Psi^2 \mathbf{F}^T \mathbf{F} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \mathbf{u}^j \\ \delta \lambda^j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}^{j-1} \\ a^{j-1} \end{bmatrix}$$

Equação 3:45

Com esta equação se calculam tanto a mudança no vetor de deslocamentos quanto no parâmetro λ na iteração j .

3.5 Modelo de Rankine/von Mises : Características e Validação

Não obstante a habilidade do modelo ortotrópico para estado plano de tensões, descrito anteriormente, para a representação do comportamento da alvenaria, a indisponibilidade dos parâmetros necessários à caracterização da superfície de escoamento do modelo impossibilitou sua utilização nas análises numéricas realizadas.

Assim, o critério de plastificação ou ruptura utilizado para modelar o comportamento da alvenaria (como um contínuo) foi o critério combinado de Rankine/von Mises, que incorpora um modelo de fissuras espalhadas em tração e um modelo de plasticidade em compressão. Esta combinação de critérios de escoamento, especialmente aplicável a problemas de estado plano de tensões, é tratada como um modelo de plasticidade multi-superfície.

Deve ser ressaltado que o critério de von Mises é dificilmente aceitável como um critério de falha para materiais com atrito submetidos a estados de tensão tridimensional, que não é o caso do presente estudo. Pelo contrário, ele pode ser utilizado

para aproximar a ruptura em regimes de compressão-compressão ou tração-compressão para problemas de estado plano de tensões, como adotado aqui. Já foi utilizado com esta finalidade por muitos autores (ZUCCHINI, A. , LOURENÇO, P. B. , 2002 ; FEENSTRA, P. H. e BORST, R. DE, 1996)

A função de falha que representa a superfície de ruptura do critério combinado de escoamento Rankine/von Mises é expressa a partir das seguintes expressões (DIANA, 1996)

$$f_R(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\kappa}_R) = \sigma_1 - f_t(\boldsymbol{\kappa}_R) \quad ; \quad \dot{\boldsymbol{\kappa}}_R = \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1^P$$

$$f_{VM}(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{\kappa}_{VM}) = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} - f_c(\boldsymbol{\kappa}_{VM}) \quad ; \quad \dot{\boldsymbol{\kappa}}_{VM} = \sqrt{\frac{2}{3} \left[(\dot{\varepsilon}_1^P)^2 + (\dot{\varepsilon}_2^P)^2 + (\dot{\varepsilon}_3^P)^2 \right]}$$
Equação 3:46

onde σ_1 e σ_2 são as tensões principais, κ_i são variáveis internas de estado ou deformações plásticas equivalente, $f_t(\boldsymbol{\kappa}_R)$ e $f_c(\boldsymbol{\kappa}_{VM})$ são as resistências à tração e à compressão uniaxiais, respectivamente. As deformações ε_i^P são as deformações plásticas principais e o ponto sobre esta variável indica derivação com relação ao tempo. A representação desta superfície de escoamento acha-se representada na Figura 3:7.

As características deste modelo são as seguintes:

- em compressão o comportamento é linear até um terço da resistência, a partir deste ponto a relação $\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\kappa}_R$ segue uma lei parabólica, com valor máximo igual a f_c com energia de fratura G_{fc} ;
- em tração o comportamento é linear até f_t e a partir deste ponto o amolecimento é modelado através de uma lei exponencial com energia de fratura G_{ft} .

A Figura 3:25 ilustra estas características, de onde se verifica que a área sob a curva de comportamento no respectivo trecho representa a energia relativa de fratura g_f . A relação entre a energia de fratura G_{ft} e a energia de fratura relativa g_f é dada por

$$G_f = g_f h$$
Equação 3:47

onde h representa o comprimento equivalente ou faixa de fissuras que, no caso do método dos elementos finitos, já se demonstrou depender da geometria do elemento

(LOURENÇO, 1996). Para quadriláteros é comum adotar h como sendo a raiz quadrada da área do elemento.

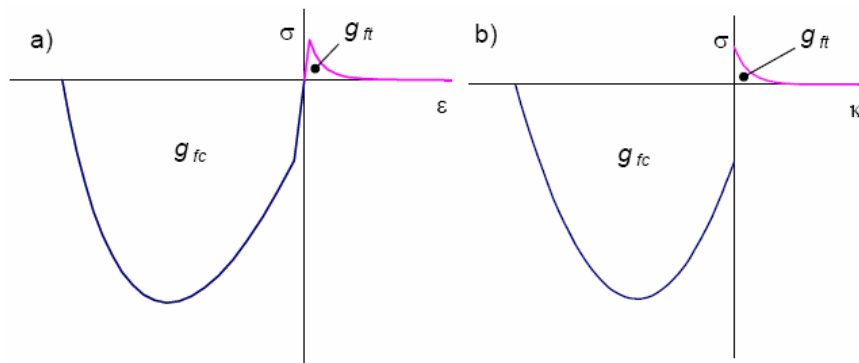


Figura 3:25 – Modelo de endurecimento e amolecimento: a) relação tensão-deformação unitária para o caso uniaxial; b) relação tensão-deformação plástica equivalente.

Os dados de entrada necessários à caracterização do critério combinado de Rankine/Von Mises são os seguintes:

- f_t = resistência à tração da alvenaria;
- f_c = resistência à compressão da alvenaria;
- G_{fc} = energia de fratura em compressão;
- G_{ft} = energia de fratura em tração;

A utilização do modelo de Rankine/von Mises é validada a seguir através de comparação com resultados experimentais realizados por LURATI e THURLIMANN (1990).

A Figura 3:26 mostra a geometria do modelo ensaiado que consiste numa parede de blocos de concreto de dimensão de 3.600 x 2.000 x 150 mm e dois flanges de 150 x 2.000 x 600 mm. Condições de contorno adicionais são dadas por duas lajes de concreto localizadas no topo e na base dos painéis. Inicialmente, a parede é submetida a um carregamento vertical de 419 kN equivalente a uma pré-compressão de 0,62 N/mm², uniformemente distribuída sobre todo o comprimento da parede. O modelo é, na sequência, submetido a uma força horizontal F na laje de topo causando um deslocamento horizontal d , que é monotonamente incrementada até a completa ruptura do modelo.

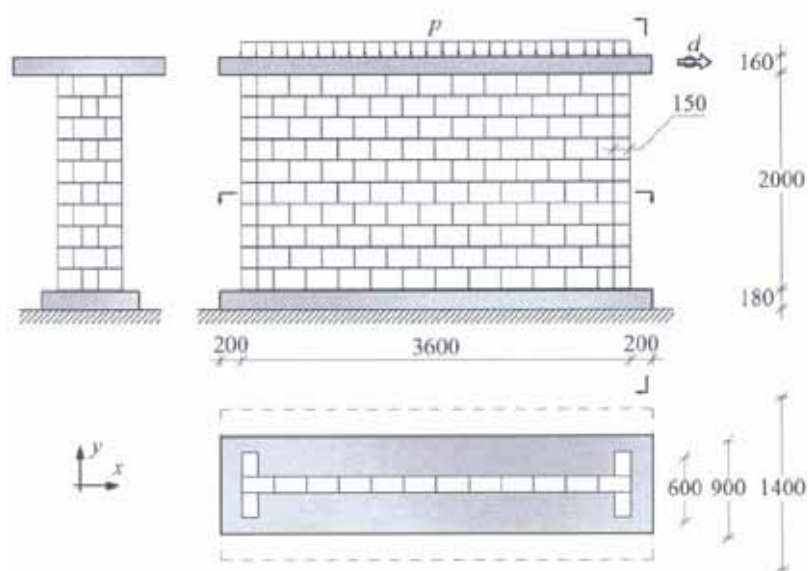


Figura 3:26 - Geometria e carregamento das paredes ETH Zurich (LOURENÇO, 1996)

Os perfis de fissuração observados nos ensaios para a carga máxima e para a ruptura estão representados na Figura 3:27. A parede apresenta uma resposta muito dúctil com ruptura por tração e corte ao longo das fissuras diagonais em zigzag.

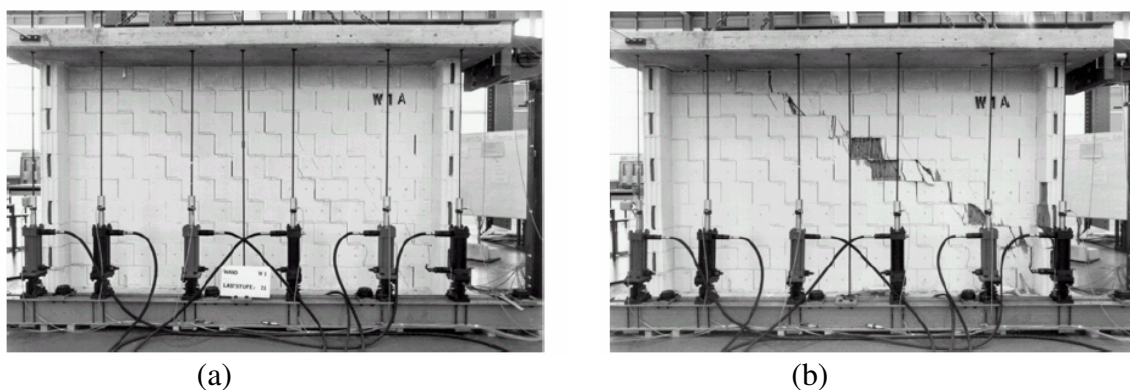


Figura 3:27 - Perfis experimentais de fissuração: (a) carga máxima; (b) ruptura

Para as análises numéricas foram utilizados elementos contínuos para estado plano de tensões com um esquema de integração de Gauss de 2x2 para os quadriláteros e 1x3 para os elementos triangulares. Uma malha regular de elementos finitos de 24x15 elementos de quatro nós foi utilizada para discretizar o painel e 8x15 elementos triangulares foram utilizados na discretização de cada flange. A malha assim resultante é composta por 664 elementos e 819 nós perfazendo um total de 1.580 graus de liberdade ativos. A Figura 3:28 a seguir apresenta a tipologia da malha de elementos finitos utilizadas nas análises realizadas.

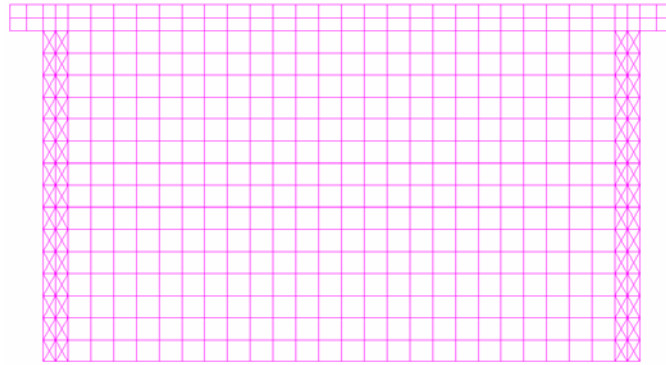


Figura 3:28 - Malha de elementos finitos utilizada

As análises numéricas foram realizadas com controle de deslocamento sendo também considerado o peso próprio da parede e da laje de topo.

As propriedades elásticas e inelásticas da alvenaria foram obtidas de LOURENÇO (1996) e se acham indicadas na Tabela 3:1, Tabela 3:2 e Tabela 3:3, a seguir.

PROPRIEDADE (1)	VALOR (2)
E (N/mm ²)	7.365
ν_{xy}	0,32
G_{xy}	3.000
Densidade (kg/mm ³)	1900e-9

Tabela 3:1 - Propriedades elásticas da alvenaria (parede e flanges)

PROPRIEDADE (1)	VALOR (2)
(a) Parâmetros de Rankine	
f_t (N/mm ²)	0,050
G_f (N/mm ²)	0,020
(b) Parâmetros de von Mises	
f_c (N/mm ²)	7,495
G_{fc} (N/mm ²)	10,00

Tabela 3:2 - Propriedades inelásticas da parede

PROPRIEDADE (1)	VALOR (2)
(a) Parâmetros de Rankine	
f_t (N/mm ²)	0,440
G_f (N/mm ²)	0,020
(b) Parâmetros de von Mises	
f_c (N/mm ²)	7,495
G_{fc} (N/mm ²)	10,00

Tabela 3:3 - Propriedades inelásticas dos flanges de alvenaria

As lajes de concreto foram consideradas com propriedades elásticas lineares.

A comparação entre os resultados experimentais e numéricos acha-se apresentada na Figura 3:29 a seguir. O gráfico desta figura mostra a evolução da força horizontal na parede quando o deslocamento horizontal no seu topo da parede é continuamente incrementado. Na fase elástico-linear ($0 \text{ kN} \leq \text{força horizontal} \leq 300 \text{ kN}$) um excelente comportamento pode ser observado sendo absolutamente coincidentes os resultados numéricos com os experimentais. Deste ponto em diante, o modelo numérico superestimou discretamente os resultados experimentais em aproximadamente 10% que, em se tratando de análise não linear de estruturas de alvenaria, se constitui um número aceitável. Não obstante esta discreta supertimação, o modelo numérico utilizado foi capaz de capturar a resposta global da parede analisada, devendo-se registrar, ainda, que a perfeita concordância entre os resultados numéricos e experimentais deve ser encarada como uma coincidência e não como objetivo de qualquer modelagem numérica.

O exame da Figura 3:29 permite ainda observar um comportamento muito dúctil da parede, causada pelo baixo nível do carregamento vertical aplicado associado ao confinamento proporcionado pelos flanges e pela laje de concreto no topo. A descarga observada no modelo numérico para um deslocamento de aproximadamente 2 mm é devida à abertura de fissura em modo I no flange esquerdo do modelo.

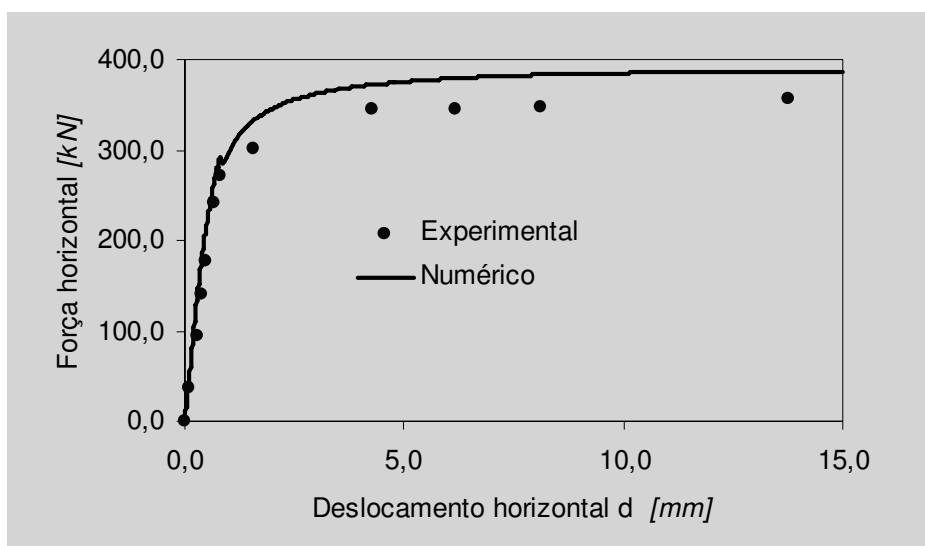


Figura 3:29 - Curva força horizontal x deslocamento horizontal no topo

A Figura 3:30 e a Figura 3:31, a seguir, exibem o comportamento da parede analisada em termos de sua deformada incremental e do perfil de fissuração nos pontos de Gauss.

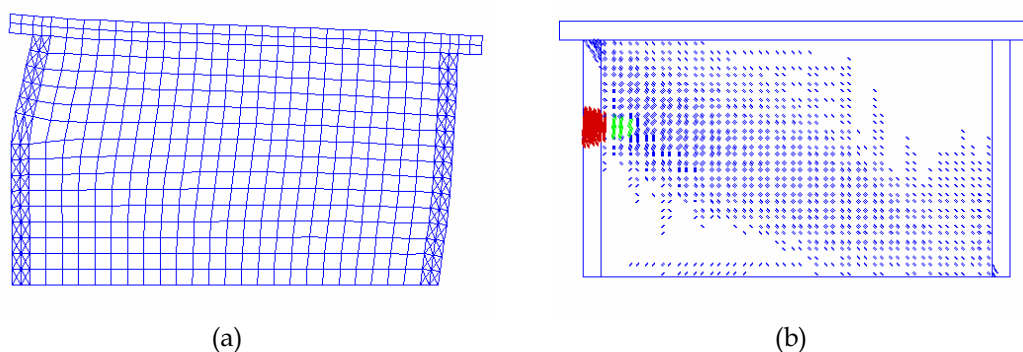


Figura 3:30 - Resultados da análise em $d = 2,0$ mm : (a) malha deformada incremental; (b) fissuras

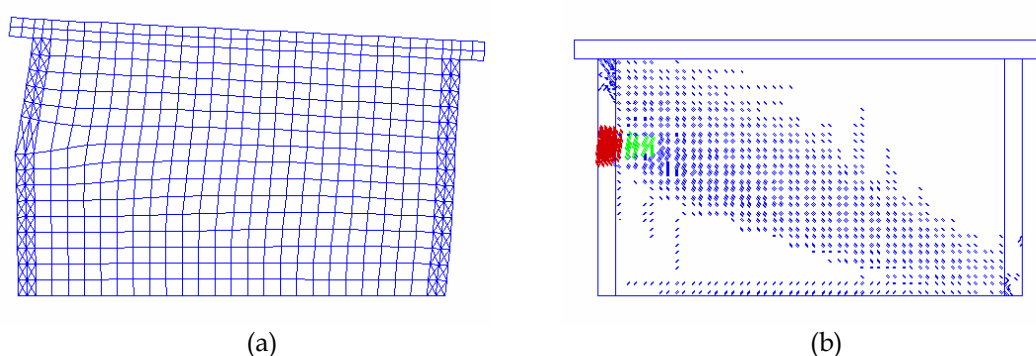


Figura 3:31 - Resultados da análise em $d = 13,0$ mm : (a) malha deformada incremental; (b) fissuras

A comparação dos resultados da Figura 3:30 e da Figura 3:31 com os da Figura 3:27 mostra uma razoável concordância. Inicialmente, um extensivo processo de fissuração diagonal é observado na parede (Figura 3:30b), seguido de fissuras de tração no flange esquerdo. Aumentando-se a magnitude da força horizontal aplicada, a fissuração tende a se concentrar numa larga faixa que atravessa a parede do canto superior esquerdo até o canto inferior direito, acompanhada por um processo mais forte de fissuração por tração no flange esquerdo (Figura 3:31b), formando, assim, o mecanismo de ruptura da parede.

A Figura 3:32 a seguir mostra as tensões principais mínimas no mesmo estágio da análise referido anteriormente. É possível observar a concentração de tensões numa faixa mais estreita com pico no canto inferior direito da parede, com o acréscimo do carregamento lateral mas, mesmo no estágio último de carga da parede, os valores se situam abaixo da máxima resistência à compressão vertical da parede, aspecto que confirma que a ruptura é governada exclusivamente pelo regime de tração.

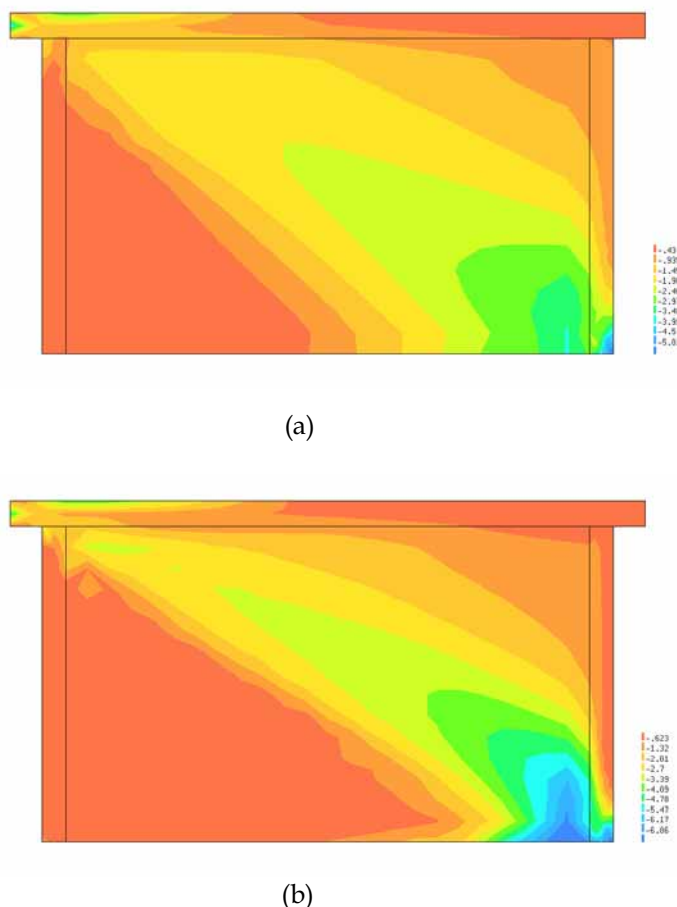


Figura 3:32 - Tensões principais mínimas em (a) $d = 2,0$ mm e (b) $d = 13,0$ mm

3.6 Resumo do capítulo

Uma análise acurada de estruturas de alvenaria, numa perspectiva da macro modelagem, demanda a caracterização completa do material para todos os estados de tensões possíveis. Esta caracterização encerra, por sua vez, importantes dificuldades devido à escassa disponibilidade de resultados experimentais que permitam a caracterização do comportamento da alvenaria nas fases de pré e pós-pico e também pela intrínseca complexidade da formulação de modelos inelásticos de comportamento.

O modelo macro contínuo para estado plano de tensões formulado por LOURENÇO (1996), LOURENÇO, ROTS e BLAAUWENDRAAD (1998) e LOURENÇO, DE BORST e ROTS (1997), apresentado anteriormente, preenche esta lacuna sendo capaz de capturar as diferentes resistências e características de amolecimento nas direções ortogonais.

Este critério composto de plastificação é especialmente adequado para modelar materiais anisotrópicos submetido a estado plano de tensões e consiste numa extensão das formulações convencionais para materiais isotrópicos quasi-frágeis para a

descrição do comportamento ortotrópico. O modelo considera critérios de plastificação individuais para tração e compressão, que descrevem diferentes mecanismos de ruptura. O primeiro critério, Rankine, está associado com um processo de fratura localizado – a fissuração por tração no material – e o segundo critério, Hill, está associado com um processo mais distribuído de fratura que é usualmente referido como esmagamento por compressão do material. O dano interno devido a estes mecanismos de ruptura é representado com dois parâmetros internos, um para dano em tração e um para dano em compressão. O modelo é formulado de tal maneira que cada parâmetro interno esteja relacionado a duas energias de fraturas independentes ao longo de cada eixo do material.

Não obstante a habilidade para a representação do comportamento da alvenaria, a indisponibilidade dos parâmetros necessários à caracterização da superfície de escoamento do modelo impossibilitou sua utilização nas análises numéricas realizadas. Ademais, até onde é do conhecimento do autor, não há nenhum estudo a este respeito nas alvenarias utilizadas no Brasil, sendo, desta forma, temerário se tentar atribuir propriedades ortótropas a um modelo.

Assim, o critério de plastificação ou ruptura utilizado para modelar o comportamento da alvenaria nas análises numéricas realizadas foi o critério combinado de Rankine/von Mises, cuja validação realizada indicou boa concordância com resultados experimentais.

4. Análise numérica

4.1 Considerações iniciais

O desenvolvimento de metodologias para o projeto de paredes de contraventamento dotadas de aberturas demanda a realização de extensivos estudos paramétricos, de natureza experimental e numérica, de forma que possa se estabelecer um completo entendimento do seu mecanismo de sustentação de cargas para as situações de serviço e ruptura. A presente pesquisa adotou a análise numérica como fonte de informações para o entendimento do comportamento estrutural de paredes com aberturas ficando as análises experimentais fora de seu foco de abordagem.

O entendimento deste comportamento estrutural se constitui um aspecto essencial e pode contribuir para o estabelecimento de recomendações para a distribuição de ações horizontais em paredes com aberturas, já que a prática habitual de projeto (ignorar os lintéis) não possui base científica.

Diversos estudos apontam que os danos em construções de alvenaria estrutural submetidas a carregamento lateral geralmente se localizam em algumas regiões das paredes portantes, notadamente nos seus membros verticais e lintéis. Levando-se em consideração o fluxo de forças através da estrutura parece óbvio que embora os lintéis transfiram as forças horizontais, todas as forças aplicadas (verticais e horizontais) têm que ser transmitidas para a fundação através dos membros verticais, de forma que estes serão os elementos mais críticos da construção contribuindo de maneira decisiva para a capacidade de carga da mesma.

A revisão da literatura realizada indicou que a utilização da análise numérica não linear com o método dos elementos finitos se constitui a abordagem computacional mais eficiente para o estudo do comportamento em estado limite de estruturas de alvenaria. Dentro deste contexto, decidiu-se realizar um extensivo estudo paramétrico numérico utilizando o Diana (DIANA, 1999), que é um programa de elementos finitos de uso geral mas que possui uma excelente biblioteca de materiais e elementos para a modelagem de estruturas de alvenaria, cujo principal objetivo é a investigação do perfil de distribuição da força cortante aplicada entre os diversos membros verticais que compõem as paredes de contraventamento dotadas de aberturas.

Adicionalmente, será discutido o grau de eficiência dos procedimentos clássicos disponíveis na literatura para efetivar esta distribuição, já detalhados anteriormente, de forma que se possa obter uma visão crítica do escopo de aplicabilidade dos mesmos.

4.2 Características geométricas dos modelos analisados

As geometrias dos painéis analisados no âmbito da presente pesquisa se acham indicada nas Figura 4:1 a Figura 4:8, a seguir.

Tratam-se de paredes estruturais típicas encontradas em grande parte das obras que utilizam esta tecnologia construtiva, todas constituídas de blocos de concreto com 14 cm de espessura.

A resistência à compressão dos blocos adotada, referida à área bruta, foi de $6,0 \text{ N/mm}^2$. À exceção dos Modelos V e VI (Figura 4:7 e Figura 4:8) que contam apenas com aberturas de janelas, os demais modelos contam com uma abertura de janela de dimensão $2,0 \times 1,20 \text{ m}$ e uma abertura de porta de dimensão $0,90 \times 2,20 \text{ m}$. Todos os modelos analisados são considerados continuamente apoiados ao longo de sua base, não sendo considerada a existência de confinamento lateral.

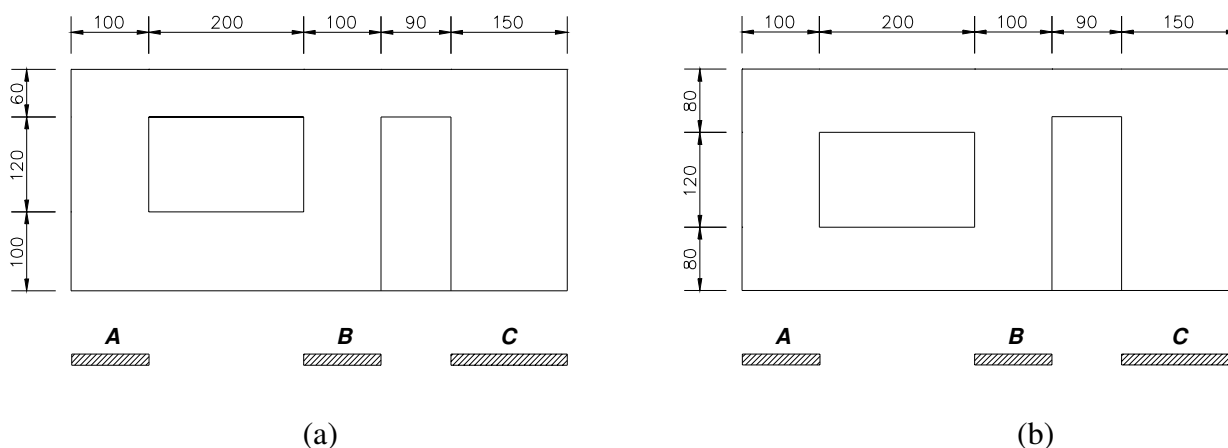


Figura 4:1 - Modelos: (a) I ; (b) I-A (medidas em cm)

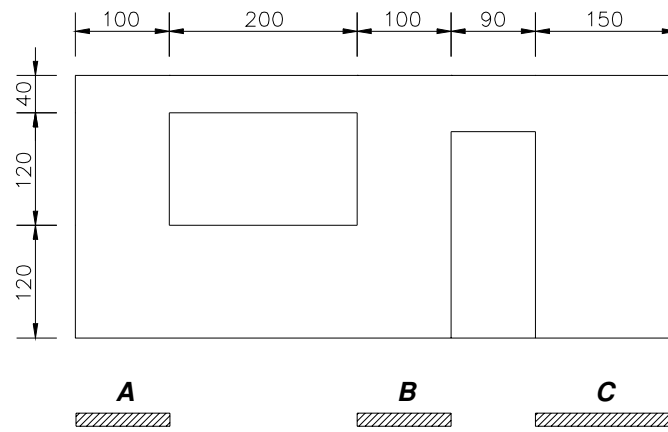


Figura 4:2 - Modelo I-B (medidas em cm)

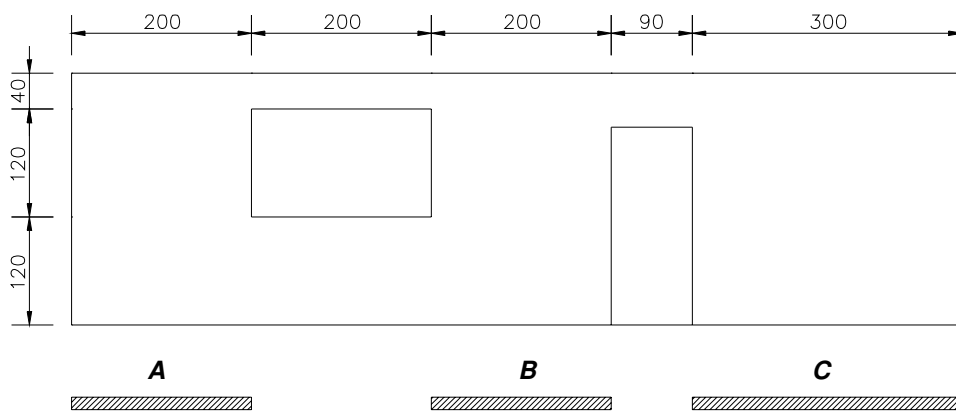
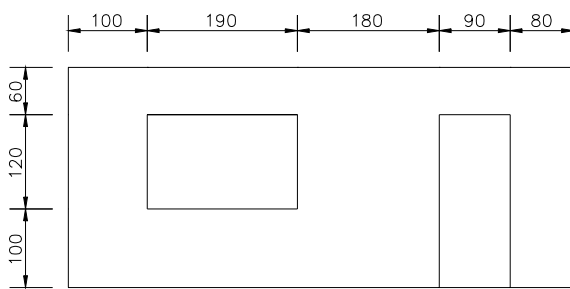
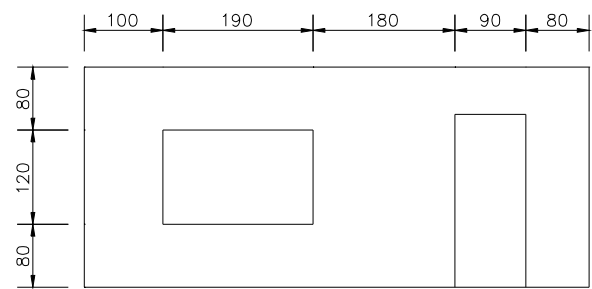


Figura 4:3 - Modelos II (medidas em cm)



(a)



(b)

Figura 4:4 - Modelos: (a) III ; (b) III-A (medidas em cm)

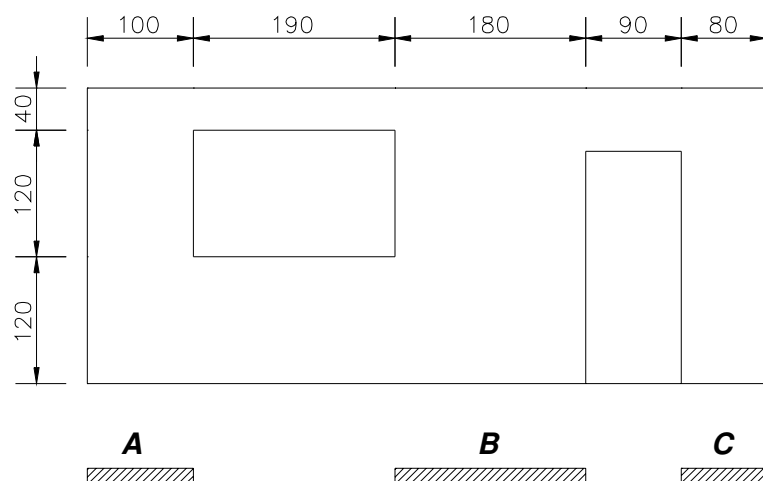


Figura 4:5 - Modelo III-B (medidas em cm)

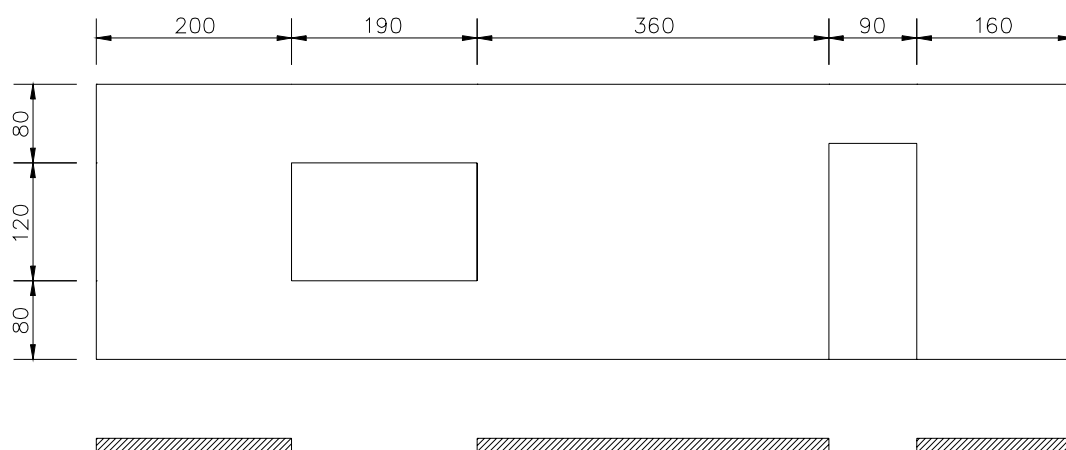


Figura 4:6 - Modelo IV (medidas em cm)

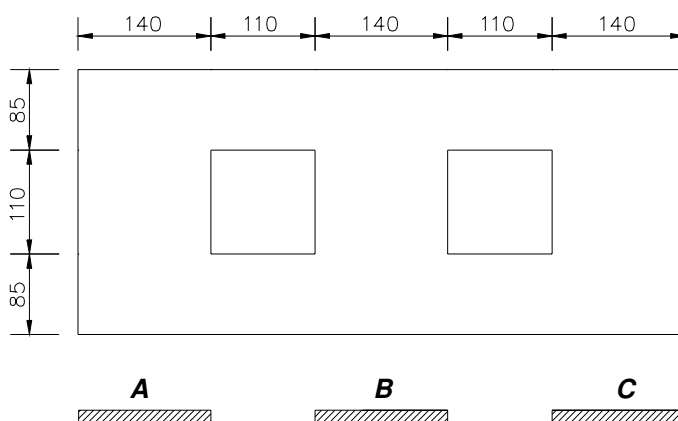


Figura 4:7 - Modelo V (medidas em cm)

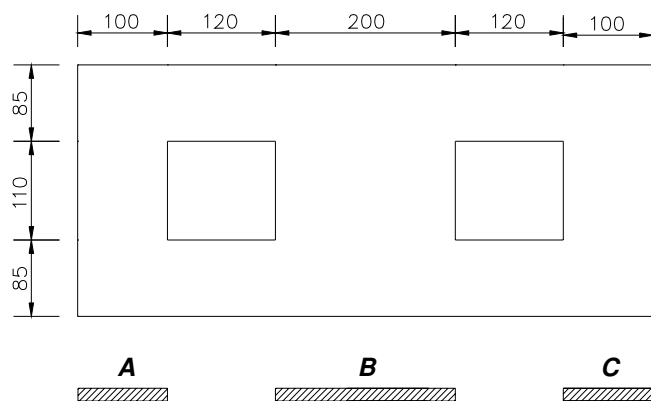


Figura 4:8 - Modelo VI (medidas em cm)

Os Modelos I, I-A e I-B têm a mesma geometria e aberturas de janela e porta de iguais dimensões, entretanto o Modelo I conta aberturas niveladas ao passo que os Modelos I-A e I-B contemplam desnível entre as aberturas, sendo o primeiro com o nível superior da abertura da janela abaixo do nível superior da abertura da porta e o segundo em situação inversa.

O Modelo II é similar ao Modelo I-B, sendo que os comprimentos dos membros verticais foram duplicados em relação àquele modelo.

Os Modelo III, III-A e III-B são variações do Modelo I, nas quais se consideraram comprimentos diferentes para todos os membros verticais (no Modelo I há dois membros de comprimentos iguais – A e B) e o Modelo IV é similar ao Modelo III-A com comprimentos de membros verticais duplicados.

Em todos os modelos analisados foi admitida a existência de vergas de concreto armado sobre as aberturas, com dimensões usualmente empregadas na prática.

4.3 Descrição geral do programa de análise numérica

4.3.1 Descrição geral

O modelo analítico utilizado nas análises é baseado na representação do comportamento da alvenaria mediante recurso à macro modelos (Rankine/von Mises) com critérios de fissuras espalhadas (as fissuras são admitidas espalhadas sobre o elemento), sendo empregados elementos bi-dimensionais isoparamétricos para estado plano de tensões para a geração das malhas de elementos finitos, conforme discutido no Capítulo 3.

A alvenaria foi representada através de um modelo bi-modular que inclui amolecimento exponencial em tração e parabólico em compressão, conforme se acha indicado na Figura 4:9 e detalhadamente discutido no Capítulo 3. As propriedades dos materiais necessários à caracterização numérica deste modelo serão apresentadas mais adiante.

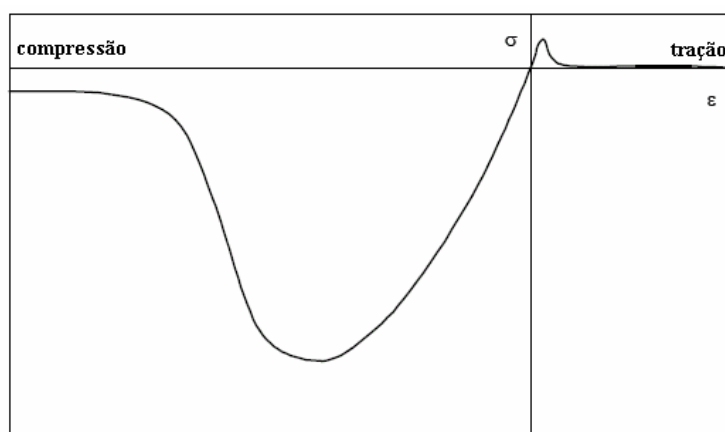


Figura 4:9 – Representação gráfica do comportamento bi-modular da alvenaria

4.3.2 Malha de elementos finitos

O modelo analítico utilizado neste estudo incluiu dois diferentes tipos de materiais: a alvenaria e o concreto, este utilizado para modelar as vergas sobre as aberturas e a laje existente no topo da parede. As propriedades dos materiais utilizados nas análises são detalhadas abaixo e a topologia típica das malhas de elementos finitos empregadas acham-se representadas na Figura 4:10.

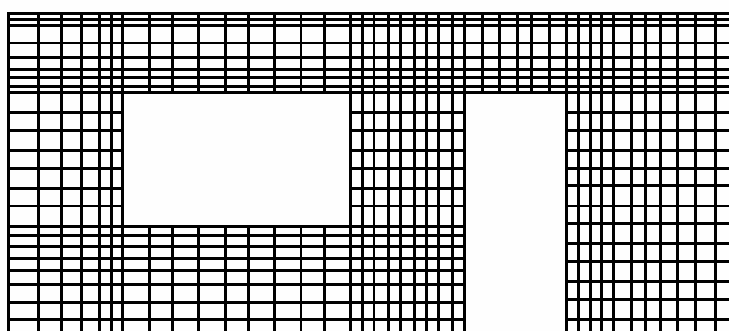


Figura 4:10 – Malha de elementos finitos típica utilizadas nas análises

- O módulo de elasticidade considerado para a alvenaria foi de $E_m = 1.000 \times f'_m = 3.900 \text{ N/mm}^2$, conforme EUROCÓDIGO 6 (1996). Para o coeficiente de Poisson adotou-se um valor de 0,15;
- Para o concreto se tomou o módulo de elasticidade igual a 20.000 N/mm^2 , equivalente a um concreto C-20, segundo a NBR 6118/2003. Para o coeficiente de Poisson adotou-se um valor de 0,15, que é comumente adotado para este material;
- A resistência à compressão da alvenaria foi considerada igual a $3,9 \text{ N/mm}^2$ com amolecimento parabólico em compressão e energia de fratura igual a 10 Nmm/mm^2 (LOURENÇO, 1996);
- A resistência à tração da alvenaria adotada foi de $0,05 \text{ N/mm}^2$ com amolecimento exponencial em tração e energia de fratura igual a 5 Nmm/mm^2 (LOURENÇO, 1996).

As energias de fratura da alvenaria em tração e compressão, conforme já discutido ao longo do texto, são parâmetros inelásticos necessários à completa caracterização do modelo de plastificação utilizado (Rankine/von Mises) e são obtidas através da realização de um elevado número de ensaios, em condições de controle de deslocamento. Também já fora mencionado da indisponibilidade de informações acerca destes parâmetros para as alvenarias utilizadas no Brasil, bem como da existência de expressões que relacionem estas propriedades inelásticas com os parâmetros usuais de resistência conhecidos – resistência à tração e resistência à compressão da alvenaria. Dentro deste contexto, e a fim de se avaliar a confiabilidade das análises numéricas realizadas, promoveu-se um estudo de sensibilidade com respeito aos parâmetros inelásticos de energia de fratura cujo objetivo foi avaliar a influência destes parâmetros na resposta estrutural dos modelos analisados.

As análises de sensibilidade, a seguir descritas, foram realizadas no Modelo I – F+X – Caso II, correspondente ao caso da parede térrea isolada, já caracterizada anteriormente. Tendo em vista que os valores das energias de fratura da alvenaria são difíceis de se obter, por conta da pouca disponibilidade de ensaios experimentais e grande variabilidade de resultados dos ensaios que se acham disponíveis na literatura, admitiu-se que os valores adotados poderiam variar em até duas vezes, para cima ou para baixo. A Figura 4:11 e Figura 4:12 apresentam a curva Força horizontal x Deslocamento horizontal no topo para o Modelo I.

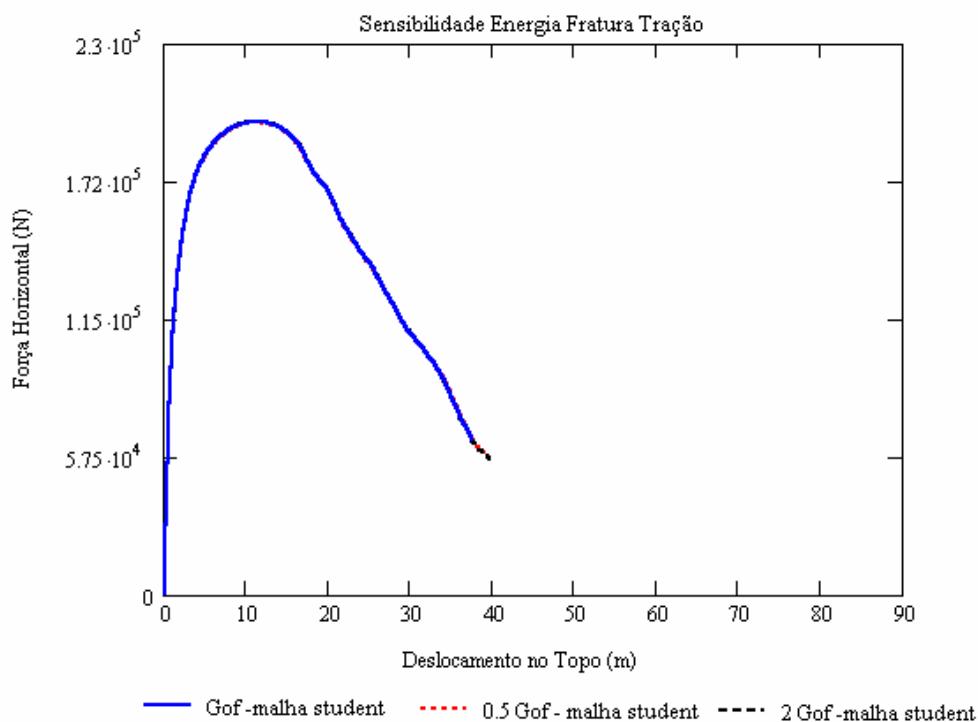


Figura 4:11 - Variação da Energia de Fratura em Tração

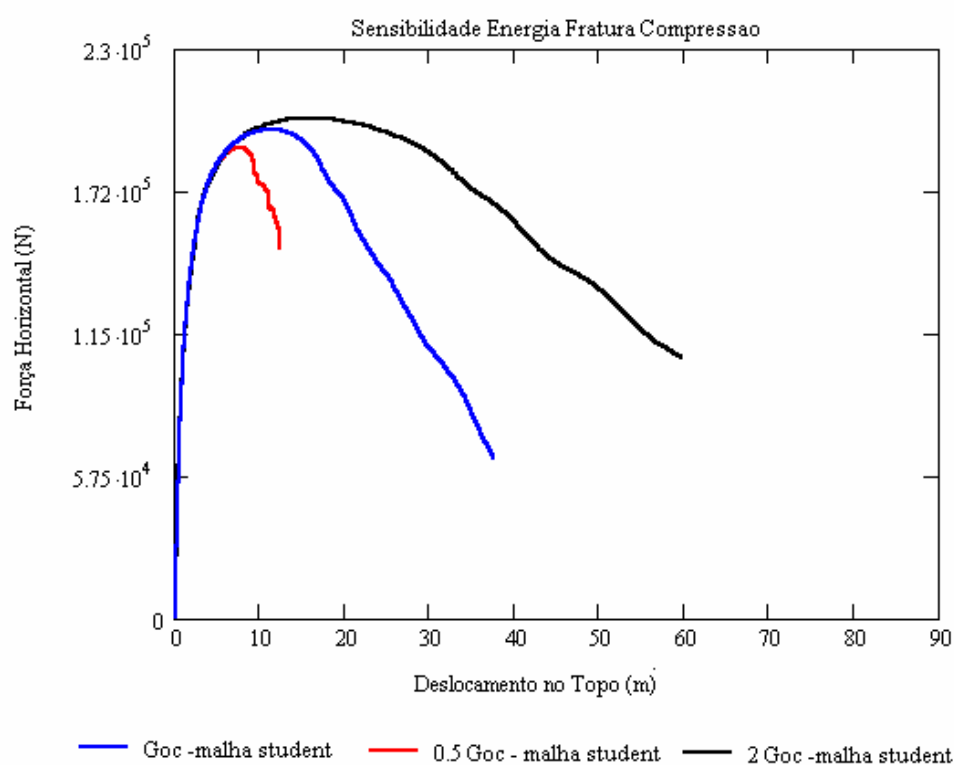


Figura 4:12 - Variação da Energia de Fratura em Compressão

Nestas figuras é possível observar que o modelo é insensível à variação da energia de fratura à tração (Figura 4:11). Isto ocorre porque a resistência à tração utilizada é praticamente zero e a energia de fratura é muito grande. Desta forma, o modelo representa um material sem resistência à tração e, sendo assim, não se verifica influência da energia de fratura à tração nos resultados.

Dentro dos limite dos parâmetros estabelecidos, os resultados obtidos são sensíveis no que diz respeito à energia de fratura em compressão apenas em termos de rigidez pós-pico (Figura 4:12). No que respeita à força de pico, os resultados são pouco sensíveis à variação da energia de fratura em compressão, conforme se observa na Tabela 4-1 e na Tabela 4:2 a seguir.

G_f N.mm/mm ²	G_c N.mm/mm ²	F_{pico} kN	D_{pico} mm	K_{pico} kN/mm
Variação de G_f				
5	10	197,23	11,535	17,098
2,5	10	196,95	11,336	17,374
10	10	197,38	11,945	17,171
Variação de G_c				
5	10	197,23	11,535	17,098
5	5	190,17	7,676	24,775
5	20	201,93	15,512	13,018

Tabela 4-1 – Resposta da estrutura à variação dos parâmetros inelásticos do modelo

Parâmetro		G_{ft} (tração)	G_{fc} (compressão)
Dividido por 2		196,95 kN	190,17
Multiplicado por 2		197,38 kN	201,93
% Relativo ao Original	Dividido por 2	-0,142%	-3,58%
	Multiplicado por 2	+0,076%	+2,383%

Tabela 4:2: Forças de pico das análises de sensibilidade

Um aspecto que merece ser ressaltado é que em todos os modelos analisados o comportamento observado em ruptura foi caracterizado pela formação das bielas comprimidas segundo as diagonais dos elementos, independente dos valores da energia de fratura em tração e compressão utilizadas. A discussão deste mecanismo de ruptura é apresentada nas seções que se seguem.

Os modelos estudados foram considerados fixos na base e no topo admitiu-se a existência de uma laje de concreto armado. Admitiu-se ainda, no topo, que os deslocamentos verticais de todos os nós experimentam mesmo deslocamento vertical, condição que é freqüente em ensaios experimentais. Intenciona-se, destarte, que as paredes assim analisadas representem uma parte de um edifício de maiores dimensões.

A estratégia de carregamento a que foi submetido cada modelo foi a seguinte:

- (i) Aplicação, nos primeiros estágios das análises não-lineares, de pré-compressão nos valores de 0,42 N/mm² e 0,912 N/mm².
- (j) Após a aplicação da pré-compressão, foi aplicada no topo do modelo força horizontal, sendo admitidas duas hipóteses: uma com a força horizontal agindo segundo a direção +X e outra agindo segundo a direção -X. As forças horizontais foram aplicadas através da imposição de deslocamentos nodais correspondentes, em todos os nós do topo do modelo. Esta força foi monotonamente incrementada até a ruptura do painel, caracterizado por uma degradação de 20% da rigidez secante de pico do modelo, conforme já discutido no Capítulo 3.

A Tabela 4:3 a seguir sumariza os carregamentos a que foram submetidos cada modelo estudado e a Figura 4:13 ilustra estes carregamentos de maneira esquemática, bem como aponta a localização do deslocamento horizontal de interesse para as avaliações promovidas ao longo da presente pesquisa.

Modelo	Condição de Carregamento Inicial	
	Caso II	Caso III
Todos	$\sigma_{pre} = 0,420 \text{ N/mm}^2$	$\sigma_{pre} = 0,912 \text{ N/mm}^2$

Tabela 4:3 – Condição de carregamento dos modelos estudados

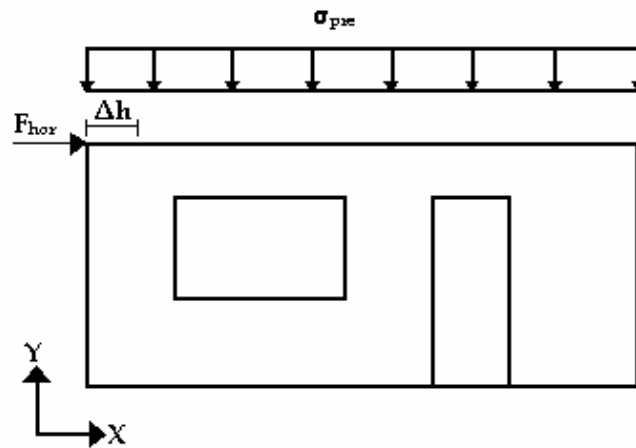


Figura 4:13 - Carregamentos aplicados e deslocamento horizontal de interesse

4.4 Resultados e Discussão

4.4.1 Perfil Global de Deslocamentos dos Modelos

O comportamento Força Horizontal x Distorção Angular para as duas situações de carga estudadas e pré-compressão correspondente ao Caso II e III acha-se indicado na Figura 4:14 e na Figura 4:16. As curvas apresentadas para os diferentes modelos foram normalizadas com relação ao respectivo modelo sólido (parede sem aberturas), cuja curva também se acha representada. Na Figura 4:15 e na Figura 4:17, representa-se a degradação da rigidez dos modelos ao longo do processo de carga. Nestas figuras, F_0 e K_0 representam a força horizontal e a rigidez secante de pico para o modelo sem aberturas.

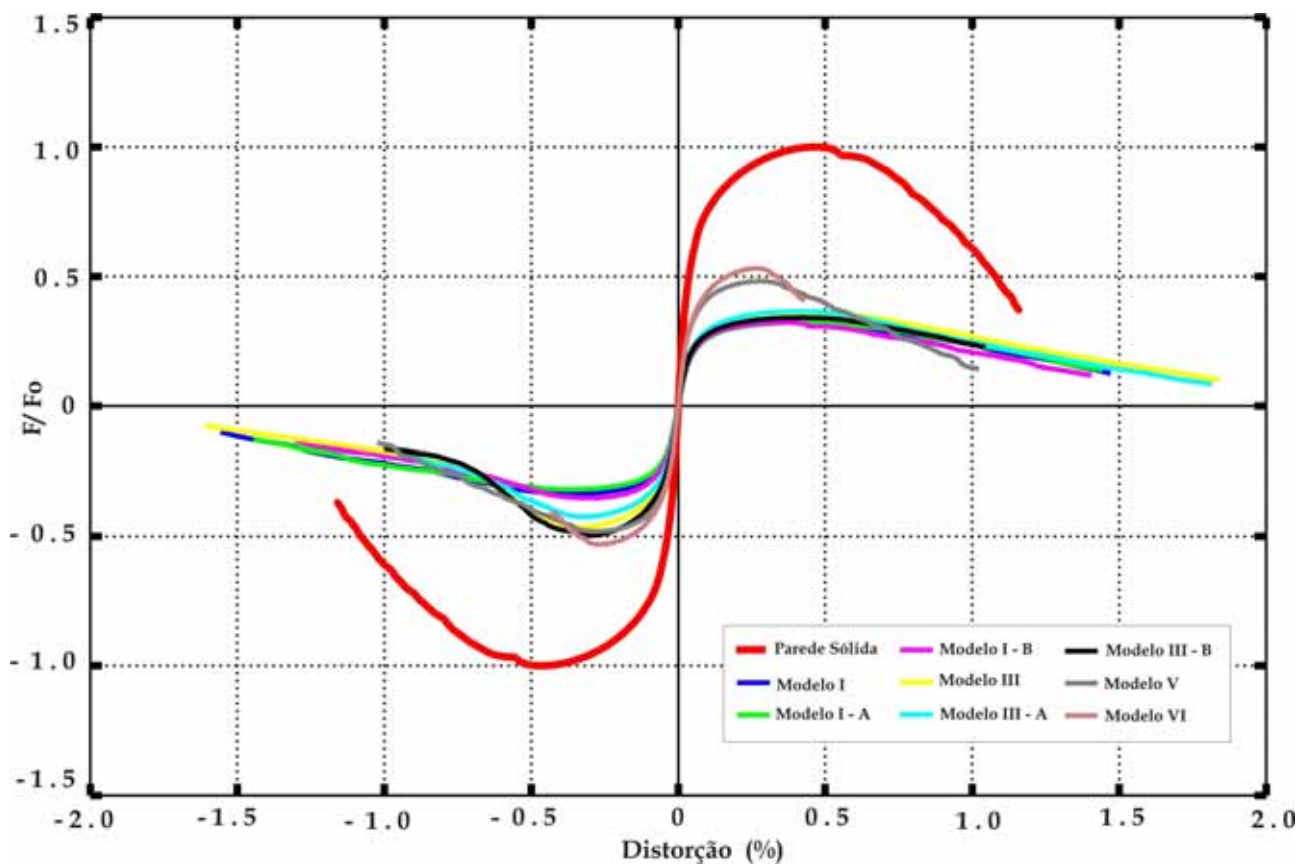


Figura 4:14 - Comportamento Força Horizontal x Distorção Angular: Caso II

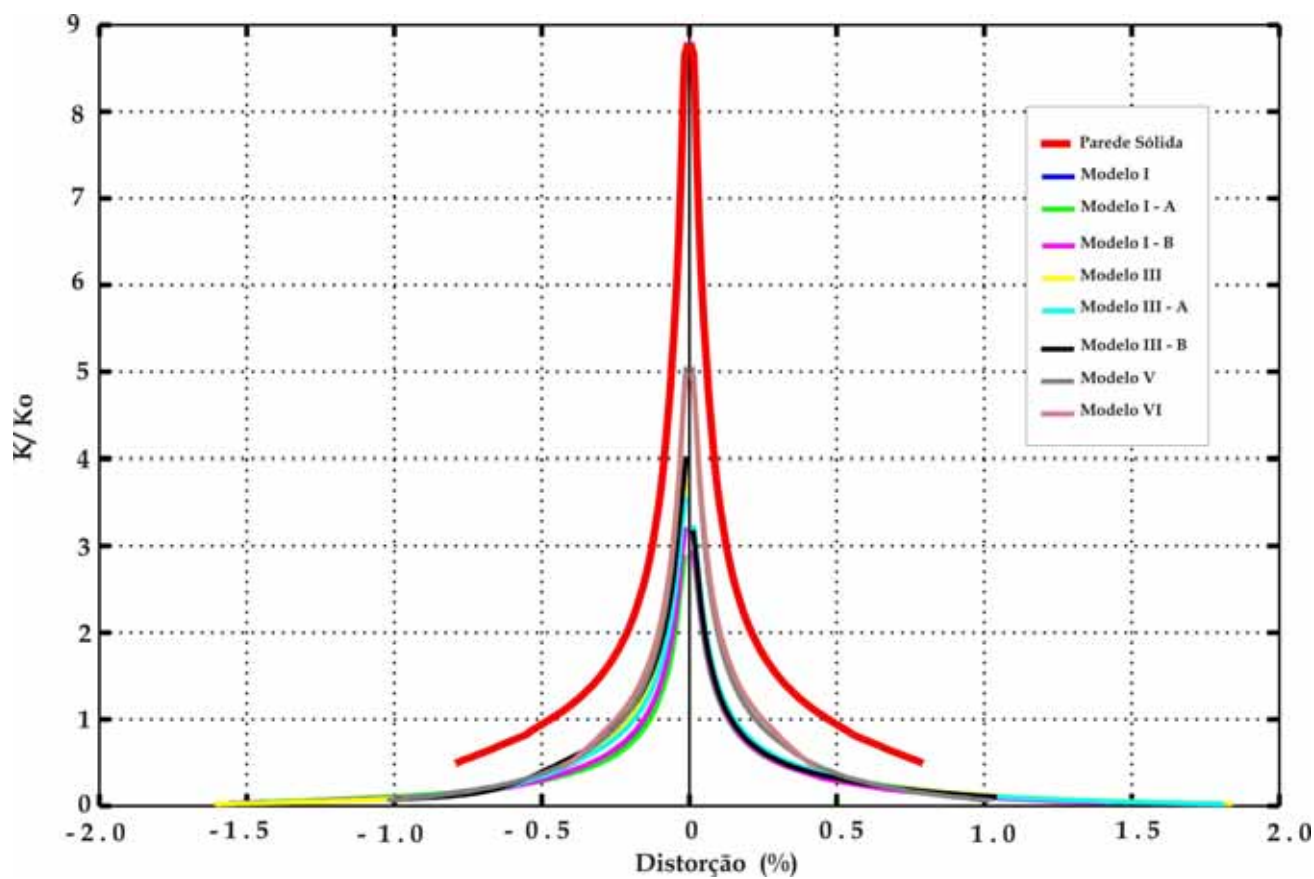


Figura 4:15 - Degradação da rigidez x Distorção Angular: Caso II

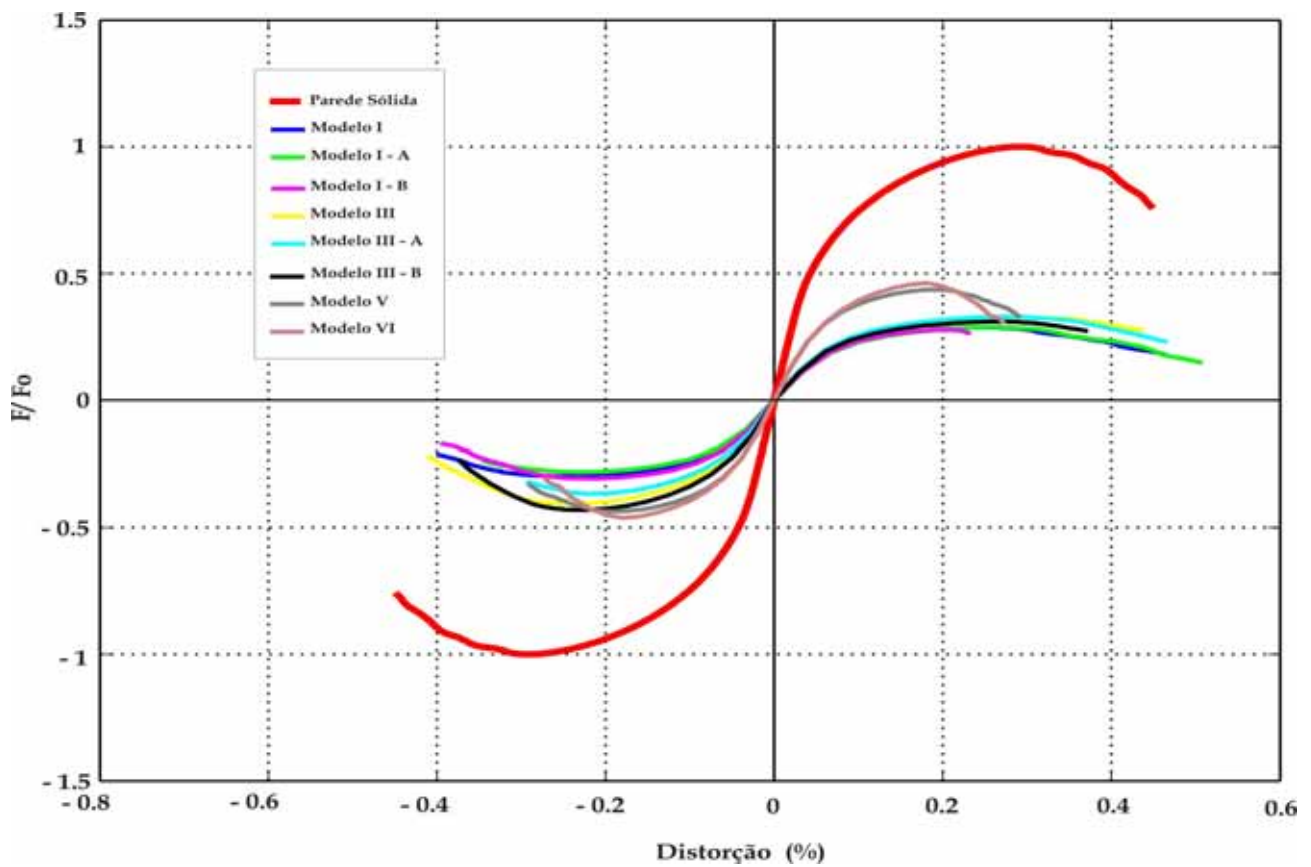


Figura 4:16 - Comportamento Força Horizontal x Distorção Angular: Caso III

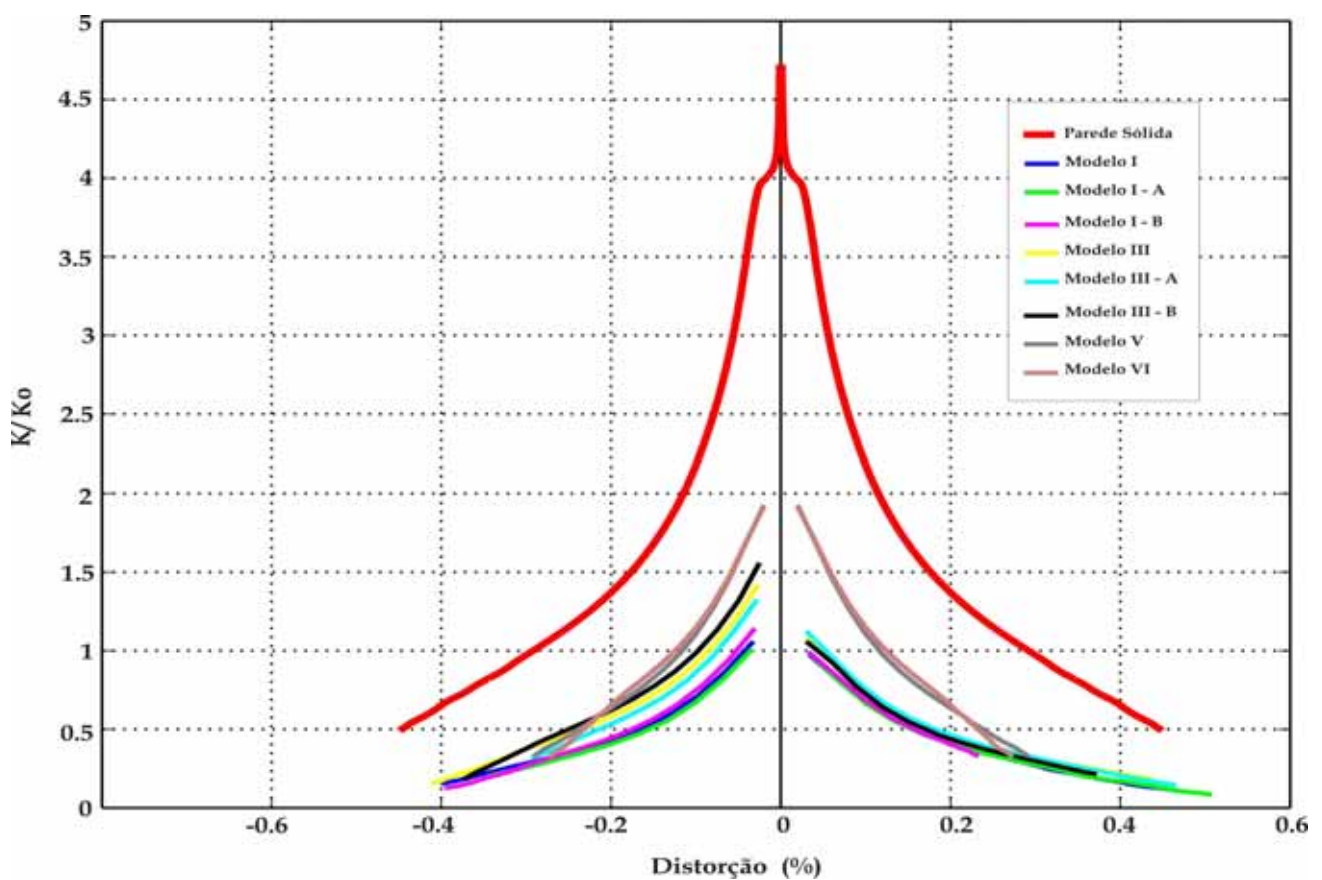


Figura 4:17 - Degradação da rigidez x Distorção Angular: Caso III

A Tabela 4:4 e a Tabela 4:5 a seguir sumarizam as distorções de pico, a relação entre a força de pico e força de pico do modelo sem aberturas e a distorção última para os modelos analisados, para ação da força horizontal segundo a direção +X e -X e pré-compressão correspondente ao Caso II e III.

Modelo	Distorção de Pico - %		Relação F_{pico}/F_o		Distorção Última - %	
	Direção +X	Direção -X	Direção +X	Direção -X	Direção +X	Direção -X
I	0,418	0,361	0,323	0,335	0,884	0,770
I-A	0,434	0,376	0,323	0,319	0,886	0,800
I-B	0,368	0,316	0,322	0,352	0,789	0,608
III	0,488	0,341	0,356	0,465	0,924	0,542
III-A	0,415	0,333	0,365	0,424	0,808	0,544
III-B	0,430	0,307	0,341	0,497	0,852	0,518
V	0,282	0,282	0,481	0,481	0,517	0,517
VI	0,271	0,271	0,531	0,531	0,408	0,408
II	0,336	0,382	0,504	0,534	0,526	0,575
IV	0,434	0,341	0,559	0,598	0,818	0,716

Tabela 4:4: Súmula das análises: Caso II

Modelo	Distorção de Pico - %		Relação F_{pico}/F_o		Distorção Última - %	
	Direção +X	Direção -X	Direção +X	Direção -X	Direção +X	Direção -X
I	0,268	0,259	0,286	0,298	0,395	0,368
I-A	0,269	0,235	0,288	0,282	0,407	0,347
I-B	0,196	0,213	0,278	0,306	0,353	0,326
III	0,305	0,239	0,327	0,406	0,438	0,348
III-A	0,271	0,222	0,329	0,366	0,424	0,295
III-B	0,268	0,224	0,310	0,430	0,372	0,326
V	0,199	0,199	0,436	0,436	0,284	0,284
VI	0,181	0,181	0,461	0,461	0,245	0,245
II	0,207	0,255	0,494	0,532	0,364	0,377
IV	0,300	0,277	0,571	0,604	0,446	0,407

Tabela 4:5: Súmula das análises: Caso III

As curvas dos diversos modelos apresentadas na Figura 4:14 exibem um comportamento inicialmente elástico-linear a partir do qual todos os modelos começam a

apresentar uma redução na sua rigidez devido ao processo de fissuração que se instala na parede ao longo do processo incremental da força horizontal.

Para a ação da força horizontal segundo a direção +X (parte direita do gráfico da Figura 4:14) foi observado que, a exceção dos modelos V e VI, os modelos atingiram a força horizontal de pico para uma distorção média de 0,43% (12,04 mm), apontando um comportamento semelhante destes modelos, evidenciando que o desnivelamento entre as aberturas de alguns dos modelos interferiu de maneira pouco expressiva na alteração do comportamento global dos painéis estudados. Para estes modelos, a força de pico atingida representou, em média, 34% da força de pico obtida para o modelo sem aberturas. Os modelos V e VI apresentaram uma distorção de pico da ordem de 0,28% (7,84 mm), correspondente a uma força de pico de aproximadamente 50% da força obtida para o modelo sem aberturas. Este comportamento diferenciado dos modelos V e VI pode ser atribuída ao percentual de aberturas que é inferior aos outros modelos (Modelo V, 13,5% ; Modelo VI, 14,73% e demais modelos, 24,44%) e à relação de forma dos seus membros verticais, sendo importante observar que, não obstante apresentar percentual de área de abertura superior ao Modelo V, o Modelo VI exibiu uma melhor performance, que pode ser atribuída à maior rigidez do elemento vertical existente entre as aberturas.

O exame das curvas de degradação da rigidez para ação da força horizontal segundo a direção +X (parte direita do gráfico da Figura 4:15) corrobora a interpretação acima formulada mostrando que o perfil de degradação da rigidez dos modelos estudados é bastante similar. Os modelos V e VI apresentam perfil de degradação da rigidez similar aos demais modelos, muito embora seja visível a melhor performance do modelo VI, pelos aspectos já mencionados anteriormente.

Comparando-se as rigidezes secantes de pico dos modelos estudados tendo como paradigma o modelo sólido, pode-se concluir que, a exceção dos modelos V e VI, não foi significativa a alteração introduzida pelo desnivelamento das aberturas nos modelos estudados (vê Tabela 4:6), sendo notável a melhor performance do Modelo VI, cuja redução de rigidez em relação ao modelo sólido foi de apenas 7,59%, não obstante contar com área de abertura diferente dos demais modelos estudados (cerca de 9,1% superior ao Modelo V e 40% inferior aos demais modelos).

Modelo	Rigidez de Pico (N/mm)	Diferença Relativa (%)
Sólido	45.560	100
Modelo I	16.570	-63,63
Modelo I-A	15.960	-64,97
Modelo I-B	18.750	-58,84
Modelo III	15.670	-65,61
Modelo III-A	18.860	-58,60
Modelo III-B	16.990	-62,71
Modelo V	36.610	-19,64
Modelo VI	42.100	-7,59

Tabela 4:6 – Comparação das rigidezes de pico dos modelos estudados: Caso II – Dir +X

Ainda para a força horizontal agindo segundo a direção +X, o comportamento pós-pico destes modelos também se mostrou igualmente similar, sendo a distorção última da ordem de 0,86% (24,10 mm). Os Modelos V e VI exibiram distorção última de 0,52% (14,6 mm) e 0,41% (11,5 mm), respectivamente, que representam aproximadamente a metade dos valores obtidos para os outros modelos. A distorção última dos modelos com a mesma área de aberturas se mostrou expressivamente uniforme com uma média de 0,86% (24 mm) e um coeficiente de variação de 6%.

Os resultados obtidos sugerem que, para a força horizontal segundo a direção +X, mais importante do que o desnivelamento das aberturas, a percentagem de área destas aberturas em relação à área total do modelo e a localização destas aberturas no interior do painel influenciaram de maneira mais nítida o comportamento global dos modelos estudados.

Para a ação da força horizontal segundo a direção -X (parte esquerda do gráfico da Figura 4:14) o comportamento dos diversos modelos estudados apresenta discretas diferenças entre si e também quando se comparam os comportamentos dos mesmos modelos para força horizontal agindo segundo a direção +X.

Com efeito, os Modelos I, I-A e I-B atingiram a força horizontal de pico para uma distorção de aproximadamente 0,35% (9,8 mm) que é cerca de 15% inferior aos mesmos modelos mas com força horizontal agindo segundo a direção +X. As rigidezes de pico destes modelos também foram diferentes mostrando que, para ação da força horizontal segundo a direção -X, os modelos se comportaram de maneira mais rígida.

Os Modelos III, III-A e III-B atingiram a força horizontal de pico para uma distorção média de 0,33% (9,2 mm) que é cerca de 25% inferior aos mesmos modelos e, identicamente Modelos I, I-A e I-B, estes modelos também apresentaram uma resposta mais rígida quando comparada com os mesmos modelos para força horizontal segundo a direção +X (vê Tabela 4:7).

Modelo	Rigidez de Pico (N/mm)	Diferença Relativa (%)
Sólido	45.560	100
Modelo I	19.889	-56,35
Modelo I-A	18.205	-60,04
Modelo I-B	23.898	-47,55
Modelo III	29.242	-35,82
Modelo III-A	27.339	-40,00
Modelo III-B	34.712	-23,81
Modelo V	36.610	-19,64
Modelo VI	42.100	-7,59

Tabela 4:7 – Comparação das rigidezes de pico dos modelos estudados: Caso II – Dir -X

Comparando-se todos os modelos estudados para ação da força horizontal segundo a direção -X foi observado que, não obstante apresentarem praticamente a mesma distorção de pico, os modelos III, III-A e III-B atingiram forças de pico superiores aos Modelos I, I-A e I-B, fato que concorreu para uma alteração de suas rigidezes de pico, conforma aponta a Tabela 4:7. Deve ser notado, ademais, que o modelo III-B exibiu uma rigidez de pico muito próxima do modelo V, não obstante apresentar área de aberturas cerca de 80% superior àquele modelo.

O comportamento pós-pico destes modelos também apresentou diferenças entre si e quando se comparam os comportamentos dos mesmos modelos para força horizontal agindo segundo a direção +X, sendo mais expressivas as diferenças nos modelos III, III-A e III-B. Com efeito, a distorção última destes modelos foi cerca de 37% inferior os mesmos modelos para força horizontal segundo a direção +X ao passo que nos modelos I, I-A e I-B esta diferença foi de 14%. A distorção última dos modelos com a mesma área de aberturas não apresentou a mesma uniformidade verificada para ação da força horizontal segundo a direção +X, sendo a média de 0,63% (17,64 mm) com um

coeficiente de variação de 20%, enfatizando, assim, a diferença de comportamento observada quando da alteração da direção da força horizontal aplicada.

Considerando todos os modelos analisados, exceção feita aos modelos V e VI, e ambas as situações de carga estudadas (+X e -X), a distorção última média observada foi de 0,74% com um coeficiente de variação de 20%.

O exame das curvas de degradação da rigidez para ação da força horizontal segundo a direção -X (parte esquerda do gráfico da Figura 4:15) corrobora a interpretação acima formulada mostrando que a degradação da rigidez dos modelos estudados é menos expressiva que aquela observada para ação da força horizontal segundo a direção +X, principalmente para os modelos III, III-A e III-B.

Para se entender o comportamento observado, faz-se necessário aprofundar a discussão sobre a resposta estrutural de paredes de alvenaria submetidas a carregamento no próprio plano da parede com especial enfoque no comportamento dos membros verticais que a compõem.

De acordo com ensaios experimentais já realizados e evidências de danos em construções reais (TOMAZEVIC, M., 1999), três tipos de mecanismos e modos de ruptura definem o comportamento da alvenaria estrutural quando solicitada por carregamento agindo no próprio plano da parede. Estes mecanismos dependem da geometria da parede (relação altura/comprimento), da qualidade de seus constituintes, das condições de contorno e da relação entre a carga vertical e horizontal (Figura 4:18).

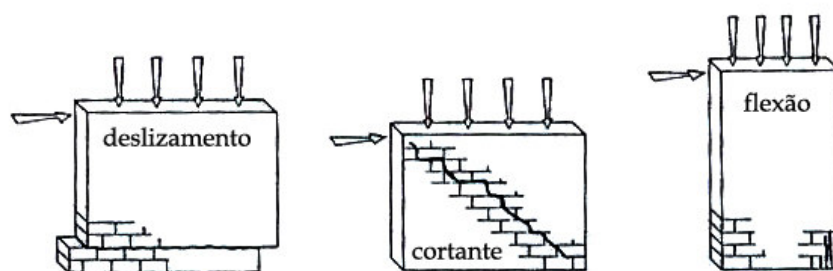


Figura 4:18 – Modos de ruptura típicos de paredes submetidas a carregamento no plano
[TOMAZEVIC, M., 1999]

Para o caso de carregamento vertical de baixa magnitude e argamassa de baixa qualidade a ruptura na parede se dará por uma movimentação relativa da parte superior e inferior em um dos planos horizontais de argamassa. Com o acréscimo do

carregamento vertical, mas com valores dentro dos limites usuais, a parede pode desenvolver ruptura por cisalhamento ou por flexão. A ruptura por cisalhamento se manifesta onde as tensões principais de tração ultrapassam o limite de resistência da alvenaria e pode ser observado na parede o aparecimento de fissuras orientadas na direção da diagonal, pouco antes de ser atingida a resistência lateral da parede. Estas fissuras podem se manifestar só nas juntas de argamassa, só nos blocos ou em ambos. Se a resistência ao cisalhamento da parede é elevada e tem-se uma elevada relação momento/cortante o esmagamento das zonas comprimidas nos cantos da parede geralmente ocorre, indicando um modo de ruptura característico de flexo-compressão.

Freqüentemente, a ruptura por flexão de uma parede de alvenaria estrutural não armada é definida, de maneira imprecisa, pela formação de fissuras horizontais no lado tracionado da seção da parede mais solicitada. Contudo, pelas indicações de ensaios experimentais, a resistência lateral da parede ainda não é atingida neste instante. Muito embora o comprimento da fissura no lado tracionado aumente pelo acréscimo de deformação da parede, e, conseqüentemente, a área efetiva de compressão da seção transversal da parede seja reduzida, sua resistência lateral ainda experimenta acréscimos até que as tensões no canto mais solicitado da parede atinjam a resistência à compressão da alvenaria (veja Figura 4:19).



Figura 4:19 – Ruptura por flexão de um membro vertical esbelto de alvenaria não armada

[TOMAZEVIC, M., 1999]

Este mecanismo pode ser explicado observando-se o comportamento de um membro vertical esbelto de alvenaria, fixo na base e no topo no interior de uma parede de contraventamento, que é solicitado por uma carga vertical e submetido a uma força horizontal incremental, conforme indica a Figura 4:20. Para pequenos valores da força horizontal, o equilíbrio do membro é assegurado pelos momentos de engastamento $M = 0,5 h \times F_h$, que se desenvolvem em ambas as extremidades do elemento. Com o acréscimo da força horizontal, a tração nos cantos causa fissuras na ligação entre a argamassa e os blocos na junta de argamassa horizontal mais solicitada. Tendo em vista que o membro vertical não se acha, de fato, engastado nos extremos, os momentos em suas extremidades diminuem e conseqüentemente o equilíbrio só pode ser mantido se a resultante do carregamento vertical (F_v) se movimentar na direção dos cantos mais comprimidos do membro. Admitindo-se que o membro não irá romper por cisalhamento neste momento, e aumentando o comprimento das fissuras horizontais nos apoios, a contribuição dos momentos fletores para a manutenção do equilíbrio se torna menos importante. No limite, o membro se comporta como um corpo rígido que gira na sua base, de forma que o valor da carga lateral máxima pode ser calculado a partir da Equação 4:1.

$$F_h = \frac{l - a}{h} F_v$$

Equação 4:1

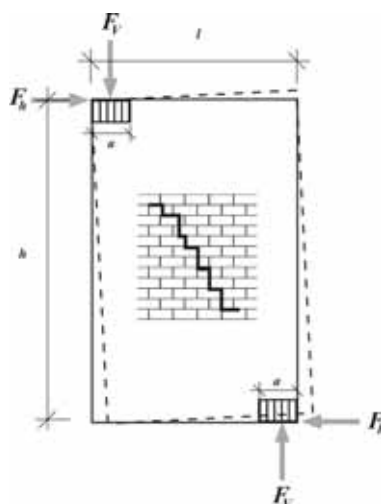


Figura 4:20 – Equilíbrio de um membro vertical de alvenaria submetido a carga vertical e horizontal

Acontece que no interior da parede de contraventamento o membro vertical não está totalmente livre para girar e, desta forma, é gerada uma compressão adicional no membro na direção de sua diagonal que pode ocasionar tanto o esmagamento da alvenaria

nos cantos mais comprimidos quanto um processo de fissuração diagonal, que pode gerar tensões de tração superiores à resistência da alvenaria.

Este tipo de comportamento foi observado com nitidez em todos os modelos integrantes das análises numéricas realizadas, conforme se acha indicado na Figura 4:21 e na Figura 4:22, que exibem a evolução das deformações principais máximas e das tensões principais mínimas ao longo do processo de carga, para ação da força horizontal segundo a direção +X até o atingimento da força horizontal de pico. A Figura 4:23 e a Figura 4:24 mostram as mesmas variáveis para a ação da força horizontal segundo a direção -X.

O exame destas figuras permite acompanhar o processo de fissuração que se instala na parede ao longo do processo de carregamento bem como a formação das bielas segundo as diagonais comprimidas. Em todos os modelos analisados a formação destas bielas se acha presente com uma lógica de formação claramente definida. Alguns autores consideram uma modelagem aproximada de paredes de alvenaria estrutural através de bielas equivalentes (precisamente estas que se acham representadas), cujas propriedades de rigidez são determinadas através de fórmulas empíricas que levam em conta a geometria e parâmetros físicos da alvenaria.

Estas figuras mostram ainda que não apenas a altura efetiva do membro participa do mecanismo de sustentação de cargas da parede mas também realçam que o comportamento dos membros verticais admitido como vigas, nos procedimentos clássicos de distribuição da força cortante baseados na rigidez, está longe da realidade.

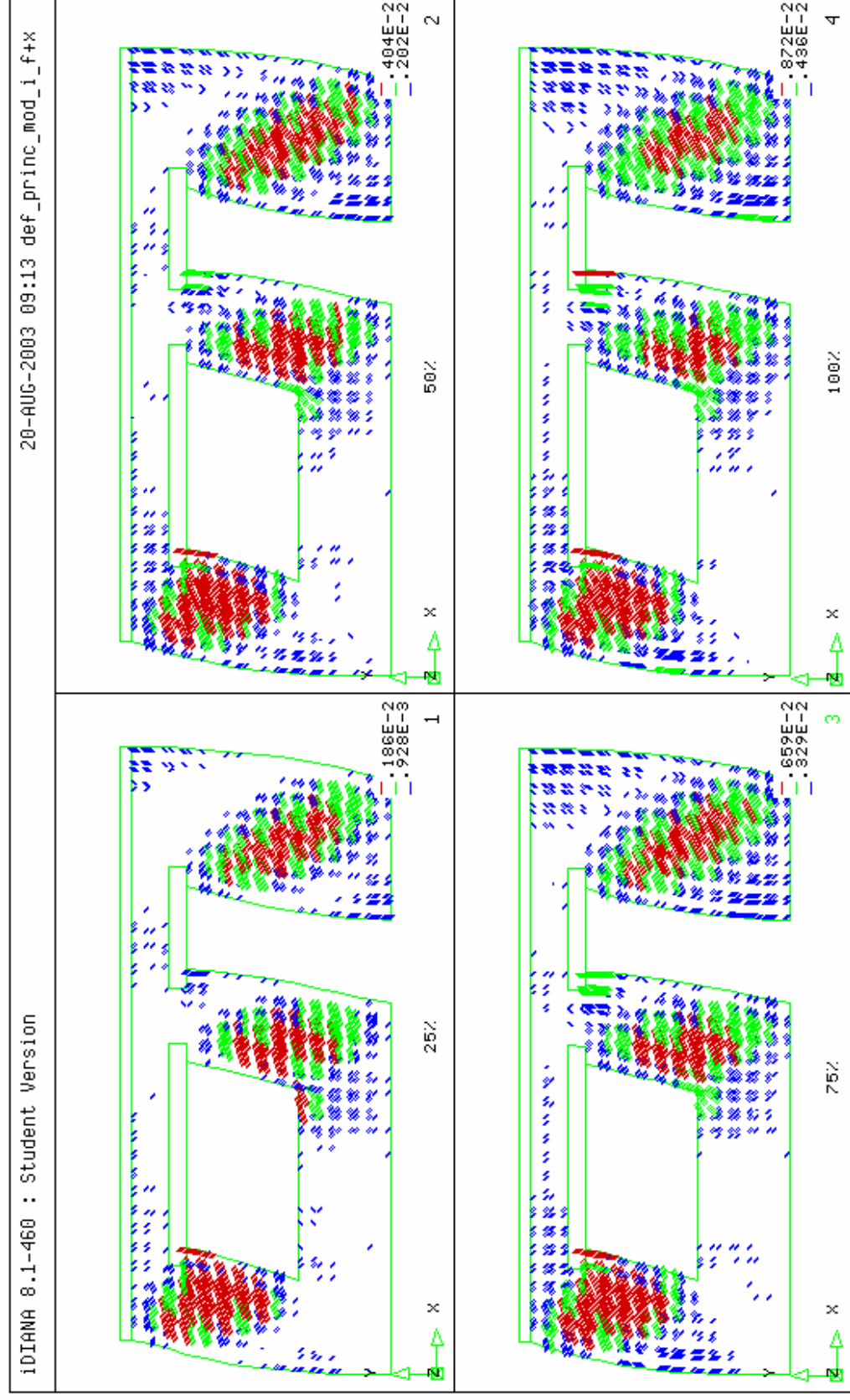


Figura 4:21 - Deformações principais máximas - Modelo I - F+X - Caso II

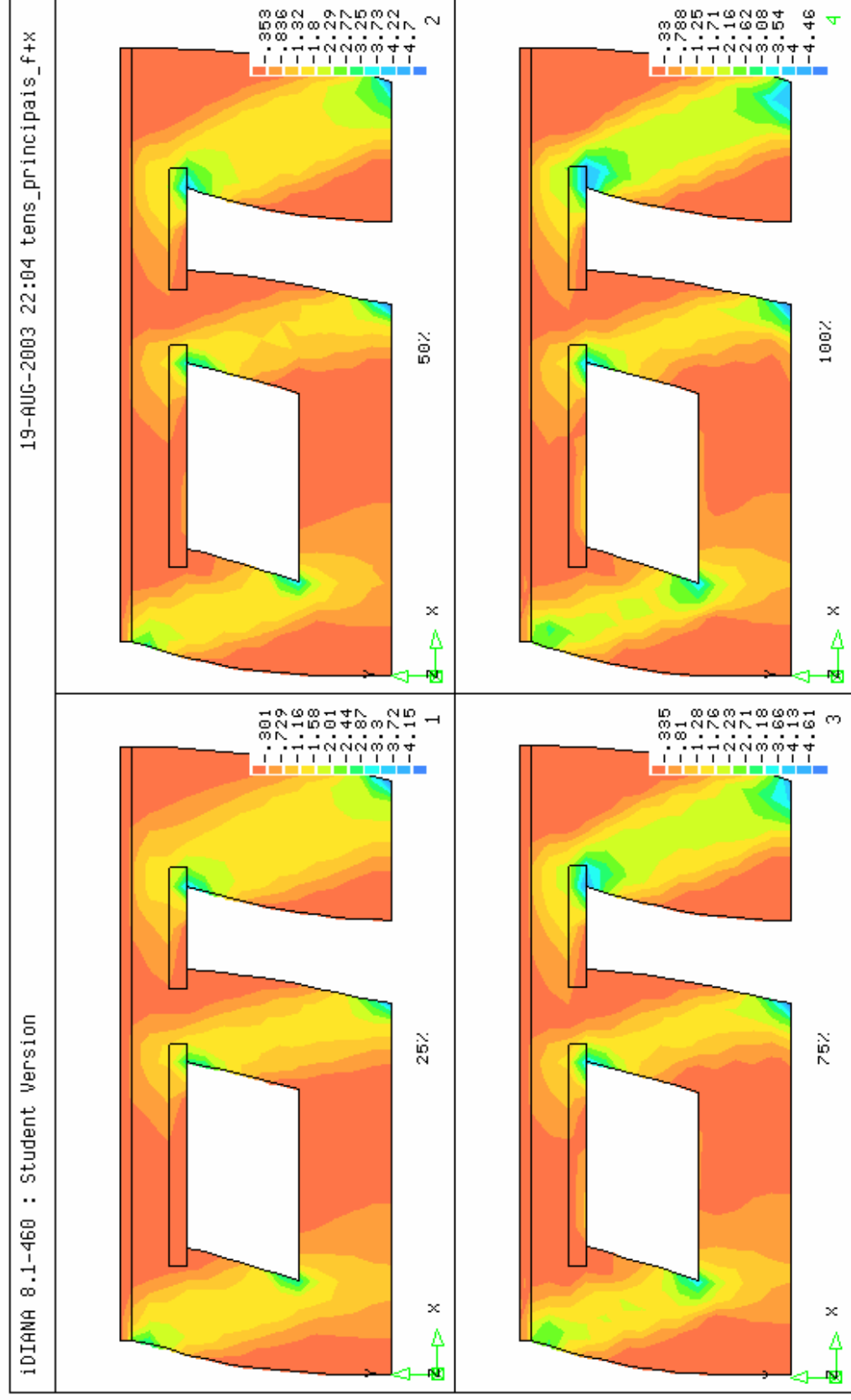


Figura 4:22 - Tensões principais mínimas - Modelo I - F+X - Caso II (N/mm²)

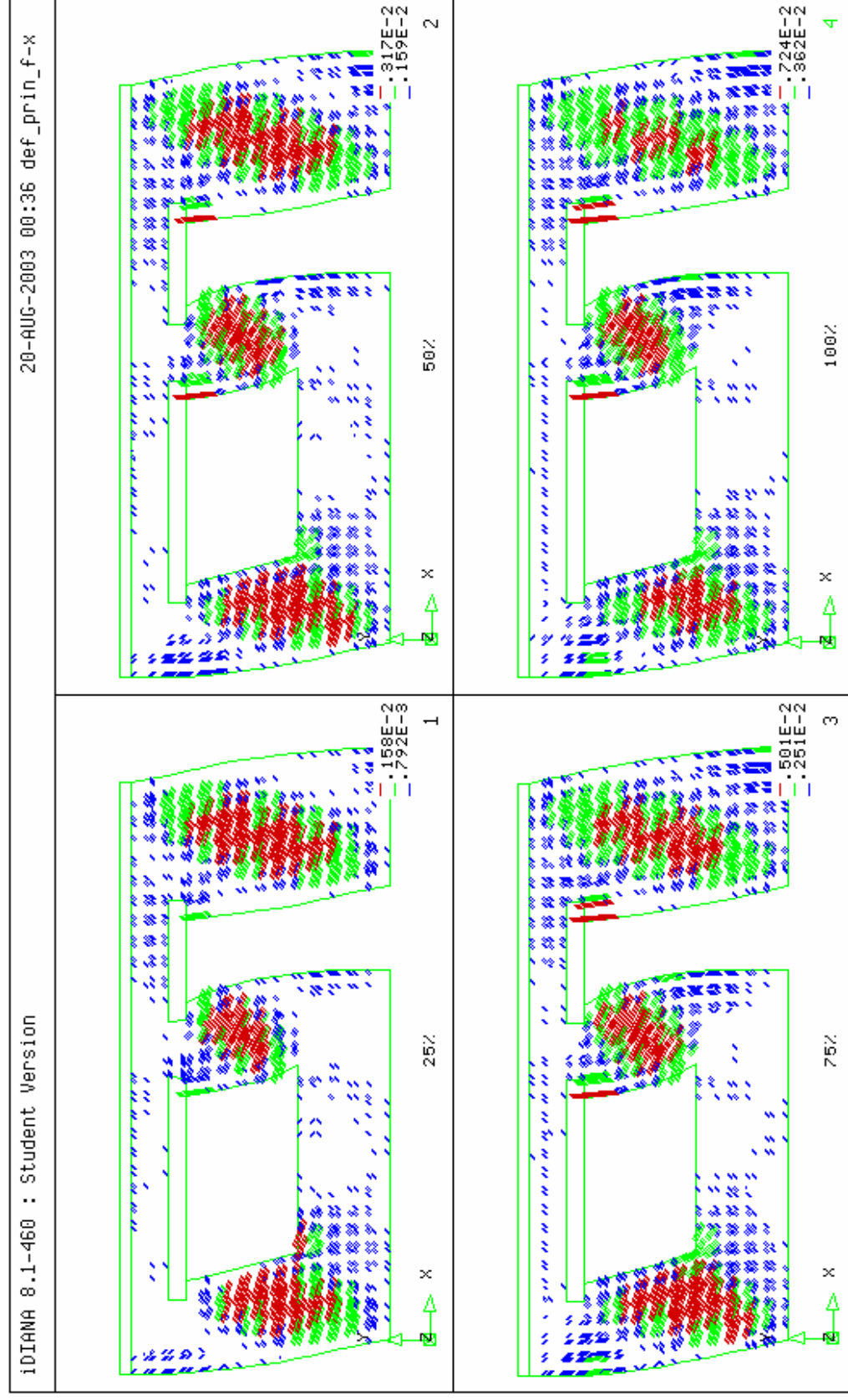


Figura 4:23 - Deformações principais máximas - Modelo I - F-X - Caso II

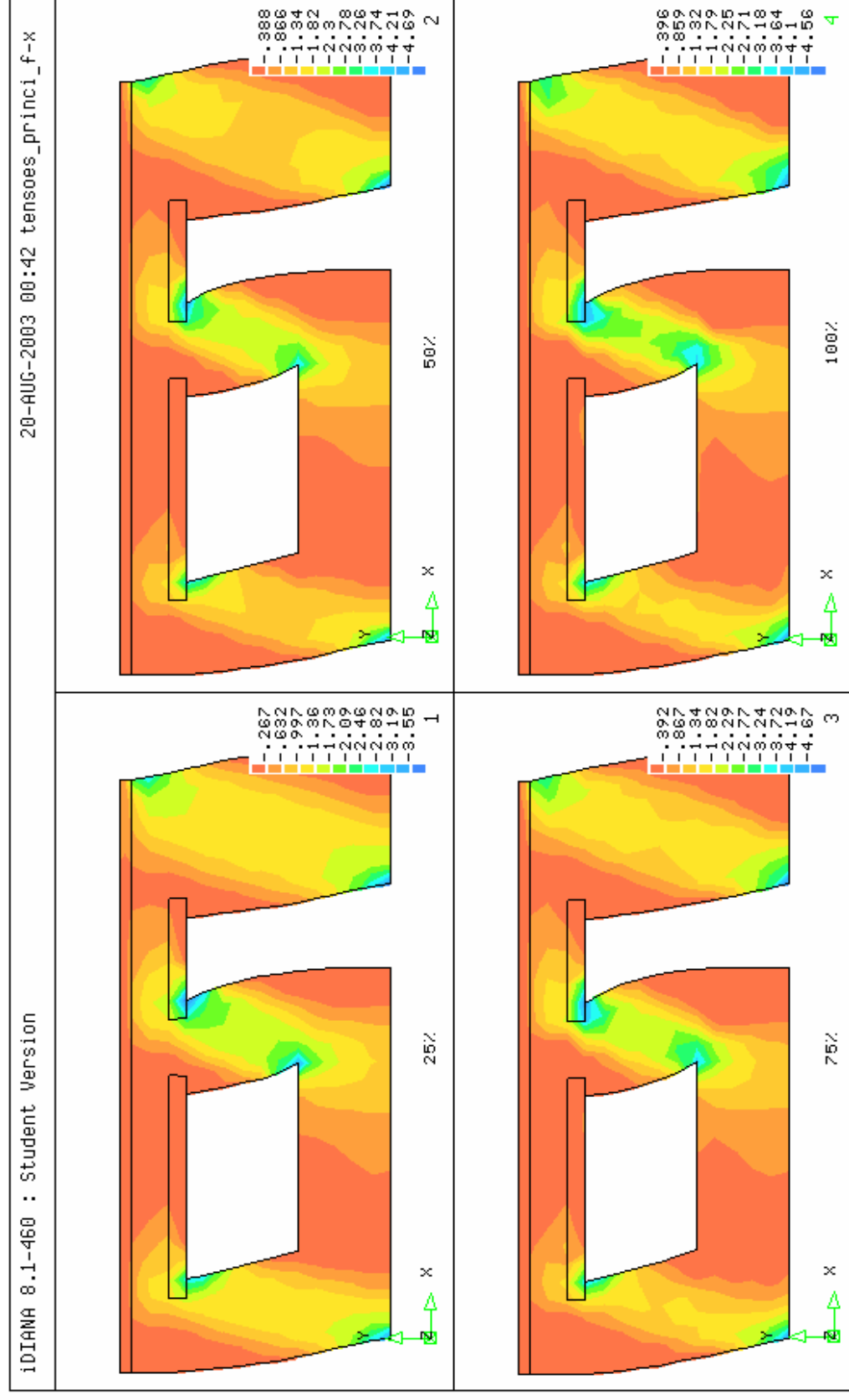


Figura 4:24 – Tensões principais mínimas – Modelo I – F-X - Caso II (N/mm²)

Uma provável explicação para o comportamento estrutural das paredes analisadas, anteriormente discutido, é que o mecanismo de sustentação de cargas muda consoante a direção da força horizontal, mobilizando de forma diferente os diversos membros verticais que compõem a parede e alterando, desta forma, seu comportamento global.

Na Figura 4:22 e na Figura 4:24 é possível observar a diferença de comportamento dos membros verticais para as duas situações de carga estudadas, mais expressiva no membro localizado entre as aberturas, e que se constitui no elemento que concorre de maneira decisiva para a alteração do comportamento global da parede. Estas figuras mostram ainda que não apenas a altura efetiva do membro participa do mecanismo de sustentação de cargas da parede. Outros aspectos relativos ao mecanismo de sustentação de cargas observado serão discutidos nas próximas seções.

Para a condição de carregamento correspondente ao Caso III foi observado comportamento com características similares ao Caso II, para as duas situações de carga estudadas, sendo importante destacar que o acréscimo do nível de pré-compressão concorreu, como era de se esperar, para uma melhora na performance dos modelos, muito embora também tenha seja possível observar um comportamento mais frágil dos modelos estudados quando comparados com aquele correspondente ao Caso II.

As curvas dos diversos modelos apresentadas na Figura 4:16 também exibem um comportamento inicialmente elástico-linear a partir do qual todos os modelos começam a perder rigidez devido ao processo de fissuração que se instala na parede ao longo do processo incremental da força horizontal.

Para a ação da força horizontal segundo a direção +X (parte direita do gráfico da Figura 4:16) observa-se um perfil de comportamento global dos modelos mais similar do que aquele observado para o carregamento correspondente ao Caso II. À exceção dos modelos V e VI, os demais modelos atingiram a força horizontal de pico para uma distorção média de 0,26% (7,28 mm) que é cerca de 40% inferior ao obtido para a condição de carregamento correspondente ao Caso II. Para estes modelos, a força de pico atingida representou, em média, 30% da força de pico obtida para o respectivo modelo sem aberturas e foi inferior em 12% àquela obtida para o Caso II, que foi de 34%. Estes valores atestam a melhora na rigidez de pico experimentada pelos modelos analisados como decorrência do aumento no nível de pré-compressão.

O exame das curvas de degradação da rigidez para ação da força horizontal segundo a direção +X (parte direita do gráfico da Figura 4:17) mostrou, a exemplo do que foi observado para o Caso II, um perfil de comportamento similar dos modelos estudados, sendo possível observar um perfil mais frágil da resposta dos modelos quando comparados com aquele correspondente ao Caso II. Se se comparam as rigidezes de pico dos modelos estudados tendo como paradigma o modelo sólido, pode-se concluir que, a exceção dos modelos V e VI, e de maneira idêntica ao Caso II, também não foi significativa a alteração introduzida pelo desnivelamento das aberturas nos modelos estudados (vê Tabela 4:8). Comparando-se os resultados da Tabela 4:6 e da Tabela 4:8 observa-se que, a exceção dos modelos V e VI, os demais modelos apresentaram praticamente a mesma diferença relativa em suas rigidezes de pico. Já os modelos V e VI exibiram um comportamento diferente sendo observada importante alteração na diferença relativa de suas rigidezes de pico, quando comparadas com os mesmos modelos para o carregamento correspondente ao Caso II.

Modelo	Rigidez de Pico (N/mm)	Diferença Relativa (%)
Sólido	102.688,78	100
Modelo I	32.010,12	-68,83
Modelo I-A	32.046,18	-68,79
Modelo I-B	42.461,26	-58,65
Modelo III	32.148,72	-68,69
Modelo III-A	36.430,83	-64,52
Modelo III-B	34.598,99	-66,31
Modelo V	65.851,03	-35,87
Modelo VI	76.482,21	-25,52

Tabela 4:8 - Comparação das rigidezes de pico dos modelos estudados: Caso III - Dir +X

Para a força horizontal agindo segundo a direção +X, o comportamento pós-pico destes modelos também se mostrou igualmente similar, sendo a distorção última da ordem de 0,40% (11,2 mm) com um coeficiente de variação de 8%.

Os Modelos V e VI exibiram distorção última de 0,28% (7,8 mm) e 0,25% (7,0 mm), respectivamente, que são inferiores em 45% e 39% em relação ao Caso II.

Para a ação da força horizontal segundo a direção -X (parte esquerda do gráfico da Figura 4:16) o comportamento dos diversos modelos é mais similar entre si e as

diferenças que foram observadas entre as direções +X e -X, no Caso II, foram mais suavizadas.

Modelo	Rigidez de Pico (N/mm)	Diferença Relativa (%)
Sólido	102.688,78	100
Modelo I	34.398,68	-66,50
Modelo I-A	35.912,61	-65,03
Modelo I-B	43.003,01	-58,12
Modelo III	50.874,05	-50,46
Modelo III-A	49.405,53	-51,89
Modelo III-B	57.525,08	-43,98
Modelo V	65.851,03	-35,87
Modelo VI	76.482,21	-25,52

Tabela 4:9 - Comparação das rigidezes de pico dos modelos estudados: Caso III - Dir -X

4.4.2 Comportamento Individualizado dos Membros Verticais

O comportamento individualizado dos membros verticais que compõem as paredes de contraventamento estudadas também foi investigado e as figuras a seguir apresentam uma súmula deste comportamento para os modelos I, I-A, I-B, II, III e III-A e carregamento correspondente ao Caso II. Os demais modelos apresentam comportamento similar e os respectivos resultados se encontram em anexo no final deste documento.

As figuras apresentadas contemplam as curvas Força Horizontal x Deslocamento Horizontal para os modelos analisados e para cada membro vertical integrante da parede ao longo de todo o processo de incremento da força horizontal, assim como o perfil de distribuição das tensões de cisalhamento na parede no momento de atingimento da força horizontal de pico.

As forças de cisalhamento em cada um dos membros verticais da parede foram calculadas, em cada incremento da força horizontal, através da integração dos esforços nodais nos elementos que os constituem.

Figura 4:25 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo I - F+X: Caso II

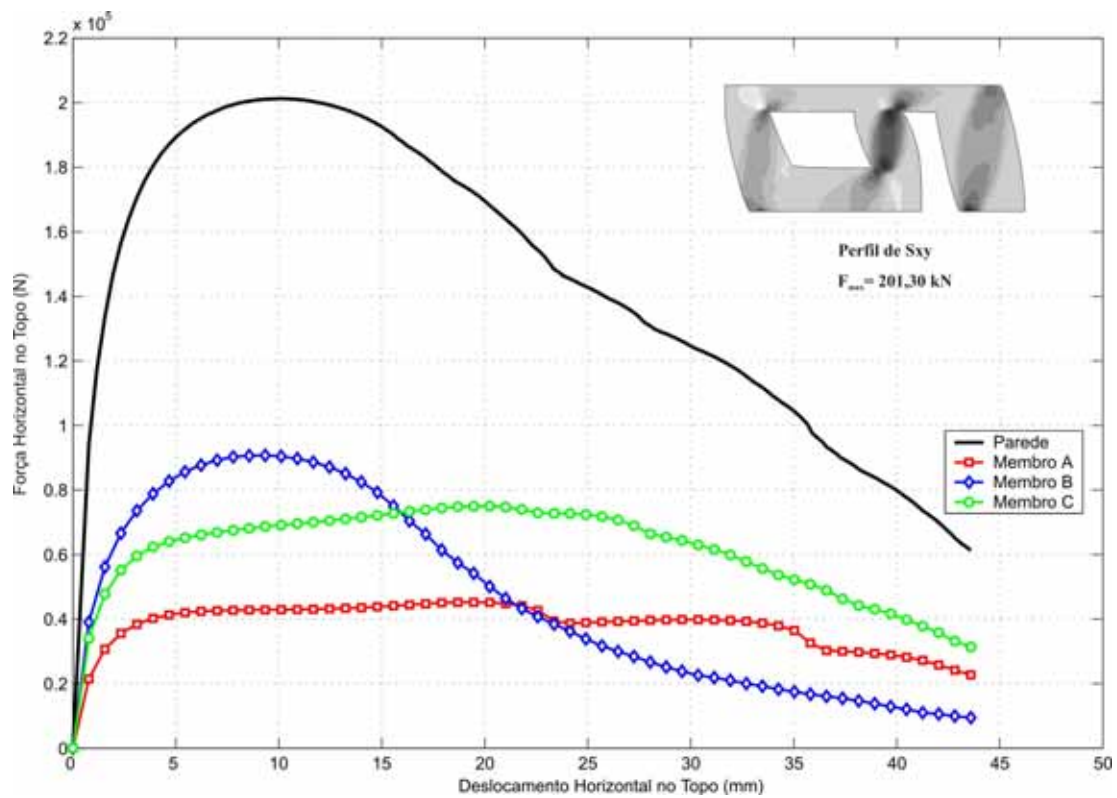


Figura 4:26 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo I - F-X: Caso II

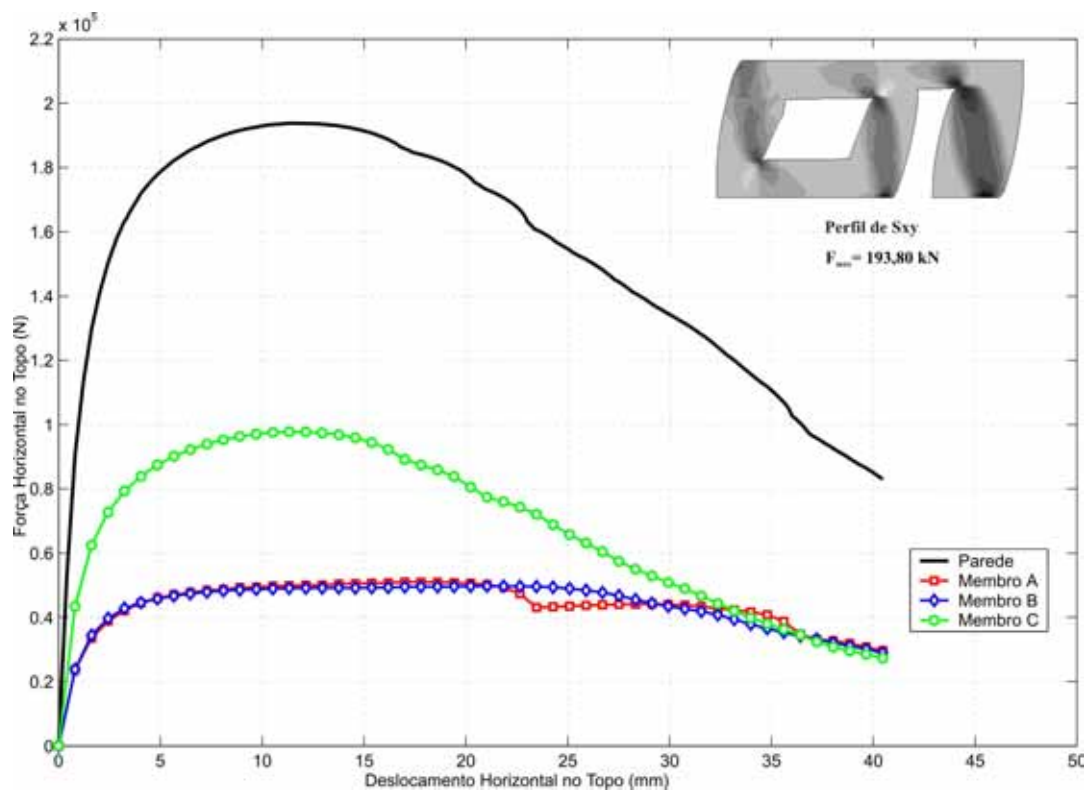


Figura 4:27 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo I-A - F+X: Caso II

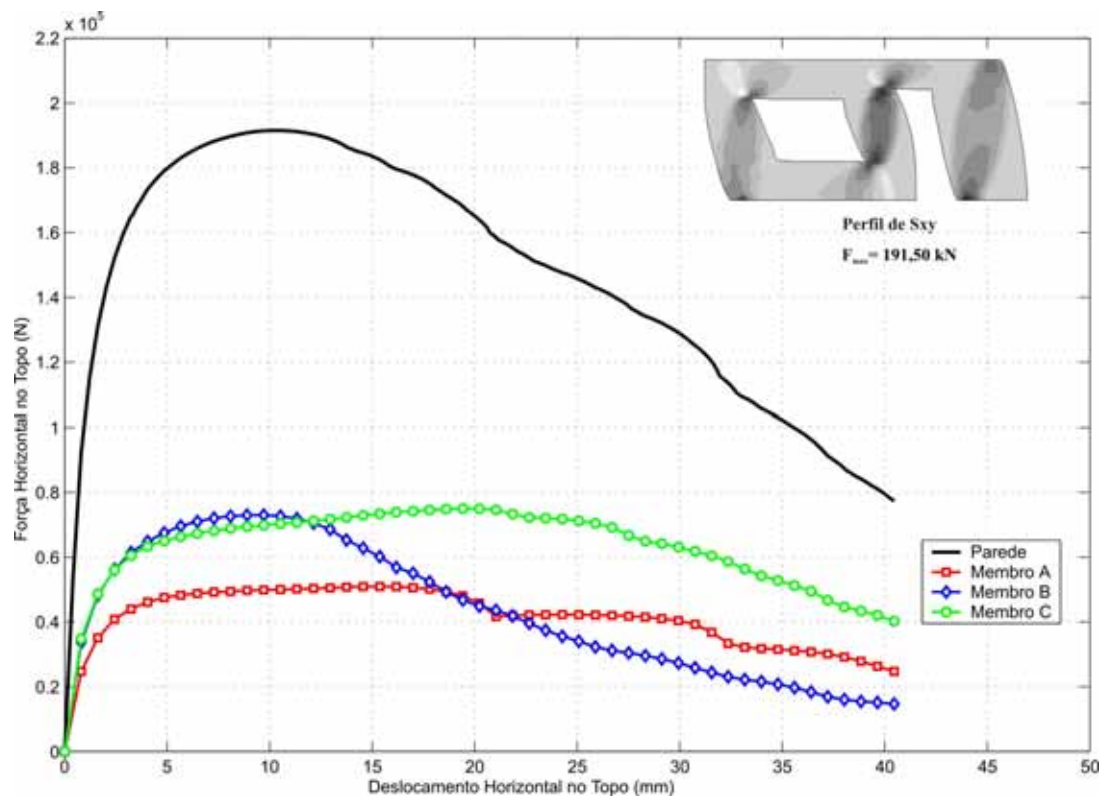


Figura 4:28 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo I-A - F-X: Caso II

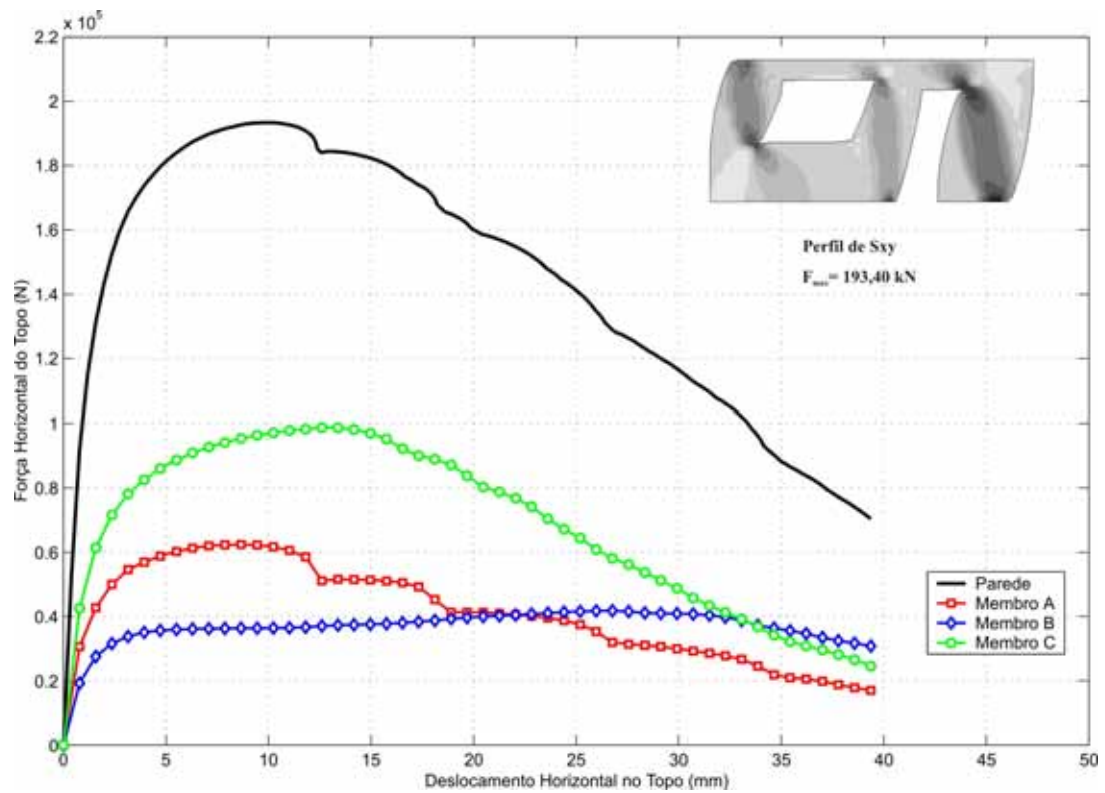


Figura 4:29 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo I-B - F+X: Caso II

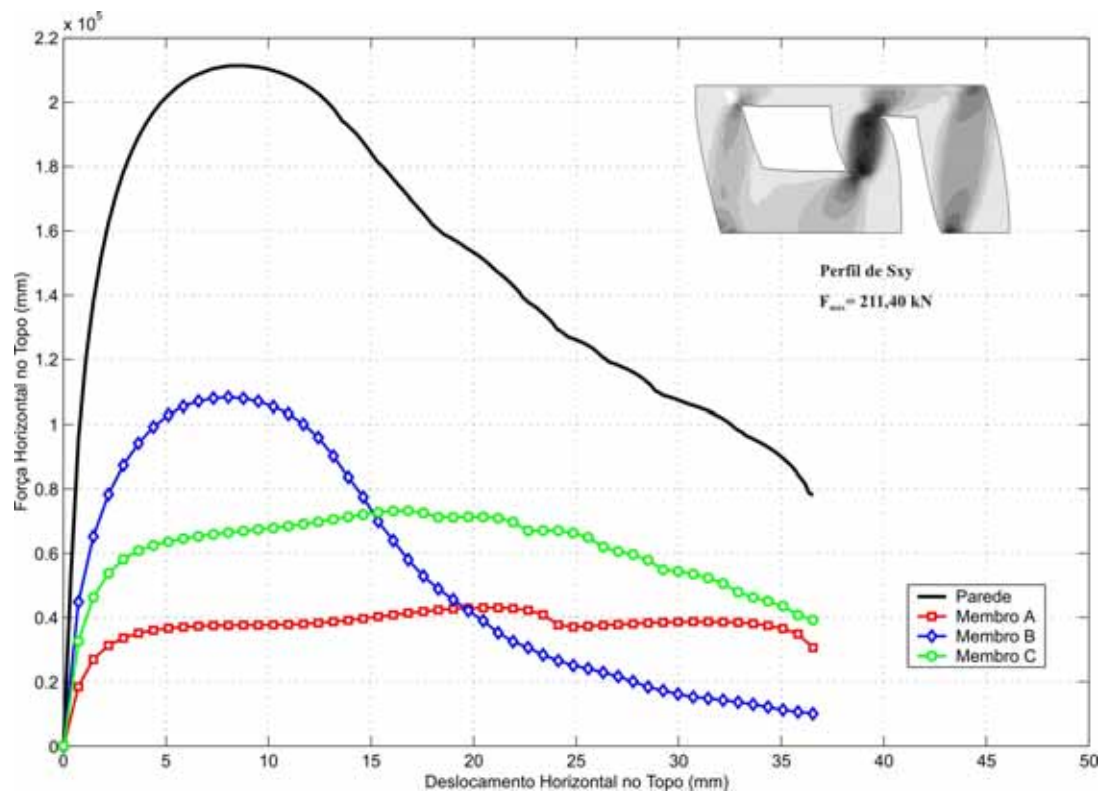


Figura 4:30 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo I-B - F-X: Caso II

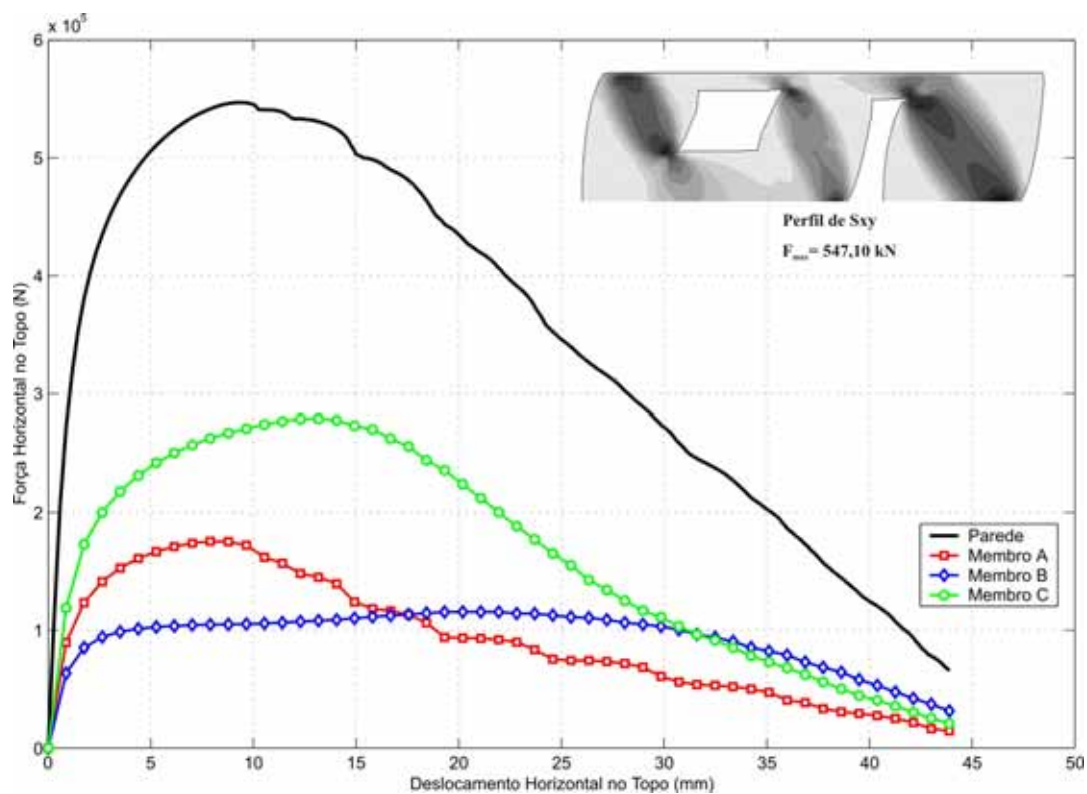


Figura 4:31 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo II - F+X: Caso II

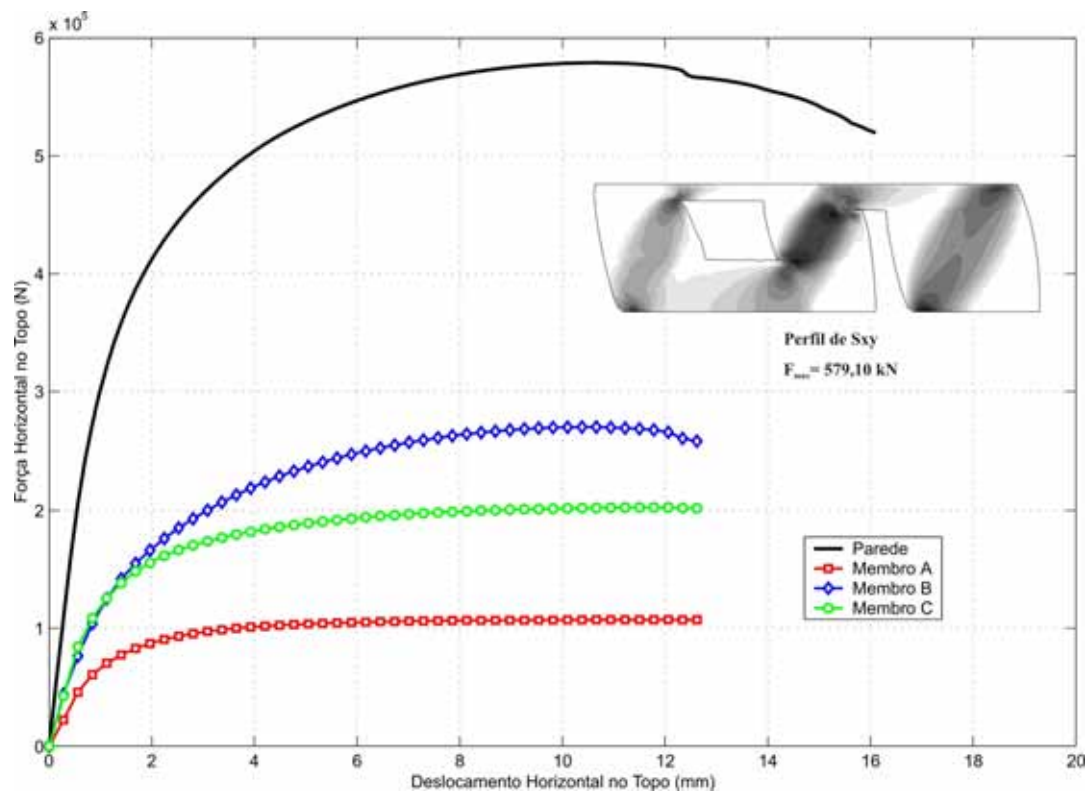


Figura 4:32 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo II - F-X: Caso II

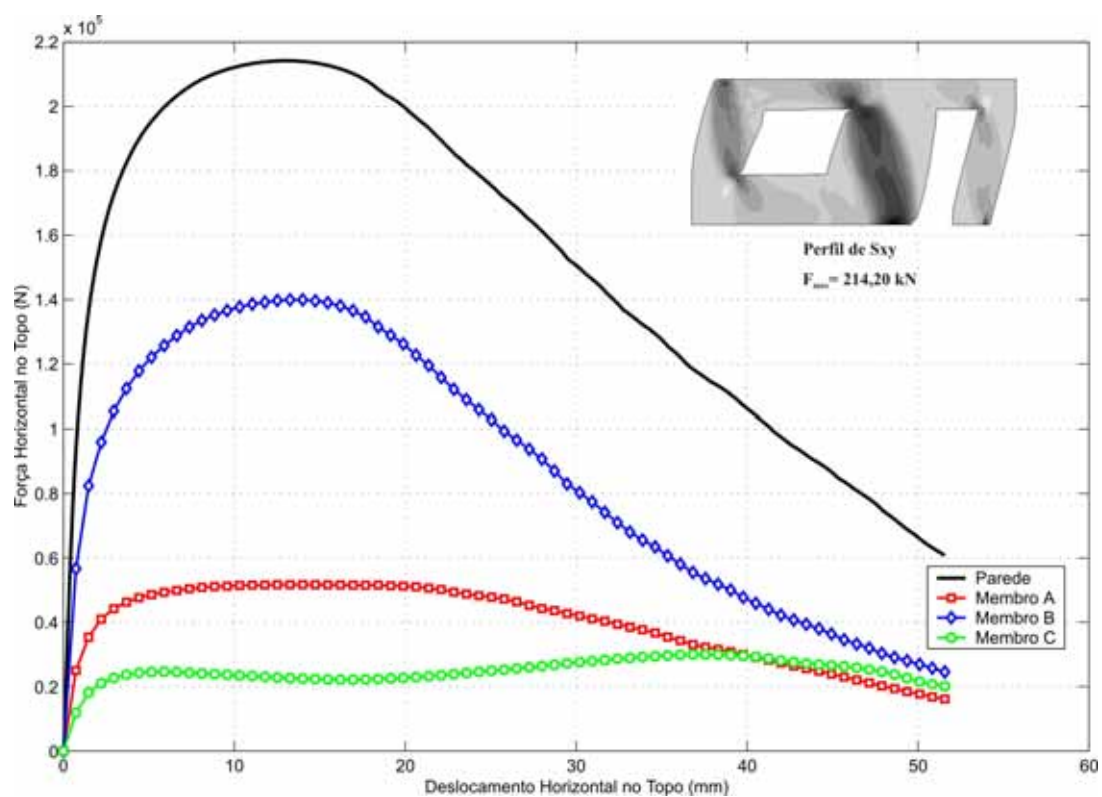


Figura 4:33 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo III - F+X: Caso II

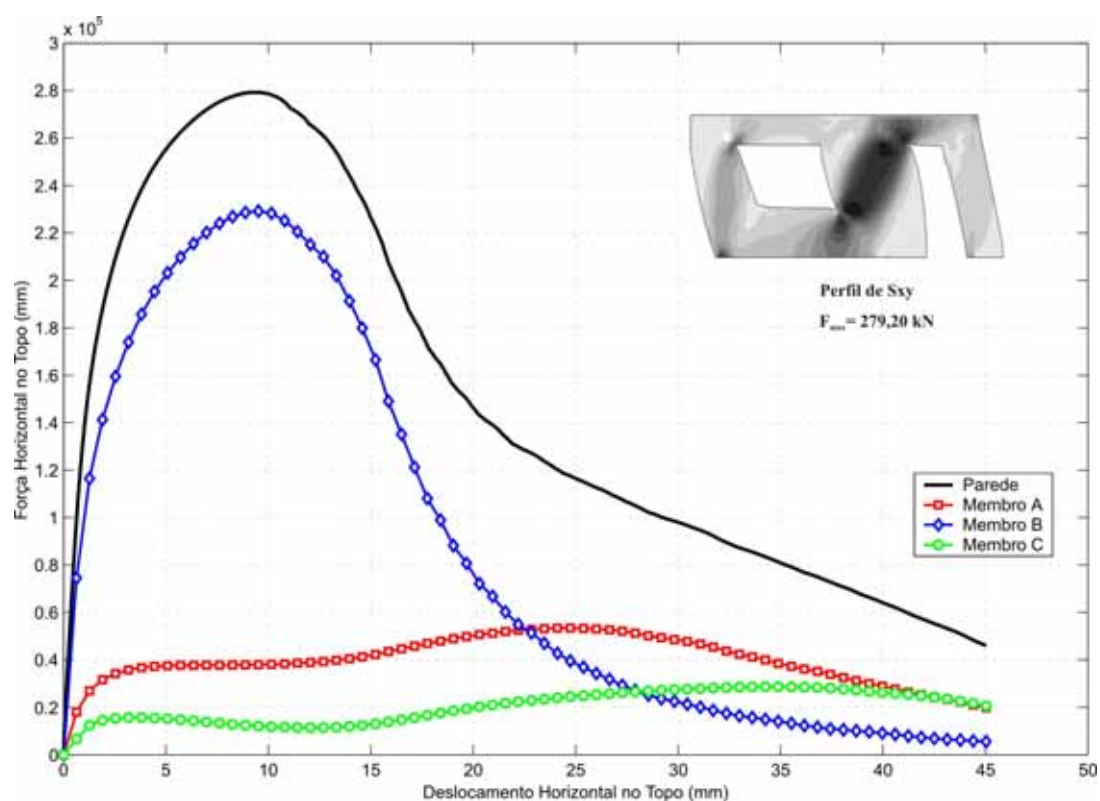


Figura 4:34 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo III - F-X: Caso II

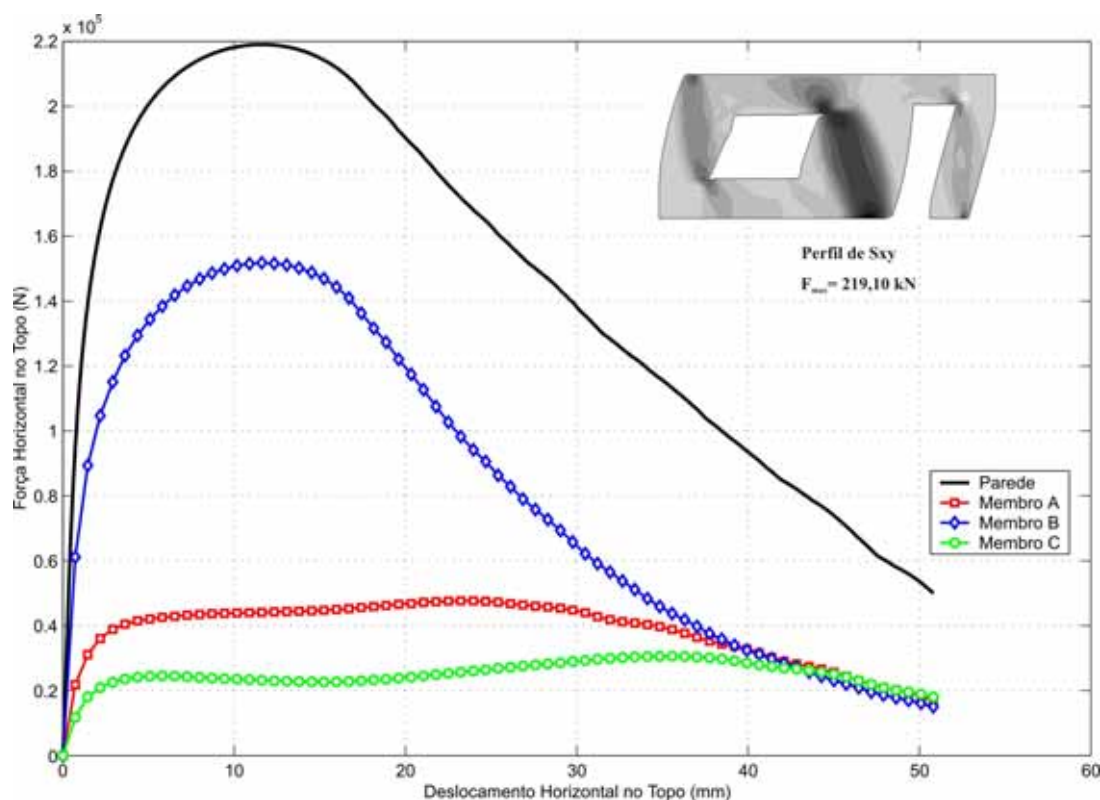


Figura 4:35 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo III-A - F+X: Caso II

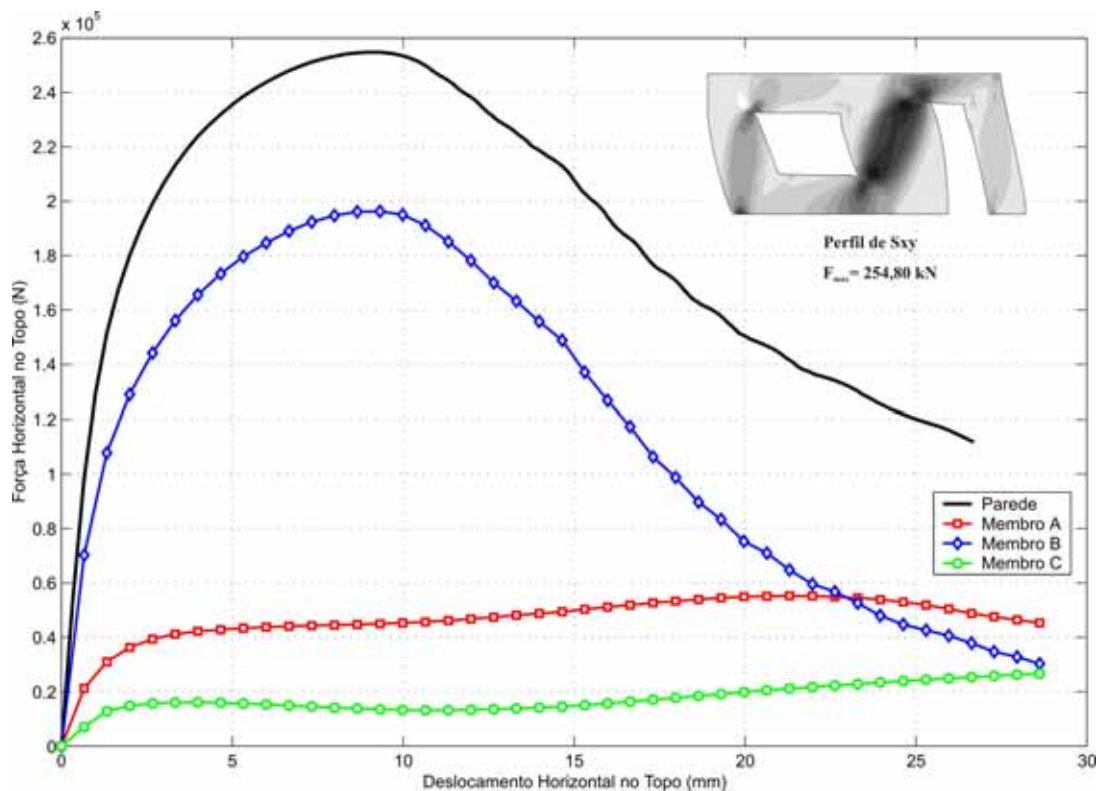


Figura 4:36 - Curva da Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo III-A – F-X: Caso II

Nestas figuras é possível observar que, não obstante as semelhanças observadas no comportamento global das paredes já discutidas anteriormente, importantes diferenças são verificadas no perfil individual de cada membro vertical e, como será visto mais adiante, este comportamento influenciará a magnitude da força horizontal absorvida por cada membro vertical que compõe a parede.

4.4.3 Distribuição da força cortante

A fim de que se possa observar o comportamento individual de cada membro vertical, a distribuição da força horizontal aplicada foi examinada nas seguintes fases de carregamento

- Fase elástica (com hipótese de ação simultânea ou não do carregamento vertical);
- Fase de pico (com valor máximo da força horizontal);
- Fase correspondente à metade da força máxima obtida;
- Fase pós-pico e
- Procedimento clássico - Método III, conforme descrito no Capítulo 3.

A seguir são apresentados os resultados obtidos para os modelos I, I-A, I-B e II para ação da carga lateral segundo a direção $+X$ e $-X$ e Caso II de carga, que são representativos de todos os modelos analisados. Optou-se por expor os resultados destes modelos em forma de gráficos seguidos, ao final, dos comentários críticos pertinentes.

Os gráficos condensam os resultados destes modelos, no que respeita a distribuição da força cortante aplicada entre os diversos membros verticais que compõe a parede de contraventamento analisada nos diversos estágios da força horizontal aplicada, referido anteriormente. As tabelas que justificam os valores a seguir apresentados encontram-se no Anexo B, para todos os modelos analisados.

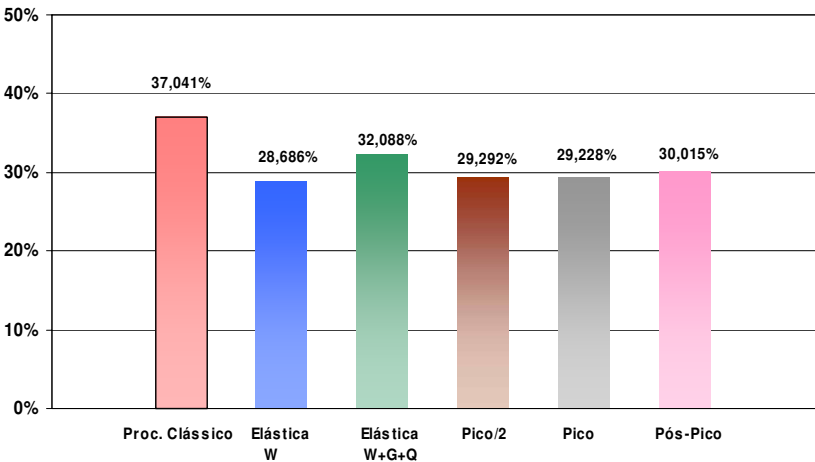


Gráfico 4-1 - Dist. da força horizontal: Mod. I - Caso II: F+X: Mem. A

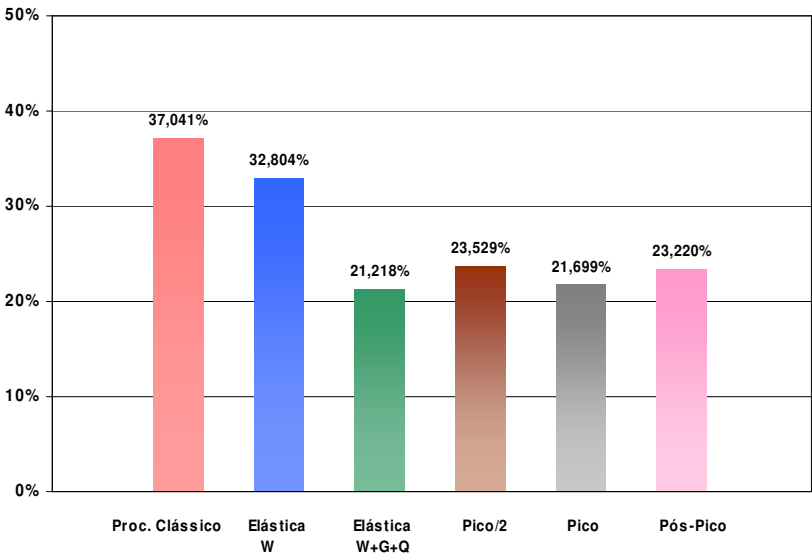
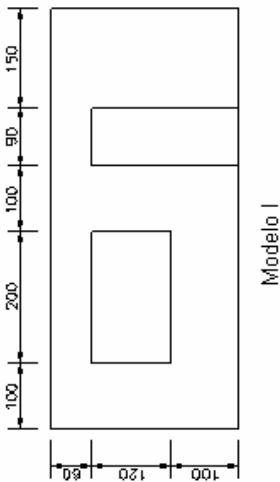


Gráfico 4-2 - Dist. da força horizontal: Mod. I - Caso II: F+X: Mem. B

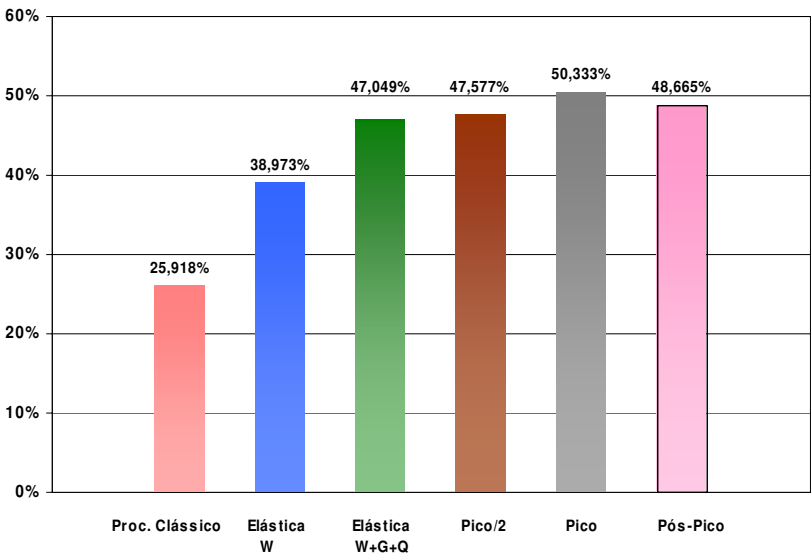


Gráfico 4-3 - Dist. da força horizontal: Mod. I - Caso II: F+X: Mem. C

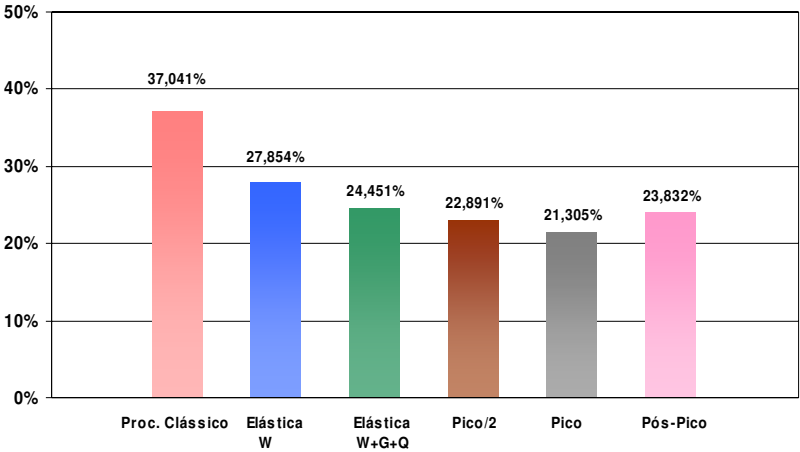


Gráfico 4-4 - Dist. da força horizontal: Mod I - Caso II: F-X: Mem. A

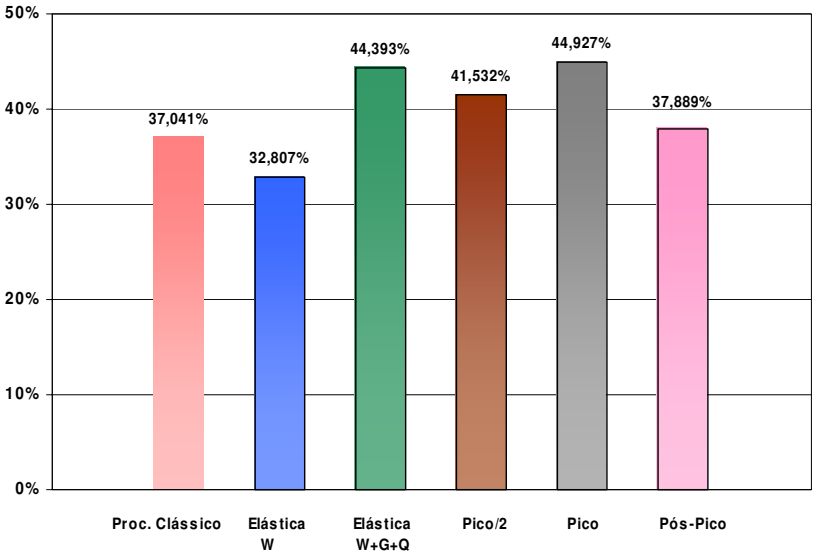
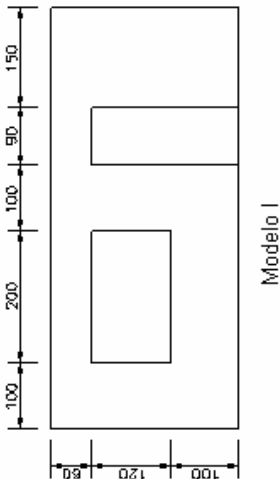


Gráfico 4-5 - Dist. da força horizontal: Mod I - Caso II: F-X: Mem. B

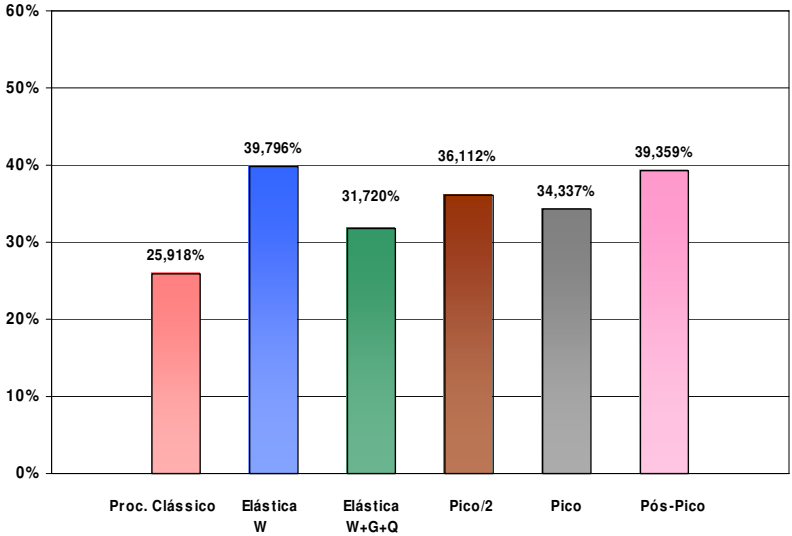


Gráfico 4-6 - Dist. da força horizontal: Mod I - Caso II: F-X: Mem.o C

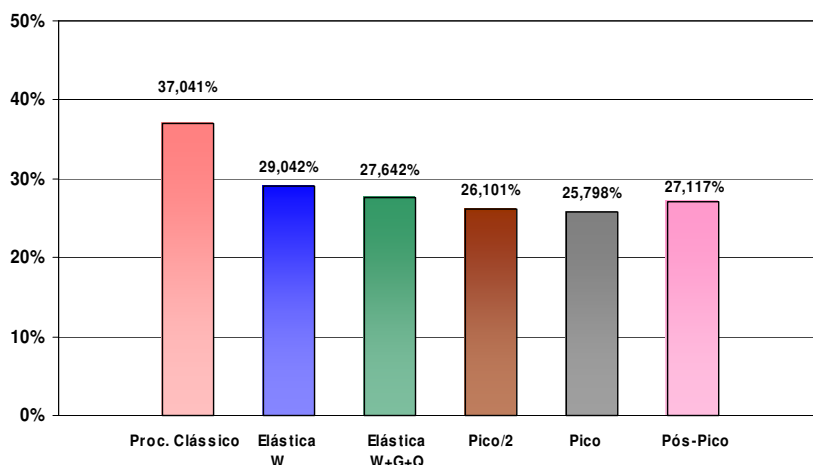


Gráfico 4-7 - Dist. da força horizontal: Mod I-A - Caso II: F+X: Mem. A

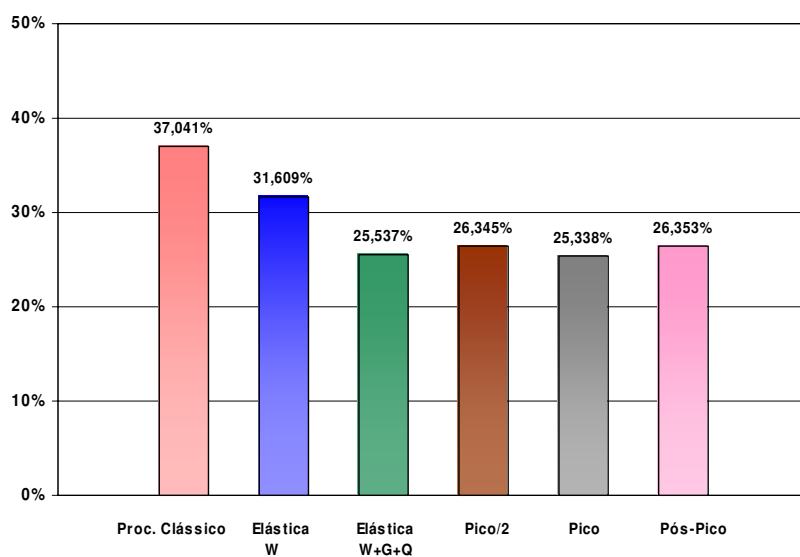
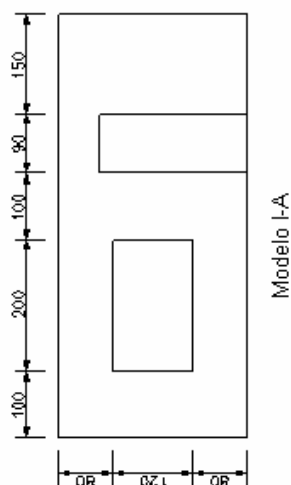


Gráfico 4-8 - Dist. da força horizontal: Mod I-A - Caso II: F+X: Mem. B

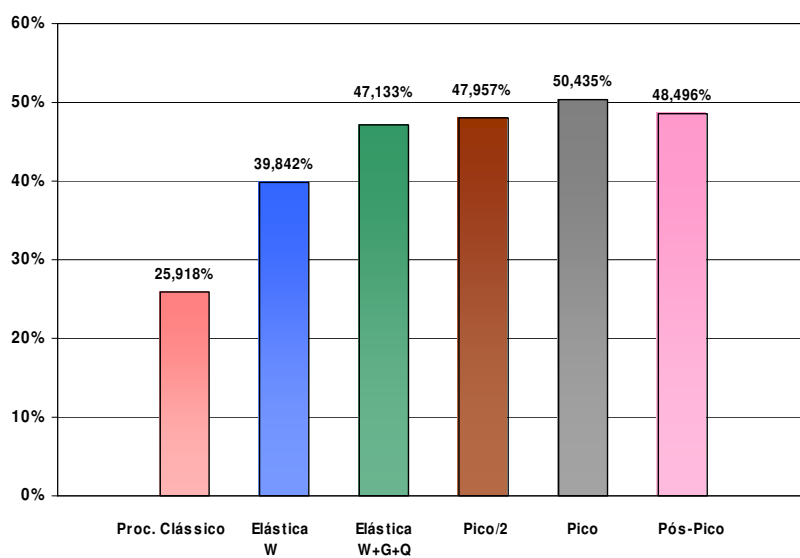


Gráfico 4-9 - Dist. da força horizontal: Mod I-A - Caso II: F+X: Mem. C

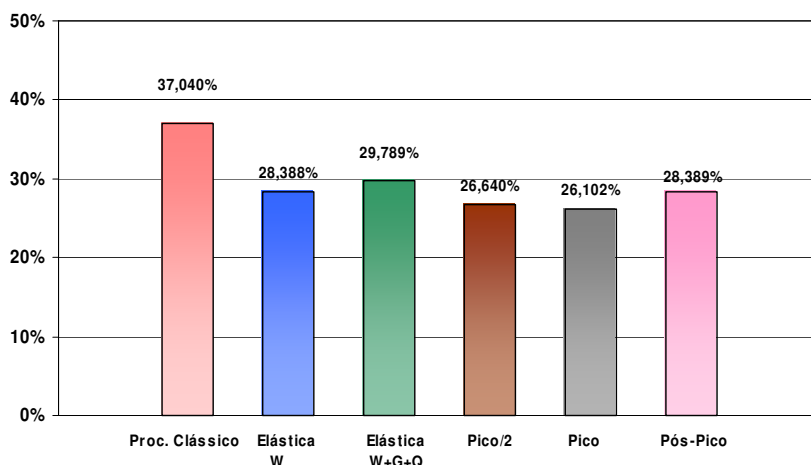


Gráfico 4-10 - Dist. da força horizontal: Mod I-A - Caso II: F-X: Mem. A

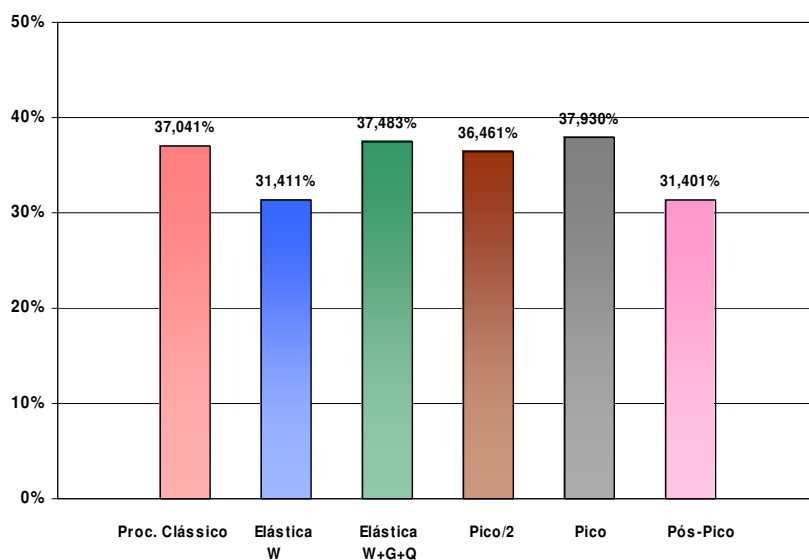
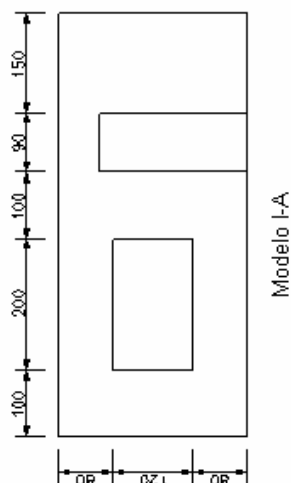


Gráfico 4-11 - Dist. da força horizontal: Mod I-A - Caso II: F-X: Mem. B

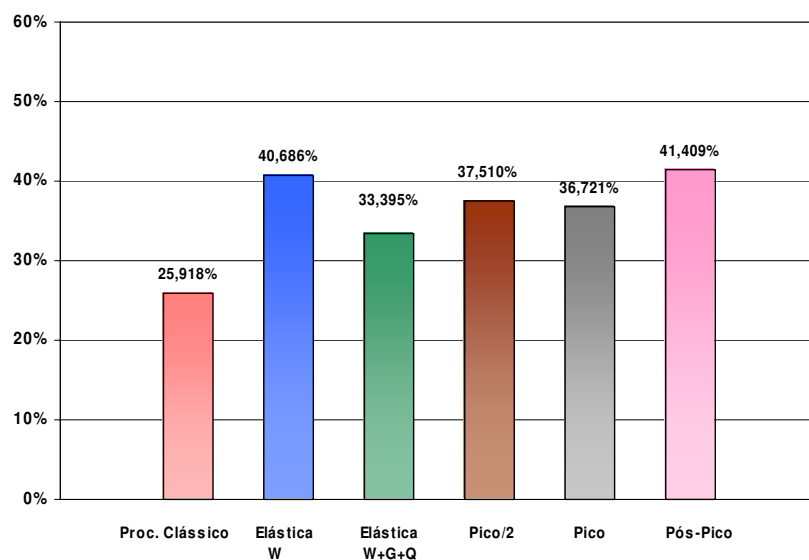


Gráfico 4-12 - Distr. da força horizontal: Mod I-A - Caso II: F-X: Mem. C

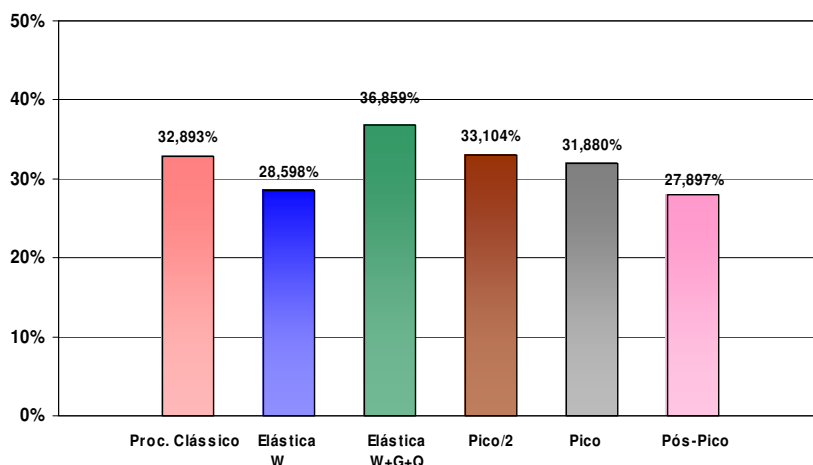


Gráfico 4-13 - Dist. da força horizontal: Mod I-B - Caso II: F+X: Mem. A

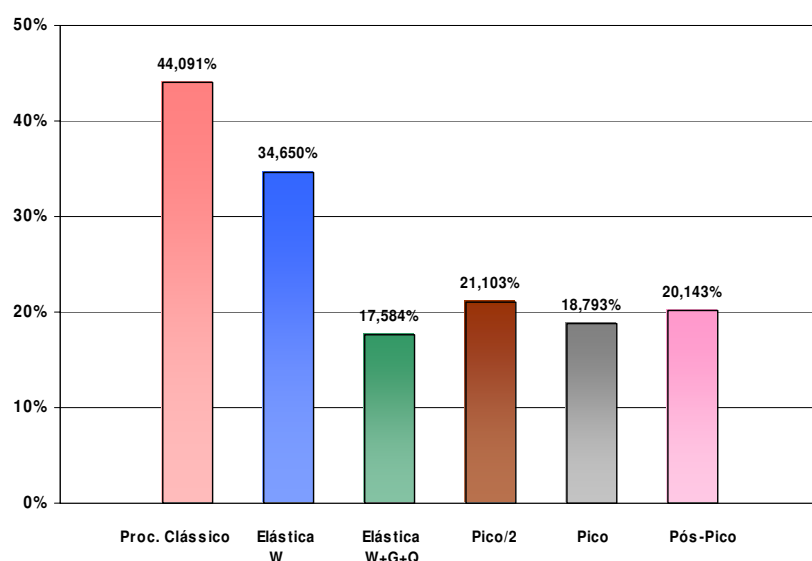
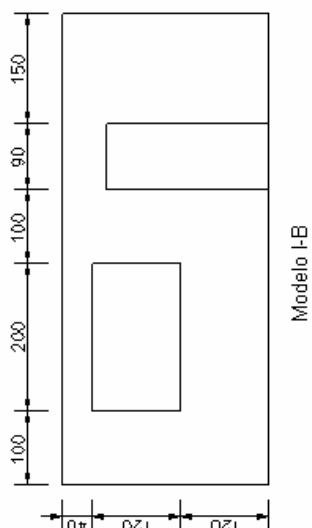


Gráfico 4-14 - Dist. da força horizontal: Mod I-B - Caso II: F+X: Mem. B

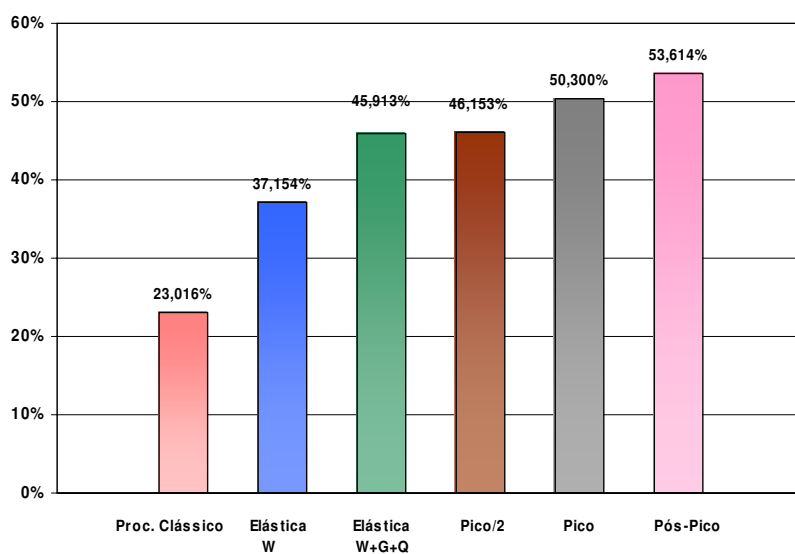


Gráfico 4-15 - Dist. da força horizontal: Mod I-B - Caso II: F+X: Mem. C

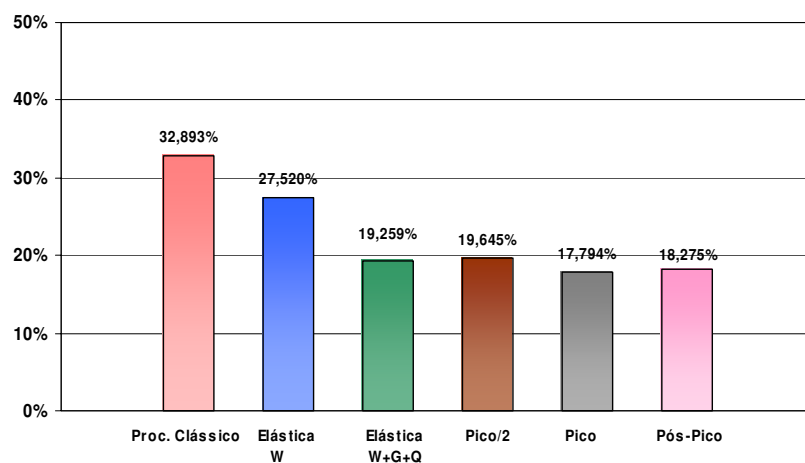


Gráfico 4-16 - Dist. da força horizontal: Mod I-B - Caso II: F-X: Mem. A

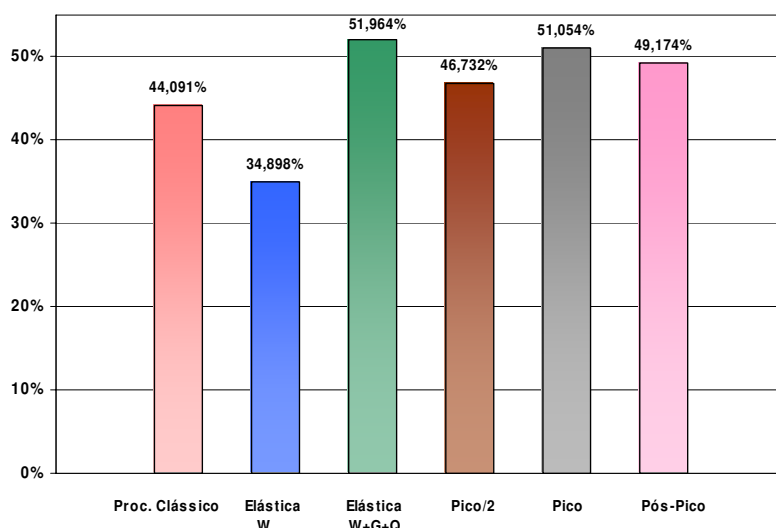
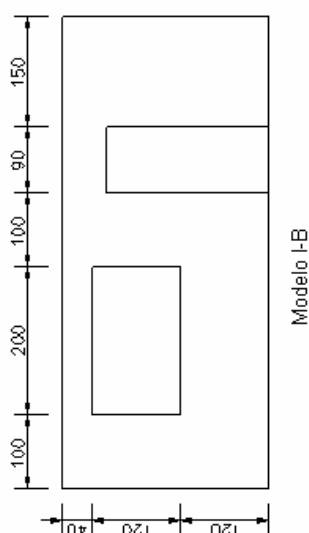


Gráfico 4-17 - Dist. da força horizontal: Mod I-B - Caso II: F-X: Mem. B

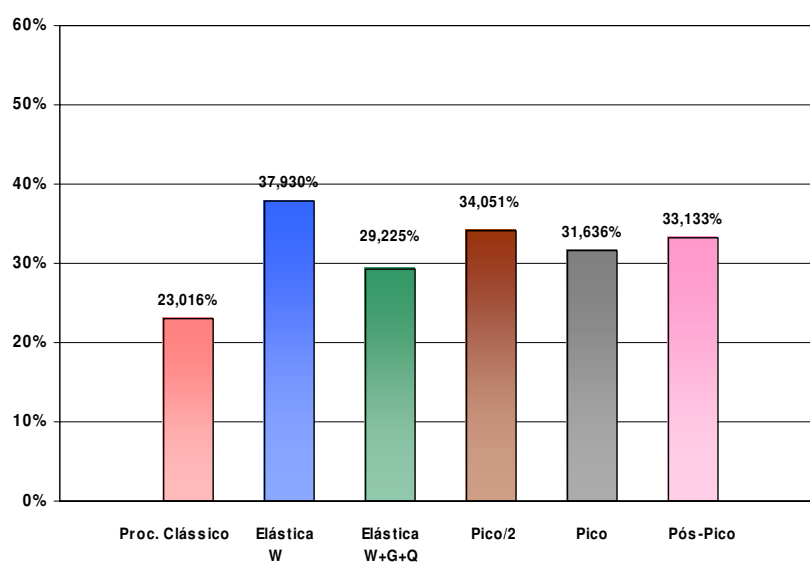


Gráfico 4-18 - Dist. da força horizontal: Mod I-B - Caso II: F-X: Mem. C

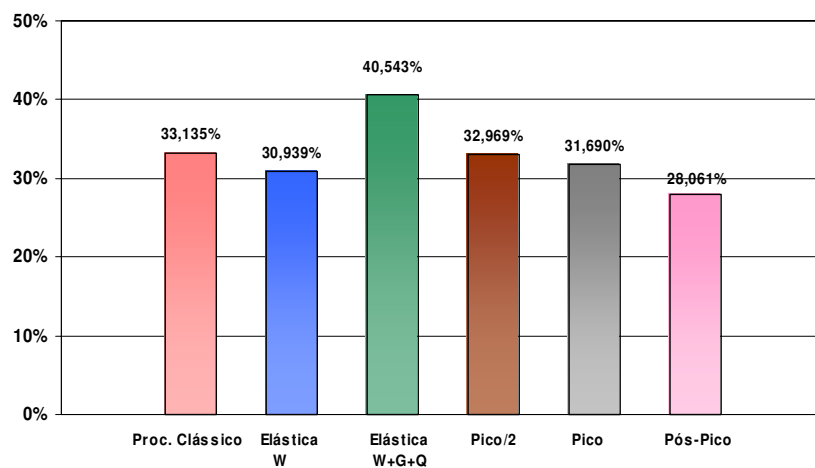


Gráfico 4-19 – Dist. da força horizontal: Mod II – Caso II: F+X: Mem. A

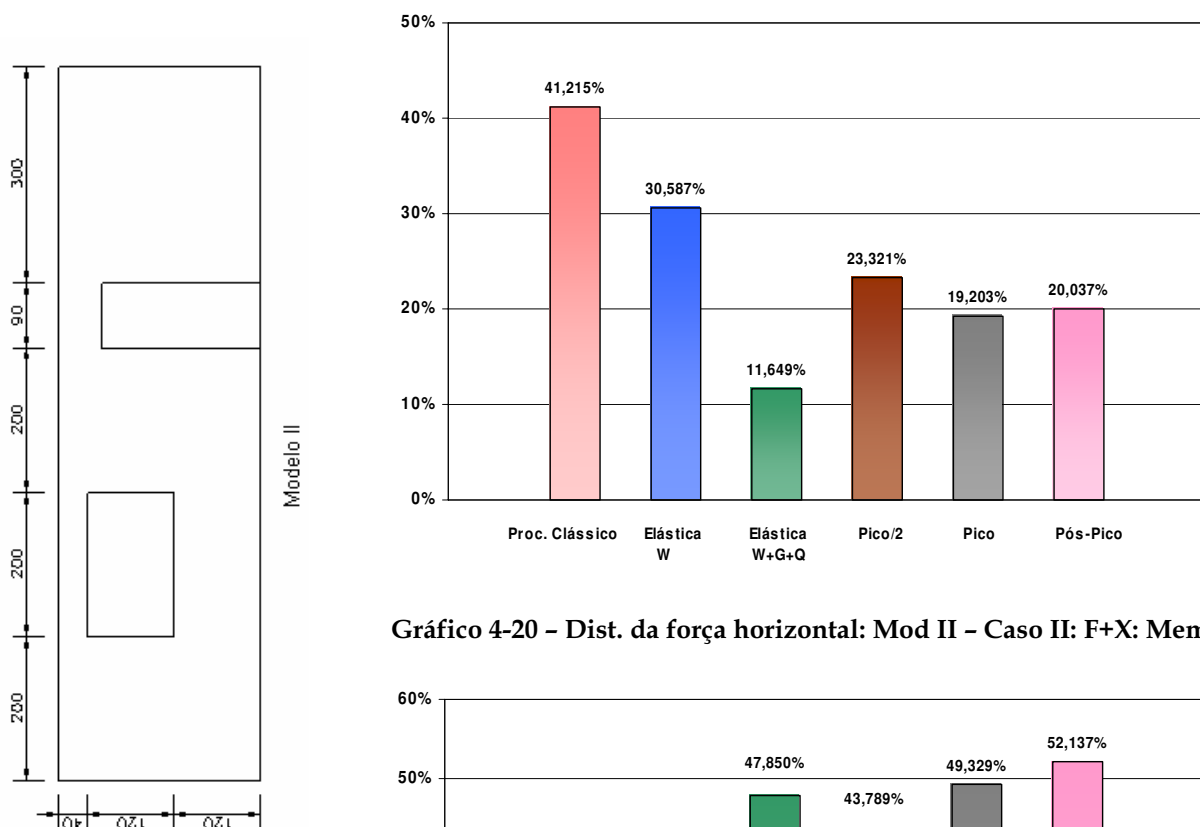


Gráfico 4-20 – Dist. da força horizontal: Mod II – Caso II: F+X: Mem. B

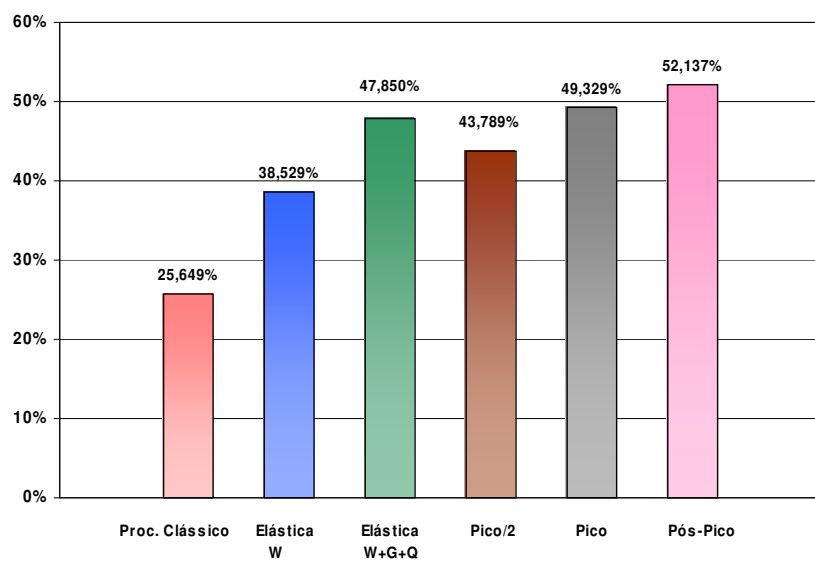


Gráfico 4-21 – Dist. da força horizontal: Mod II – Caso II: F+X: Mem. C

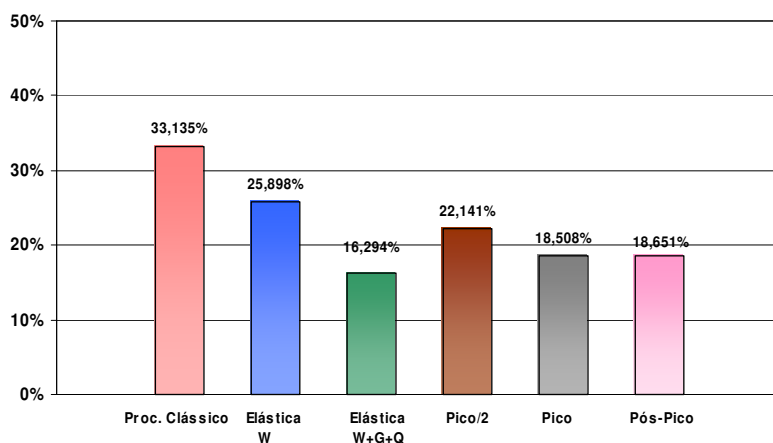


Gráfico 4-22 - Dist. da força horizontal: Mod II - Caso II: F-X: Mem. A

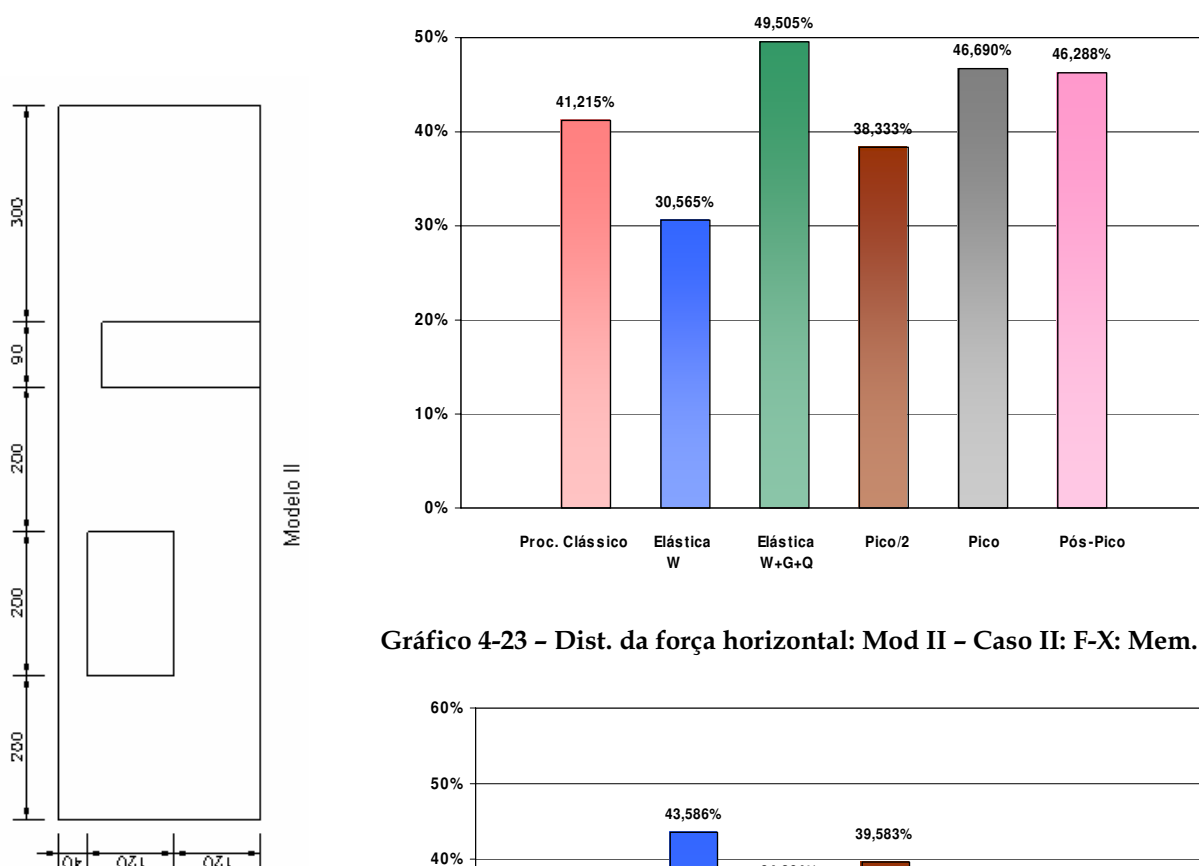


Gráfico 4-23 - Dist. da força horizontal: Mod II - Caso II: F-X: Mem. B

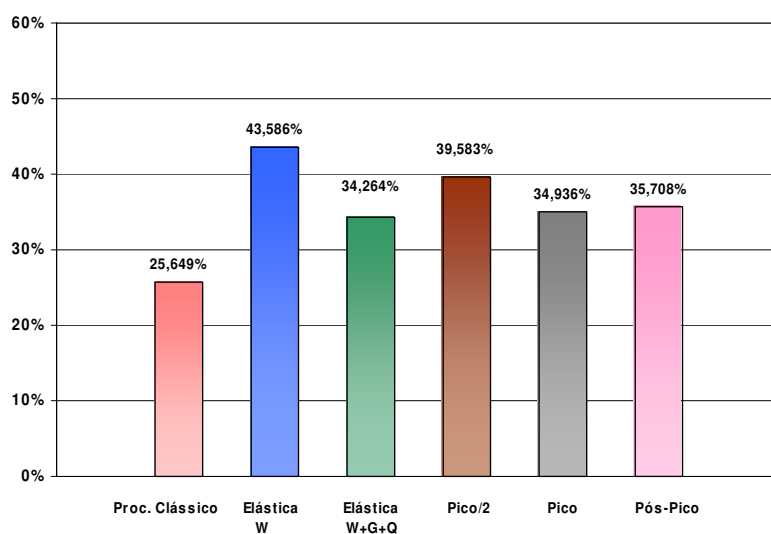


Gráfico 4-24 - Dist. da força horizontal: Mod II - Caso II: F-X: Mem. C

Tendo em vista os resultados apresentados anteriormente pode-se sumarizar a resposta dos Modelos I, I-A, I-B e II da seguinte maneira:

- A utilização do procedimento clássico de apropriação da força cortante, quando comparado com os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos em regime elástico linear, conduziu ora a subestimação ora a superestimação das forças cortantes que solicitam os membros verticais dos modelos analisados. Observou-se ainda que pequenos erros na rigidez dos elementos mais rígidos podem causar importante e inaceitável erro nos elementos menos rígidos da parede, aspecto que se constitui numa insuperável desvantagem da utilização do procedimento clássico;
- Para ação exclusiva da força horizontal segundo +X, a resposta obtida pelo procedimento clássico foi a mesma para os Modelos I, I-A e diferente para o Modelo I-B, que exibiu decréscimo nas forças cortantes nos membros A e C e acréscimo no membro B, quando cotejados com o Modelo I na fase elástica;
- Foi observada redistribuição das forças cortantes que solicitam os membros verticais em todos os modelos analisados. Tomando-se como aproximação os resultados do Método dos Elementos Finitos em regime elástico e para ação simultânea do carregamento permanente, accidental e da força lateral, a maior redistribuição observada foi de 32,18% na fase de pós-pico no membro C do Modelo III-A:F-X (Gráfico 8:12);
- As forças cortantes nos membros A, B e C dos Modelos I, I-A e I-B para ação exclusiva da força horizontal segundo +X, na fase elástica, pelo Método dos Elementos Finitos são similares entre si, sendo que a diferença máxima observada com relação ao modelo com aberturas niveladas se deu no membro B do Modelo I-B, mas não superou 6%. Este comportamento indica que não houve significativa alteração de comportamento decorrente da introdução de desnivelamento entre as aberturas pelo MEF. Deve-se registrar, entretanto, que a resposta do MEF foi diferente daquela obtida pelo procedimento clássico. Em todos estes modelos foi observada subestimação da força cortante no membro C, quando se comparam os resultados do MEF com o procedimento clássico, sendo que aquela exibida no Modelo I-B (-38,05%) foi mais expressiva do que aquela exibida pelo Modelo I-A (-34,95%), quando comparada com o Modelo I (-33,5%). Nestes mesmos modelos foi sempre observada, ainda,

superestimação da força cortante no membro A, quando se comparam os resultados do MEF com o procedimento clássico, mas sempre menores do que aquela presente no Modelo I (29%), sendo aquela exibida no Modelo I-B (15%) inferior àquela exibida no Modelo I-A (27,5%). Idêntico comportamento foi observado para o membro B, só que agora as superestimações dos Modelos I-A e I-B foram superiores àquela exibida no Modelo I (12,9%), sendo aquela constante no Modelo I-B (27%) superior àquela observada no Membro A (17%). Estes resultados realçam a ineficácia da distribuição da força cortante pelo procedimento clássico, quando comparada à distribuição realizada pelo MEF;

- Quando se comparam as forças cortantes nos membros A, B e C nos Modelos I-B e II para ação da força horizontal segundo +X verificou-se que, pelo procedimento clássico, há um acréscimo de 11,4% na força cortante do membro C, redução de 6,5% na força no membro B e quase nenhuma alteração no membro A. No MEF também foi observado um incremento, porém discreto, na força cortante no membro C (3,7%), redução mais acentuada da força cortante no membro B (11,7%) e incremento de 8% na força cortante no membro A, valores que caracterizam a interferência gerada pela duplicação dos comprimentos dos membros do Modelo II em relação ao Modelo I-B, tanto pelo procedimento clássico quanto pelo MEF;
- Quando se comparam os resultados obtidos para ação simultânea da força horizontal segundo + X e carregamento vertical nos Modelo I, I-A e I-B na fase elástica, os resultados obtidos pelo procedimento clássico para cada um destes modelos não se alteram em relação à atuação isolada da força horizontal, uma vez que neste procedimento não se leva em conta a existência de pré-compressão;
- Esta não é, entretanto, a situação que se observou nas análises do MEF, na fase elástica, onde se verificou que o nível de pré-compressão alterou de maneira importante a forma como a força horizontal aplicada se distribui entre os membros verticais dos Modelo I, I-A e I-B. Com efeito, foram observadas, no caso de atuação simultânea da força horizontal e carga vertical, acréscimos nas forças cortantes nos membros de até 29% (membro A do Modelo I-B) e decréscimos de até 49% (membro B do Modelo I-B), em relação à atuação isolada da força horizontal, resultados que realçam mais uma vez a ineficácia da distribuição da força cortante pelo procedimento clássico, quando comparadas com as análises do MEF;

- As análises realizadas na fase de atingimento do valor máximo da força horizontal aplicada (fase de pico), sentido +X, dos Modelos I, I-A e I-B mostram que desnivelamento entre as aberturas influenciou na magnitude das forças cortantes que solicitam os membros verticais dos modelos analisados. Com efeito, quando a abertura da janela situa-se abaixo da abertura da porta (Modelo I-A), o membro A absorve uma parcela menor da força horizontal aplicada (-11,7%) e o membro B absorve parcela maior (+16,8%) do que no caso em que as aberturas se acham niveladas. Já no caso em que a abertura da janela se situa acima da abertura da porta (Modelo I-B), há uma inversão neste comportamento e o membro A absorve uma maior parcela da força cortante horizontal aplicada (+9,1%) e o membro B absorve parcela menor desta força (-13,4%), quando comparados com o modelo com aberturas niveladas (vê Gráfico 4-1, Gráfico 4-7 e Gráfico 4-13; Gráfico 4-2, Gráfico 4-8 e Gráfico 4-14; Gráfico 4-3, Gráfico 4-9 e Gráfico 4-15). O Modelo II, que conta comprimento dos membros verticais duplicados em relação ao Modelo I-B, apresentou uma distribuição da força cortante similar àquele modelo, aspecto que aponta para a pouca influência do comprimento dos membros verticais na parcela da força cortante que o solicita (parece mais importante sua altura). Um aspecto que chama a atenção nestes modelos é que o desnivelamento entre as aberturas quase não interferiu na magnitude da força cortante que solicita o membro C. Este comportamento pode estar relacionado com a massa de alvenaria que existe sobre o membro C que não muda com o desnivelamento das aberturas, contrariamente ao que ocorre com os membros A e B. Na fase de pico, o mecanismo de sustentação de cargas de todos os modelos analisados sempre se deu através da formação das bielas comprimida segundo as diagonais dos membros, conforme se pôde observar em todas as figuras já apresentadas anteriormente. Este mecanismo tem uma lógica de formação que é recorrente na totalidade dos modelos ensaiados independente, inclusive, do sentido de atuação da força horizontal e do nível de pré-compressão, conforme se pode verificar nas figuras que integram o Anexo B. O procedimento clássico não tem aplicabilidade para o cálculo da distribuição da força horizontal na fase de pico, pois baseia-se nas propriedades geométricas da seção não fissurada que não se verifica nesta fase de carregamento, mas se se comparam a distribuição na fase de pico com a distribuição na fase elástica, ambas pelo MEF, percebe-se que distribuição da força cortante entre os membros advinda da atuação

simultânea da força horizontal segundo +X e carga vertical se assemelha mais à distribuição na fase de pico para estes modelos;

- O comportamento na fase de $F_{max}/2$ e de pós-pico dos membros verticais dos modelos I, I-A, I-B e II se mostrou similar ao comportamento na fase de pico;
- A parcela da força cortante aplicada que solicita cada membro vertical destes modelos, apropriada pelo MEF, variou consoante o sentido de aplicação desta força (+X ou -X). Na fase elástica e para ação exclusiva da força horizontal a alteração na parcela da força cortante de cada membro, em virtude da alteração no sentido da força horizontal, foi discreta em todos os modelos, exceção feita ao Modelo II que apresentou acréscimo de 13% no membro C e decréscimo de 16,3% no membro A, comparada a distribuição para ação da força horizontal segundo +X. O membro B quase não sofreu alteração da força cortante que o solicita com a alteração do sentido de atuação da força horizontal. Pelo procedimento clássico, não há alteração na distribuição da força cortante para cada membro em função da alteração no sentido de atuação da força horizontal;
- Para ação simultânea da força horizontal e do carregamento vertical, também foi observada, pelo MEF, alteração de comportamento com relação à mudança no sentido de atuação da força horizontal, só que com maior expressão do que aquela observada quando atua isoladamente a força horizontal. No Modelo I, observou-se redução na parcela da força cortante nos membros A e C, 23,8% e 32,58%, respectivamente e acréscimo de mais de 100% na parcela da força cortante no membro B. No Modelo I-A foi observada redução da força cortante no membro C (29,15%) e incremento nos membros A e B, 7,8% e 46,78%, respectivamente. O Modelo I-B exibiu um comportamento com tendência similar ao Modelo I (redução da parcela da força cortante nos membros A e C e acréscimo no membro B), só que com variações mais expressivas (47,75% e 36,35%, respectivamente), sendo notável o incremento de quase 200% na parcela da força cortante que solicita o membro B, quando comparada a distribuição para ação da força horizontal segundo +X. O Modelo II apresentou comportamento com tendência similar ao Modelo I-B, exibindo redução na força cortante que solicita os membros A e C e acréscimo no membro B, quando comparado com a distribuição para ação da força horizontal segundo +X. Os valores obtidos são, entretanto, superiores aos observados para o Modelo I-B, a exceção do membro C. Pelo procedimento clássico, não há alteração na distribuição da força cortante para cada

membro em função da alteração no sentido de atuação da força horizontal nem da existência de pré-compressão, o que o torna inaplicável nesta situação de carga. Nos modelos analisados foi observada subestimação, com relação ao MEF, de até 49% (membro C do Modelo I-B) e superestimação de até 253% (membro B do Modelo II na força cortante nos membros verticais, caso fosse utilizado o procedimento clássico para a distribuição da força horizontal aplicada;

- Se se comparam a distribuição da força cortante na fase de pico para os Modelos I, I-A, I-B e II para ação da força horizontal segundo +X e -X observam-se importantes mudanças no perfil desta distribuição com a alteração no sentido de atuação da força horizontal, sendo importante ressaltar, inclusive, a alteração no membro vertical que se acha mais solicitada nos modelos analisados. Com efeito, quando a força horizontal atua segundo +X, o membro que recebe maior parcela da força horizontal aplicada foi sempre o membro C (em todos os modelos), ao passo que quando a força atua segundo a direção -X o elemento mais solicitado foi sempre o membro B. A maior alteração na força cortante no membro B se deu no Modelo I-B e representou um acréscimo de mais 170% na força cortante naquele membro, quando se altera o sentido de atuação da força horizontal de +X para -X. Os resultados obtidos ressaltam a importância no sentido de atuação da força horizontal no processamento de sua distribuição entre os diversos membros verticais que integram a parede;
- O comportamento na fase de $F_{max}/2$ e na fase de pós pico dos membros verticais dos modelos I, I-A, I-B e II, quando se altera o sentido da força horizontal de +X para -X, se mostrou similar ao comportamento na fase de pico, já referido anteriormente;

O mesmo estudo realizado com os Modelos I, I-A, I-B e II, exposto e sumarizado anteriormente, foi aplicado aos Modelos III, III-A, III-B, V e VI para o Caso II de carga e também para todos os modelos para o Caso III de carga. As tabelas, figuras e gráficos pertinentes se acham condensados no Anexo B e a seguir apresentam-se os comentários pertinentes.

- Comportamento com a mesma tendência indicada acima para os Modelos I, I-A e I-B na fase de pico e para ação da força horizontal segundo +X foi observado para estes mesmos modelo no Caso III de carga, para ação da força horizontal segundo +X. Deve

ser destacado que a resistência ao cisalhamento global da parede foi significativamente afetada pelo nível de pré-compressão bem como a distribuição da força horizontal aplicada entre os membros verticais, inclusive para ação da força horizontal segundo - X;

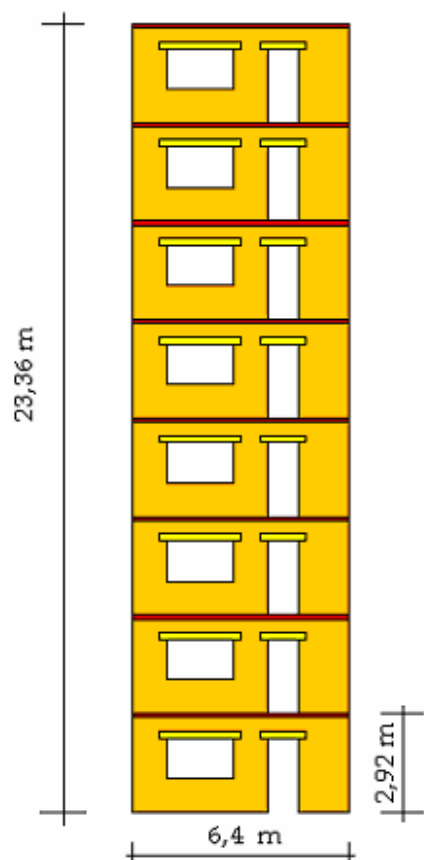
- A localização das aberturas no interior da parede de contraventamento também interferiu na magnitude das forças cortantes que solicitam os diversos membros verticais que a integram em todos os estágios de carga examinados. Esta influência pode ser observada comparando-se, por exemplo, os Modelos I e III (Gráfico 4-1; Gráfico 4-2; Gráfico 4-3; Gráfico 4-4; Gráfico 4-5; Gráfico 4-6 e Gráfico 6:1; Gráfico 6:2; Gráfico 6:3; Gráfico 6:4; Gráfico 6:5; Gráfico 6:6), Modelos I-A (Gráfico 4-7; Gráfico 4-8; Gráfico 4-9; Gráfico 4-10; Gráfico 4-11; Gráfico 4-12 e III-A (Gráfico 6:7; Gráfico 6:8; Gráfico 6:9; Gráfico 6:10; Gráfico 6:11; Gráfico 6:12), Modelos I-B (Gráfico 4-13; Gráfico 4-14; Gráfico 4-15; Gráfico 4-16; Gráfico 4-17; Gráfico 4-18) e III-B (Gráfico 6:13; Gráfico 6:14; Gráfico 6:15; Gráfico 6:16; Gráfico 6:17; Gráfico 6:18), Modelos II (Gráfico 4-19; Gráfico 4-20; Gráfico 4-21; Gráfico 4-22; Gráfico 4-23; Gráfico 4-24) e IV (Gráfico 6:19; Gráfico 6:20; Gráfico 6:21; Gráfico 6:22; Gráfico 6:23; Gráfico 6:24) e Modelos V (Gráfico 6:25; Gráfico 6:26; Gráfico 6:27) e VI (Gráfico 6:28; Gráfico 6:29; Gráfico 6:30), para ação da força horizontal segundo +X e -X. Nestes gráficos é possível visualizar a importante alteração de comportamento experimentada pelos membros B e C, sendo inclusive invertida a condição de membro mais solicitado nestes modelos, mais notável na fase se pico da força horizontal. Mesmo comportamento foi observado para estes modelos e Caso III de carga;
- No modelo simétrico com todos os membros verticais possuindo igual comprimento (Modelos V), onde os procedimentos disponíveis na literatura apontam para uma distribuição equânime da força horizontal aplicada ($1/3$ para cada membro), o membro situado entre as aberturas se apresentou mais solicitado do que os demais, em todos os estágios de carga examinados (vê Gráfico 6:25; Gráfico 6:26; Gráfico 6:27). Isto significa que o procedimento usual sempre conduziu a uma importante subestimação da força cortante no membro mais solicitado e superestimação nos demais. Este comportamento também foi observado no procedimento proposto por Qamaruddin et al. Idêntica

tendência foi observada para este modelo no Caso III de carga (vê Gráfico 6:79: Gráfico 6:80; Gráfico 6:81);

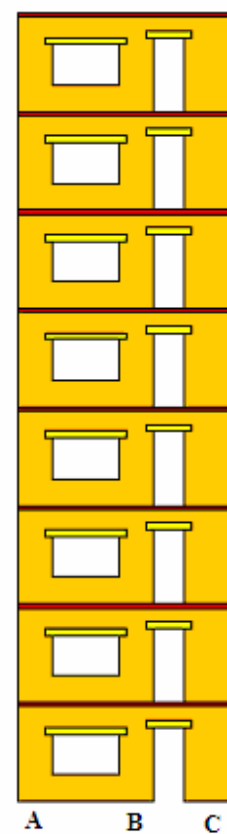
- O Modelo VI, também simétrico mas com comprimento do membro vertical entre as aberturas duplicado em relação aos demais membros, apresentou mesmo comportamento do Modelo V só que a importância do membro situado entre as aberturas, que já desempenhava importante papel naquele modelo, foi magnificada neste modelo (vê Gráfico 6:28: Gráfico 6:29; Gráfico 6:30 e Gráfico 6:81: Gráfico 6:83; Gráfico 6:84);

4.5 Paredes de contraventamento de edificações de múltiplos andares

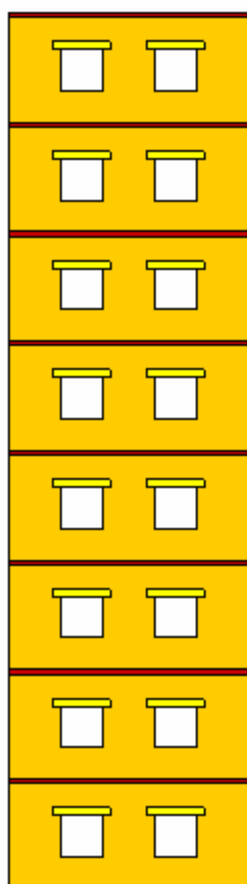
A fim de se examinar o comportamento de paredes de contraventamento com aberturas em edifícios de múltiplos andares, foram estudadas as geometrias indicadas na Figura 4:37 a seguir, que contemplam paredes com aberturas de porta e janela, niveladas ou não (Modelos I, IA e IB – este modelo é uma variação do Modelo IA no qual a abertura da janela está desnivelada para cima relativamente à abertura da porta), e aberturas apenas de janelas com comprimentos dos membros verticais iguais ou diferentes (Modelos V e VI).



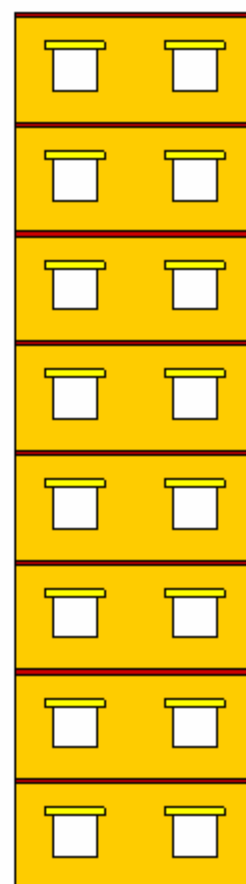
(a) Modelo I



(b) Modelo IA



(c) Modelo V



(d) Modelo VI

Figura 4:37 – Paredes de contraventamento de edificação de múltiplos andares

Os modelos estudados são extensões daqueles descritos na seção 4.2, aos quais foram acrescentados sete níveis, de forma a compor modelos de parede de contraventamento de uma edificação de oito pavimentos. Todos os modelos foram considerados fixos na base e no topo de cada andar e foi admitida a existência de uma laje de concreto com 3,5 metros de largura e 12 cm de espessura, que desempenha papel de um diafragma para as ações no plano da parede. Nenhuma condição de contorno adicional foi imposta ao modelo. A estratégia de carregamento a que foi submetido cada modelo foi a seguinte:

- (k) Aplicação, nos primeiros estágios das análises não-lineares, de carregamento de $0,045 \text{ N/mm}^2$ no topo de cada andar correspondente às lajes de piso e $0,026 \text{ N/mm}^2$ no nível da cobertura. Estes valores correspondem à ação do peso do revestimento e das sobrecargas de utilização das lajes de piso – $6,28 \text{ N/mm}$ - e cobertura – $3,655 \text{ N/mm}$ - na parede em análise. Os pesos próprios das paredes, vergas e lajes foram considerados como um caso de carga à parte, aplicados simultaneamente.
- (l) Na sequência, os modelos foram submetidos a carregamento lateral incremental aplicado através da imposição de deslocamentos nodais no nível de cada laje, sendo admitidas duas hipóteses: direção +X e direção -X. Estes deslocamentos foram monotonamente incrementados até o atingimento da capacidade de carga lateral de cada modelo, avaliada conforme descrito na seção seguinte. Os deslocamentos iniciais aplicados ao nível dos andares de cada um dos modelos correspondem aos deslocamentos decorrentes do primeiro modo de vibração do respectivo modelo. Para obtenção destes deslocamentos, foram realizadas análises modais em todos os modelos analisados..

4.5.1 Curva de capacidade dos modelos

A curva de capacidade é usualmente construída para se avaliar a capacidade de carga lateral de uma edificação, fornecendo informações acerca dos níveis de desempenho estrutural da mesma em diversos estágios do carregamento lateral, sendo calculada admitindo-se a hipótese de que a resposta da edificação às ações laterais se dá predominantemente no seu primeiro modo de vibração. Para a sua construção, cada um dos modelos foi submetido a uma análise modal através da qual se obteve a forma do primeiro modo de vibração da estrutura. Os deslocamentos horizontais no nível de cada

andar decorrente desta análise foram então aplicados como condição de carregamento lateral inicial aos modelos. Estes deslocamentos foram monotonamente incrementados até o atingimento da capacidade de carga da parede. Plotando-se a força cortante total aplicada contra o deslocamento num ponto de referência, localizado no topo da estrutura, obtém-se a curva de capacidade da edificação, conforme ilustra a Figura 4:38. Esta maneira de gerar a curva carga-deslocamento é usualmente referida como *pushover analysys*, e na Figura 4:39 acham-se esquematicamente representados os diversos estágios da curva de capacidade de uma estrutura de alvenaria.

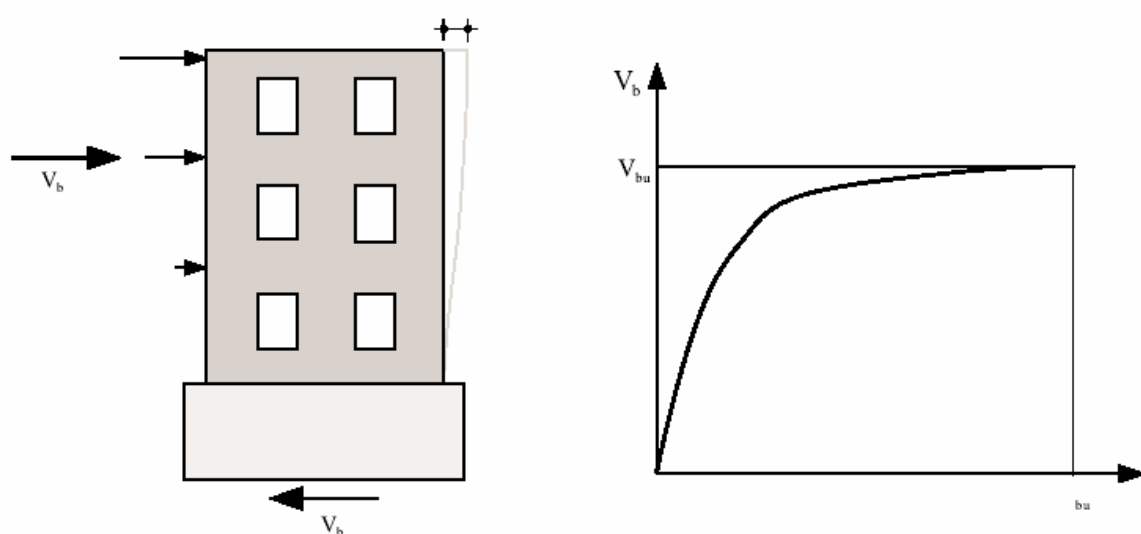


Figura 4:38 - Curva de capacidade de uma edificação

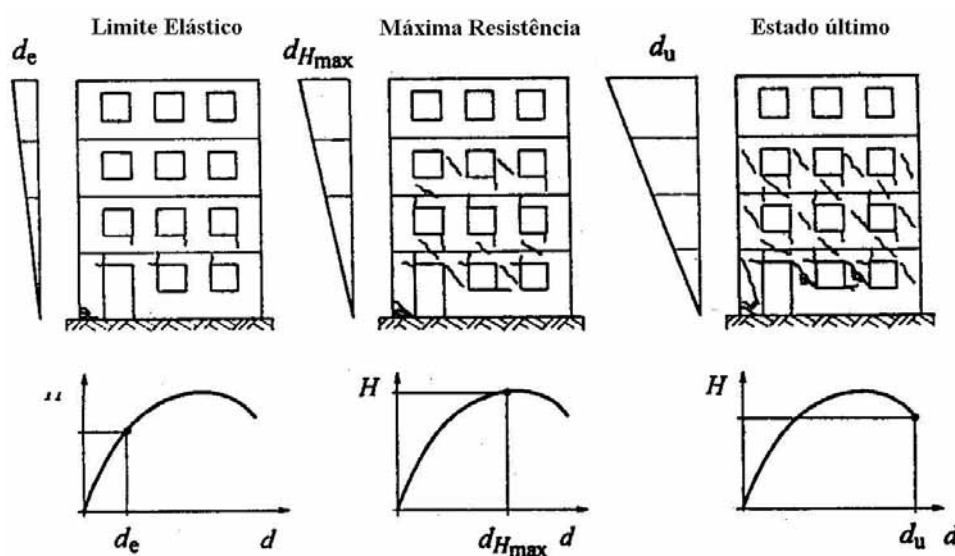


Figura 4:39 - Estágios da curva de capacidade de uma estrutura de alvenaria [Tomazevic, M., 1999]

Este conceito de construção da curva de capacidade foi aplicado aos modelos estudados e a respectiva curva de cada um deles foi gerada.

A malha de elementos finitos utilizada nas análises dos diversos modelos se constitui de 6.144 elementos , 6.888 nós perfazendo um total de 13.702 graus de liberdade ativos. Para a construção da curva de capacidade de cada um dos modelos analisados consumiu-se um tempo médio de 04:59:02 num computador Pentium IV, 3,2 GHz, 512 MB de RAM e HD de 80 GB.

A capacidade de carga lateral dos modelos estudados foi atingida com os seguintes valores:

- Modelo I: Dir. +X ; $F_{max} = 119,90 \text{ kN}$; $d_{Hmax} = 12,36 \text{ cm}$
- Modelo I: Dir. -X ; $F_{max} = 94,48 \text{ kN}$; $d_{Hmax} = 10,15 \text{ cm}$
- Modelo IA: Dir. +X ; $F_{max} = 119,77 \text{ kN}$; $d_{Hmax} = 12,36 \text{ cm}$
- Modelo IA: Dir. -X ; $F_{max} = 95,52 \text{ kN}$; $d_{Hmax} = 8,57 \text{ cm}$
- Modelo IB: Dir. +X ; $F_{max} = 120,58 \text{ kN}$; $d_{Hmax} = 11,76 \text{ cm}$
- Modelo IB: Dir. -X ; $F_{max} = 94,66 \text{ kN}$; $d_{Hmax} = 11,86 \text{ cm}$

O Gráfico 4-25, o Gráfico 4-26 e o Gráfico 4-27 mostram a curva de capacidade para os Modelos I, IA e IB com ação da força lateral segundo +X e -X.

É possível observar, nestas figuras, que o comportamento global dos modelos é fortemente influenciado pela orientação da força lateral. Para os modelos estudados, observou-se que a capacidade de carga lateral da parede foi reduzida em cerca de 20% quando se permutou a ação da força lateral de +X para -X. Esta alteração da capacidade resistente da parede está associada à alteração dos efeitos do momento de tombamento no aumento ou decréscimo desta capacidade. Com efeito, se o momento de tombamento atuar no sentido de transferir tensão de compressão vertical do membro mais rígido para o mais flexível (força lateral agindo em -X), a capacidade de carga da parede diminui e se acontecer o contrário (força lateral em +X) a capacidade de carga lateral da parede aumenta. Para estes modelos, o início do processo de fissuração ocorreu para um valor da força lateral total de 40 kN correspondente a uma deflexão de 10 mm (Gráfico 4-25).

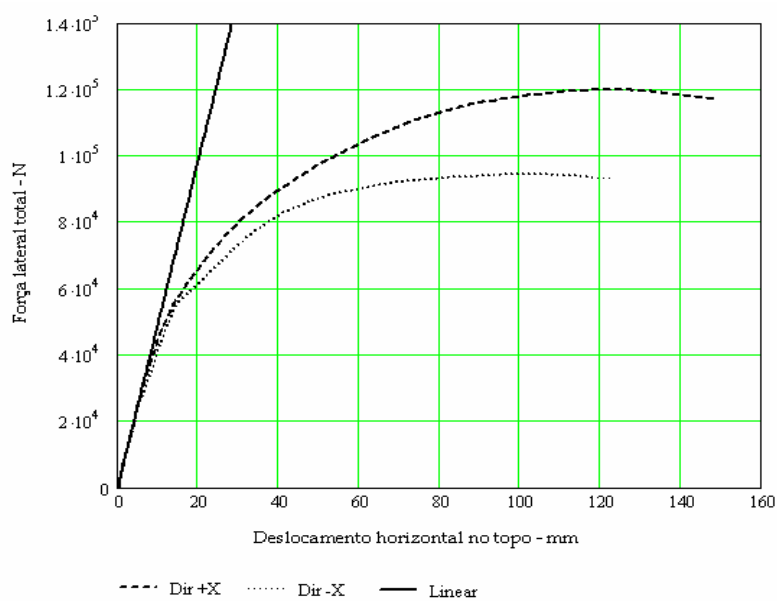


Gráfico 4-25 – Curva Força x Deslocamento – Modelo I: Dir. +X e Dir. -X

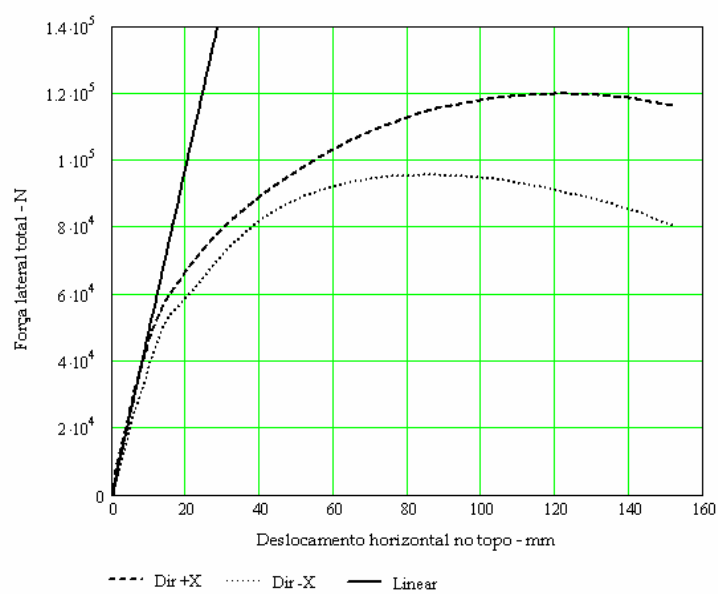


Gráfico 4-26 – Curva Força x Deslocamento – Modelo IA: Dir. +X e Dir. -X

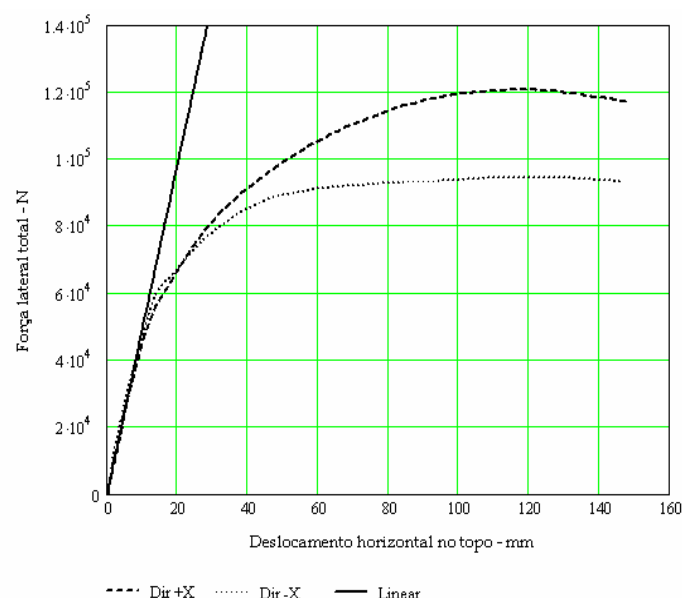


Gráfico 4-27 – Curva Força x Deslocamento – Modelo IB: Dir. +X e Dir. -X

A Figura 4:40, a Figura 4:41 e Figura 4:42 a seguir ilustram o perfil das deformações principais máximas no início do processo de fissuração da parede dos Modelos I, IA e IB com força lateral agindo em +X e -X, onde é possível observar que o processo inicial de fissuração se concentra nos extremos opostos das aberturas (mais pronunciado na abertura da janela) e nos lintéis sobre e sob as mesmas, sendo mais acentuado para a situação de ação da força lateral segundo +X, possivelmente devido à diferença de rigidez entre os membros A e C. Se se comparam o processo inicial de fissuração dos Modelos I e IA para ação da força lateral segundo +X (parte esquerda da Figura 4:40, da Figura 4:41 e da Figura 4:42), observa-se que o desnivelamento entre as aberturas concorreu para alterar o processo de fissuração nos lintéis, possivelmente por conta da alteração da relação de forma dos mesmos, que muda em função do desnivelamento das aberturas.

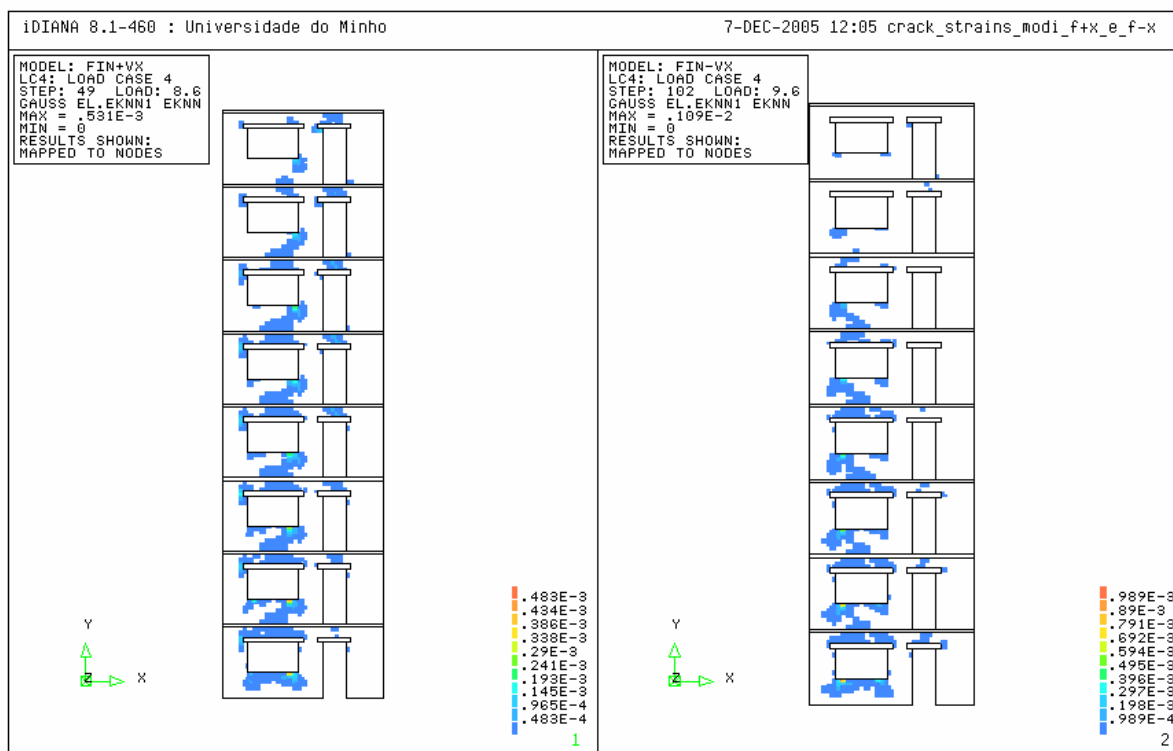


Figura 4:40 – Deformações de fissuração para uma força lateral total de 40 kN – Modelo I: Dir. +X e -X

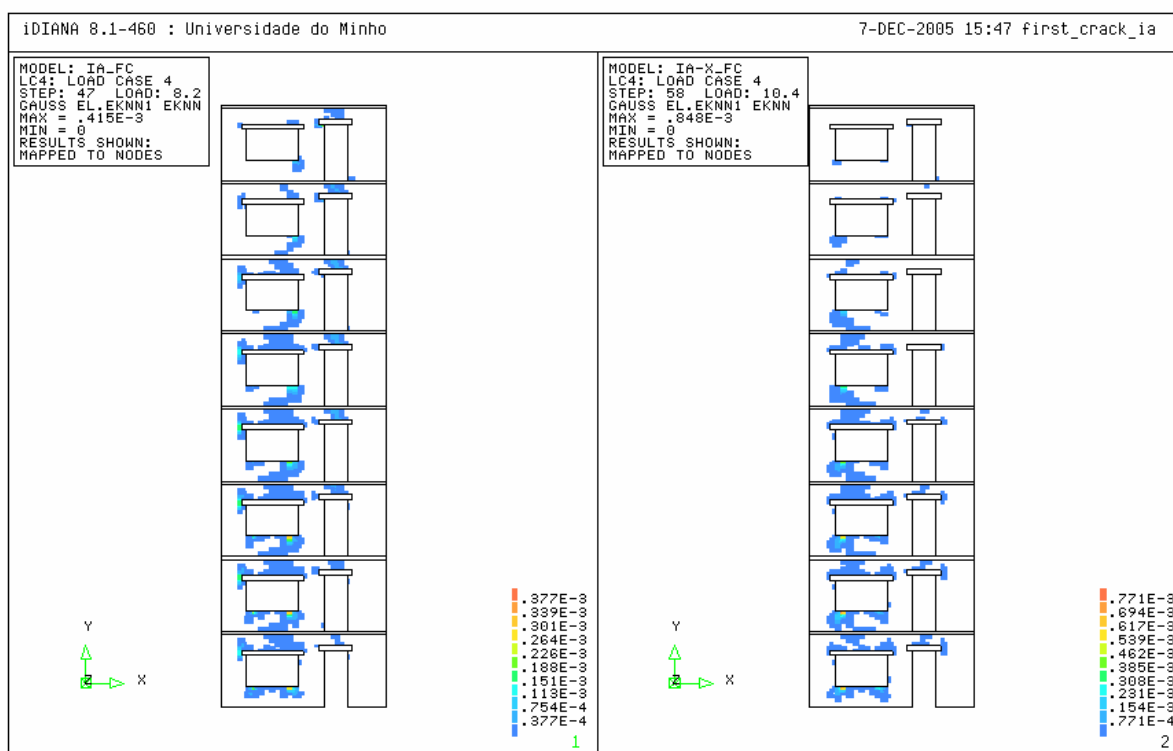


Figura 4:41 – Deformações de fissuração para uma força lateral total de 40 kN – Modelo IA: Dir. +X e -X

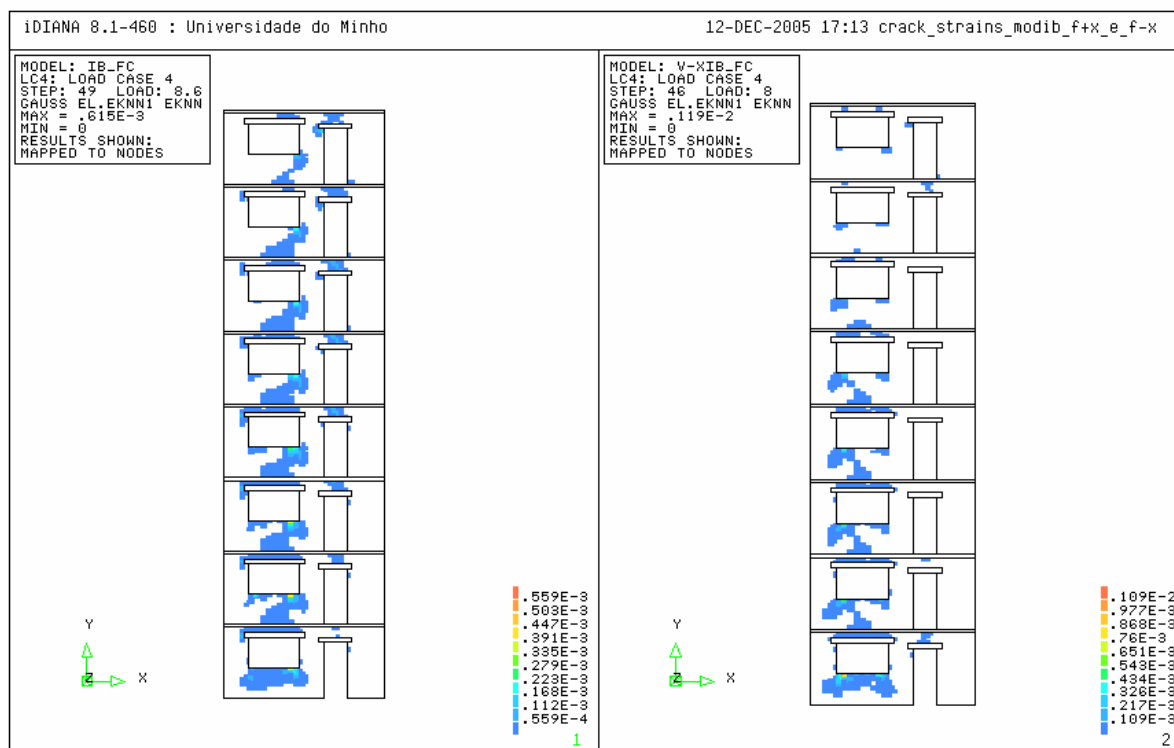


Figura 4:42 – Deformações de fissuração para uma força lateral total de 40 kN – Modelo IB: Dir. +X e -X

A Figura 4:43 a seguir condensa o perfil das deformações correspondentes ao início do processo de fissuração para os Modelos I, IA, V e VI com força lateral agindo segundo +X, onde se observa que, não obstante sejam alteradas a geometria e localização das aberturas, o processo de fissuração permanece se iniciando no entorno das aberturas com localização preferencial nos lintéis sob e sobre as aberturas.

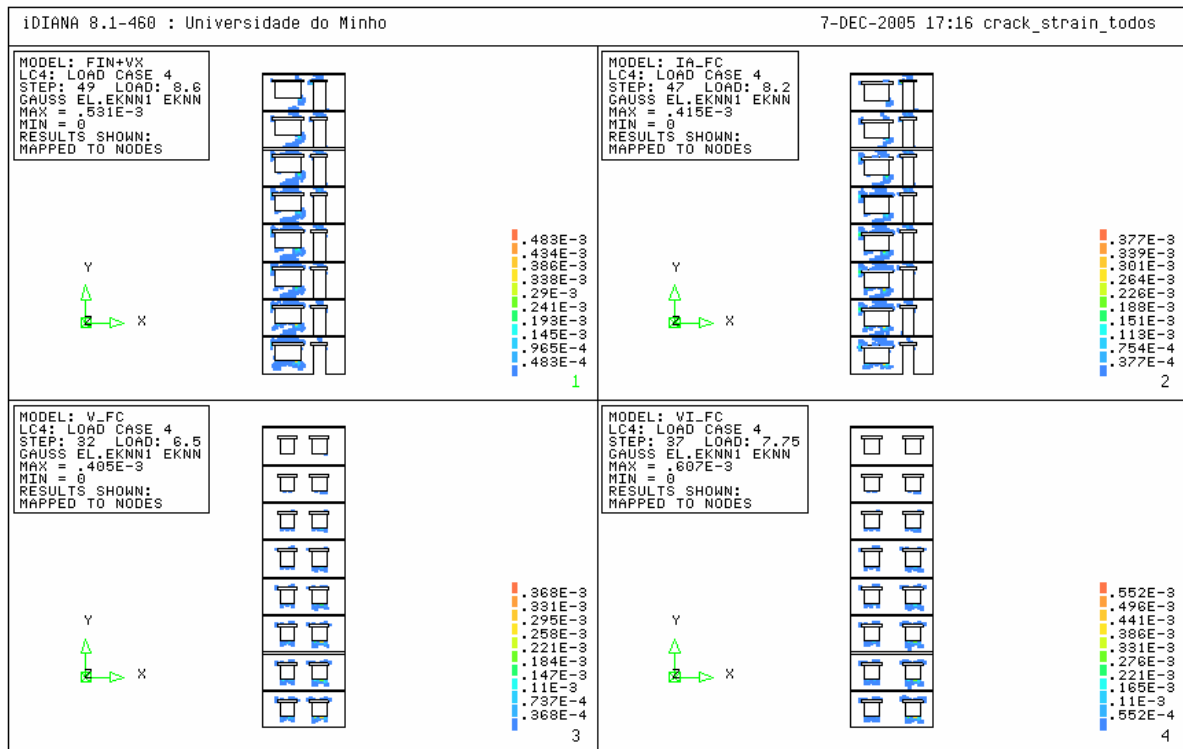


Figura 4:43 – Deformações de fissuração para uma força lateral total de 40 kN – Modelo I, IA, V e VI: +X

No Gráfico 4-28 e no Gráfico 4-29 apresentam-se as curvas de capacidade para os modelos I, IA e IB, para ação da força lateral segundo +X e -X, respectivamente, de forma que se possa avaliar de maneira mais direta a influência do desnivelamento das aberturas no comportamento global da parede. Conforme se observa nestas figuras, nos modelos estudados, foi bastante discreta a influência do desnivelamento das aberturas, devendo-se destacar uma ligeira alteração, para maior, na capacidade de carga lateral da parede, no modelo com aberturas desniveladas para atuação da força lateral segundo -X (Gráfico 4-29)

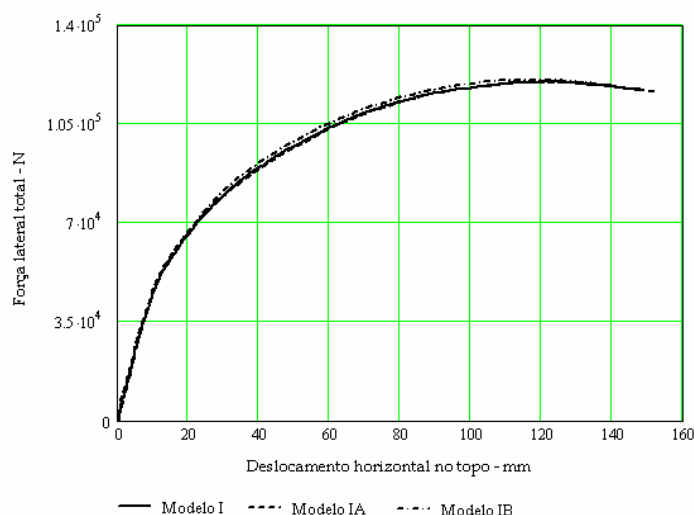


Gráfico 4-28 – Curva Força x Deslocamento – Modelos I, IA e IB: Dir. +X

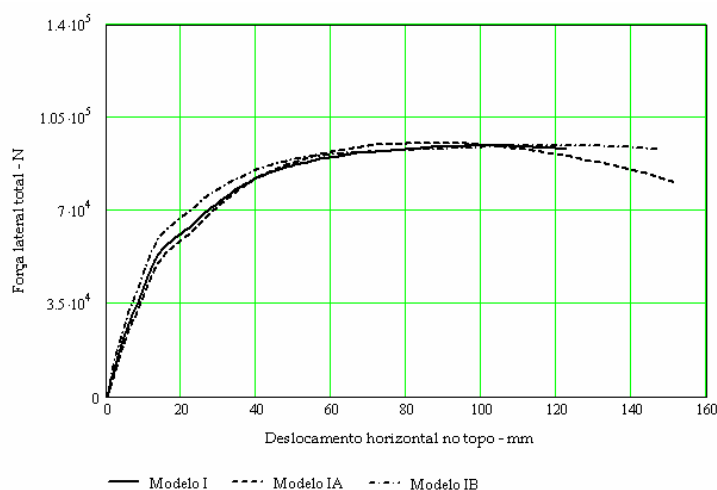


Gráfico 4-29 – Curva Força x Deslocamento – Modelos I, IA e IB: Dir. -X

O Gráfico 4-30 a seguir condensa as curvas de capacidade de todos os modelos analisados junto com o modelo referente à parede sem aberturas, para ação da força lateral segundo +X. A capacidade de carga lateral dos demais modelos foi atingida com os seguintes valores:

- Modelo V: $F_{\max} = 115,41 \text{ kN}$; $d_{H\max} = 13,36 \text{ cm}$
- Modelo VI: $F_{\max} = 100,70 \text{ kN}$; $d_{H\max} = 10,37 \text{ cm}$
- Modelo sem aberturas: $F_{\max} = 123,23 \text{ kN}$; $d_{H\max} = 12,76 \text{ cm}$

É possível observar nesta figura o efeito das aberturas na redução da capacidade de carga lateral da parede. Comparativamente com o modelo sem aberturas, o Modelo VI foi o que apresentou menor capacidade resistente, sendo seu valor inferior em

18% ao valor obtido para o modelo sem aberturas, não obstante apresentar uma área de abertura inferior aos Modelos I, IA e IB, que apresentaram melhor desempenho. A provável explicação para este comportamento está associada à rigidez dos membros verticais que compõem os Modelos I, IA e IB, que contam com um membro vertical (membro C) mais rígido do que o respectivo membro no Modelo VI, sendo este responsável pelo incremento de desempenho daqueles modelos, devido aos efeitos do momento de tombamento, conforme já relatado anteriormente. Quando se comparam os Modelo V e VI percebe-se pelas mesmas razões expostas que, apesar de apresentarem áreas de aberturas muito próximas, o modelo V exibiu um melhor desempenho. Mesmas considerações podem ser estendidas à análise das curvas de capacidade destes modelos para ação da força lateral segundo $-X$, conforme exhibe o Gráfico 4-31, sendo a menor capacidade resistente atribuída aos modelos I, IA e IB com valor cerca de 23% inferior ao modelo sem aberturas.

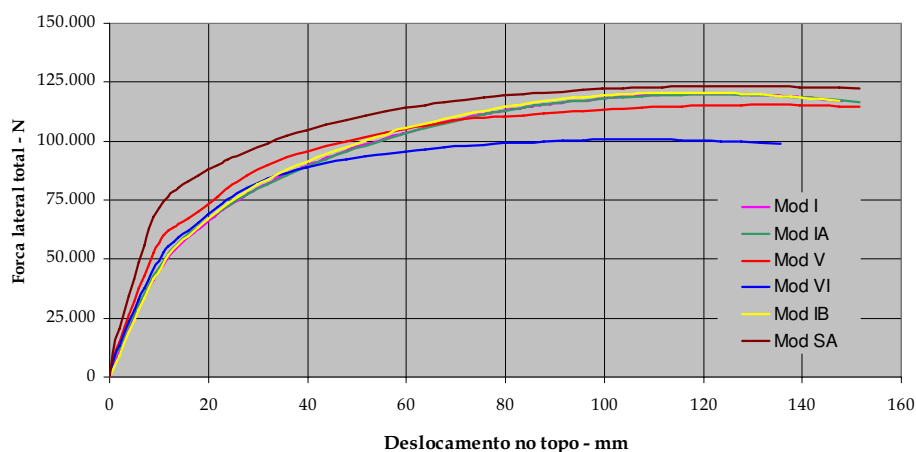


Gráfico 4-30 – Curva Força x Deslocamento – Modelos I, IA, IB, V, VI, SA: Dir.: +X

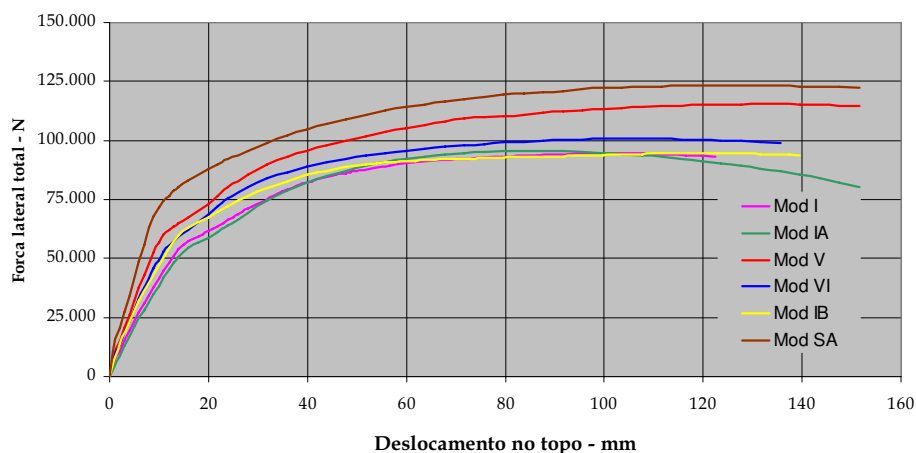


Gráfico 4-31 – Curva Força x Deslocamento – Modelos I, IA, IB, V, VI, SA: Dir.: -X

4.5.2 Perfil de tensões e deformações dos modelos

A Figura 4:44 a seguir exibe a configuração deformada e a deformada incremental da parede no momento de atingimento da capacidade de carga do Modelo I, que se constitui numa configuração típica dos modelos estudados.

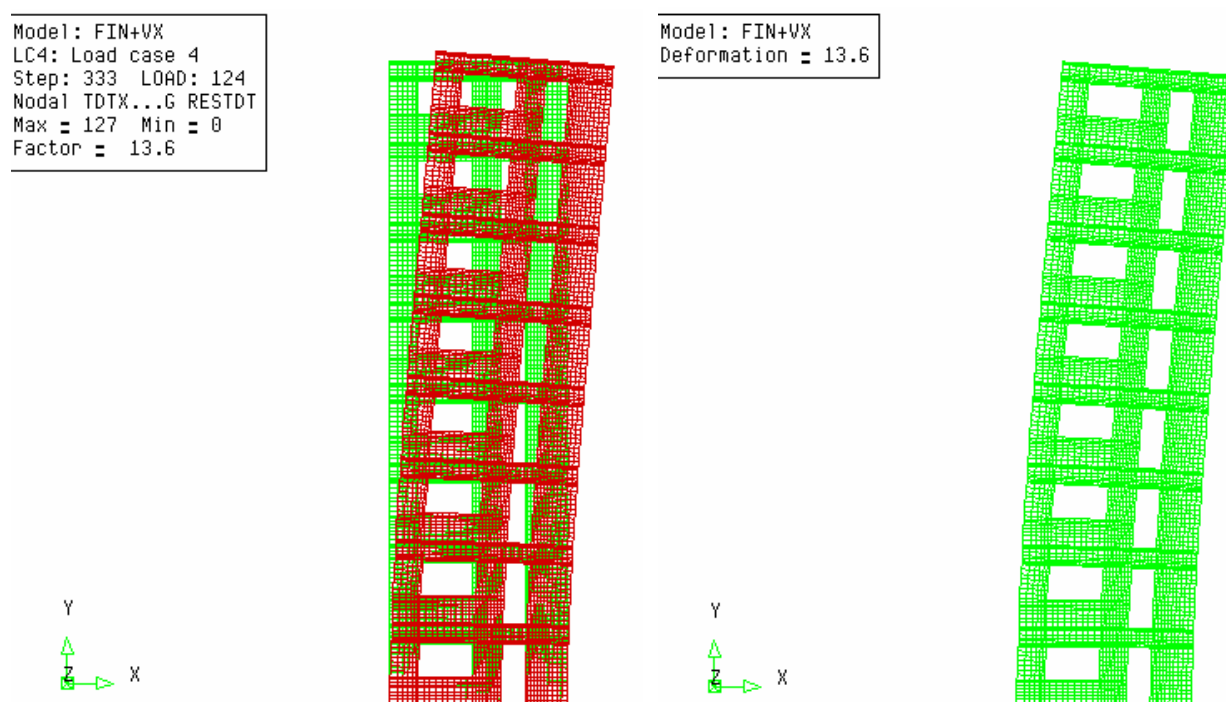


Figura 4:44 – Configuração deformada da parede na fase de pico: (a) Deformada e (b) Malha deformada incremental - Modelo I: F+X

O perfil de distribuição das tensões de cisalhamento e tensões principais mínimas para todos os modelos analisados, na fase de atingimento de sua capacidade de carga lateral são expostos nas figuras a seguir.

4.5.2.1 Modelo I: Dir. +X e Dir. -X

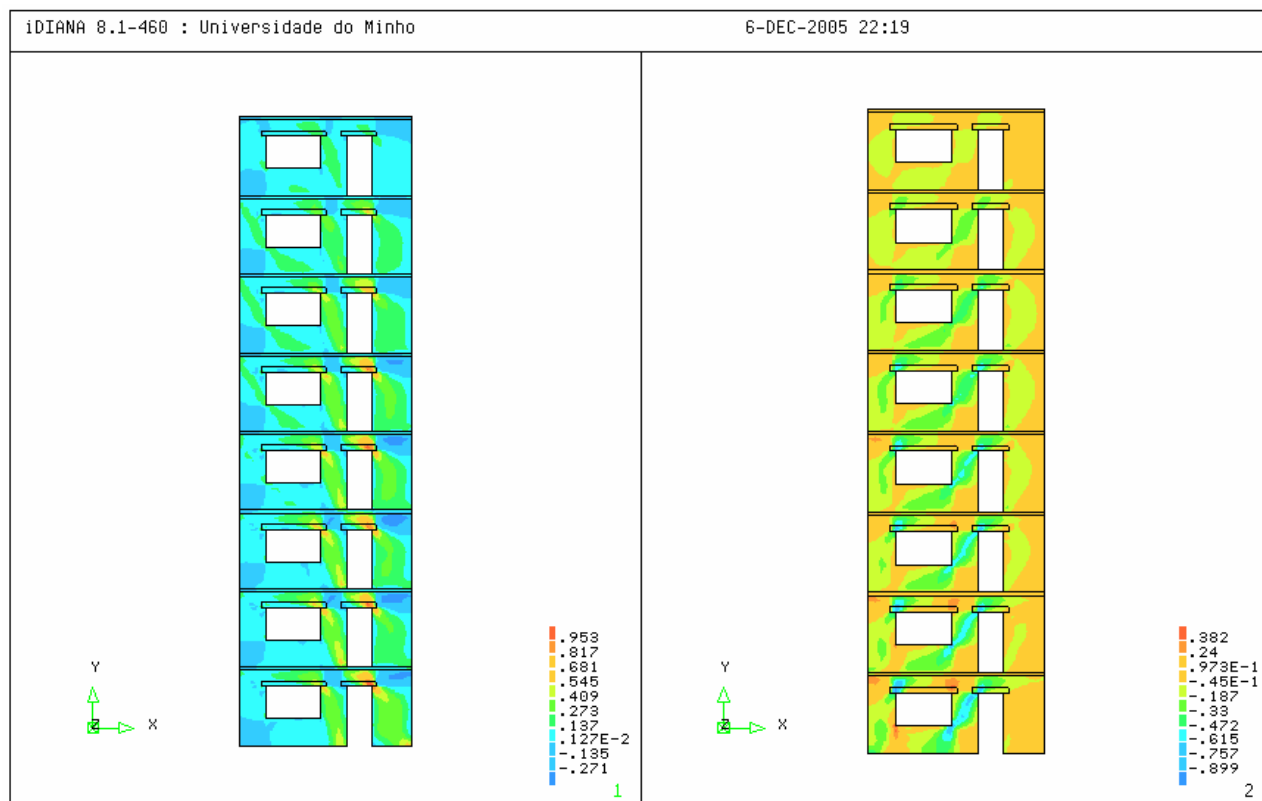


Figura 4:45 - Tensões de cisalhamento: Modelo I: Dir.: +X e -X (N/mm²)

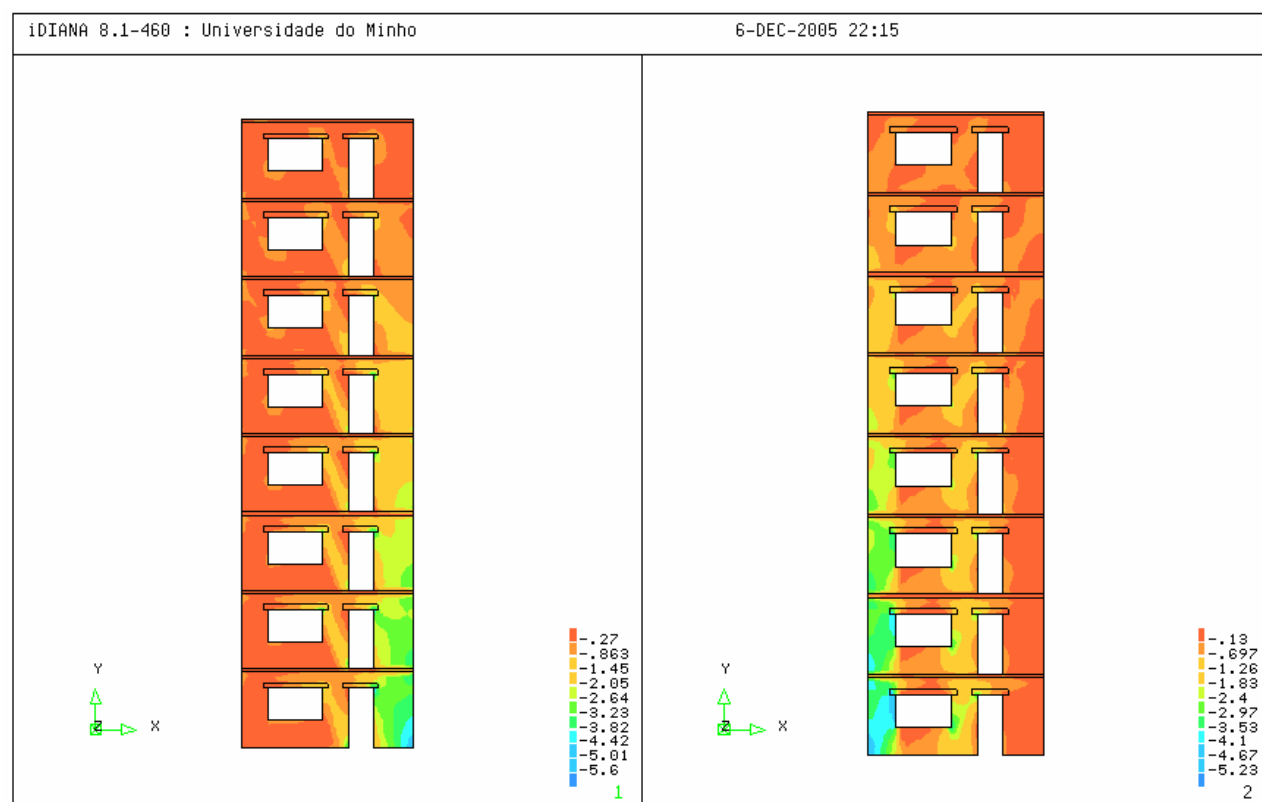


Figura 4:46 - Tensões principais mínimas: Modelo I: Dir.: +X e -X (N/mm²)

4.5.2.2 Modelo IA: Dir. -X e Dir. -X

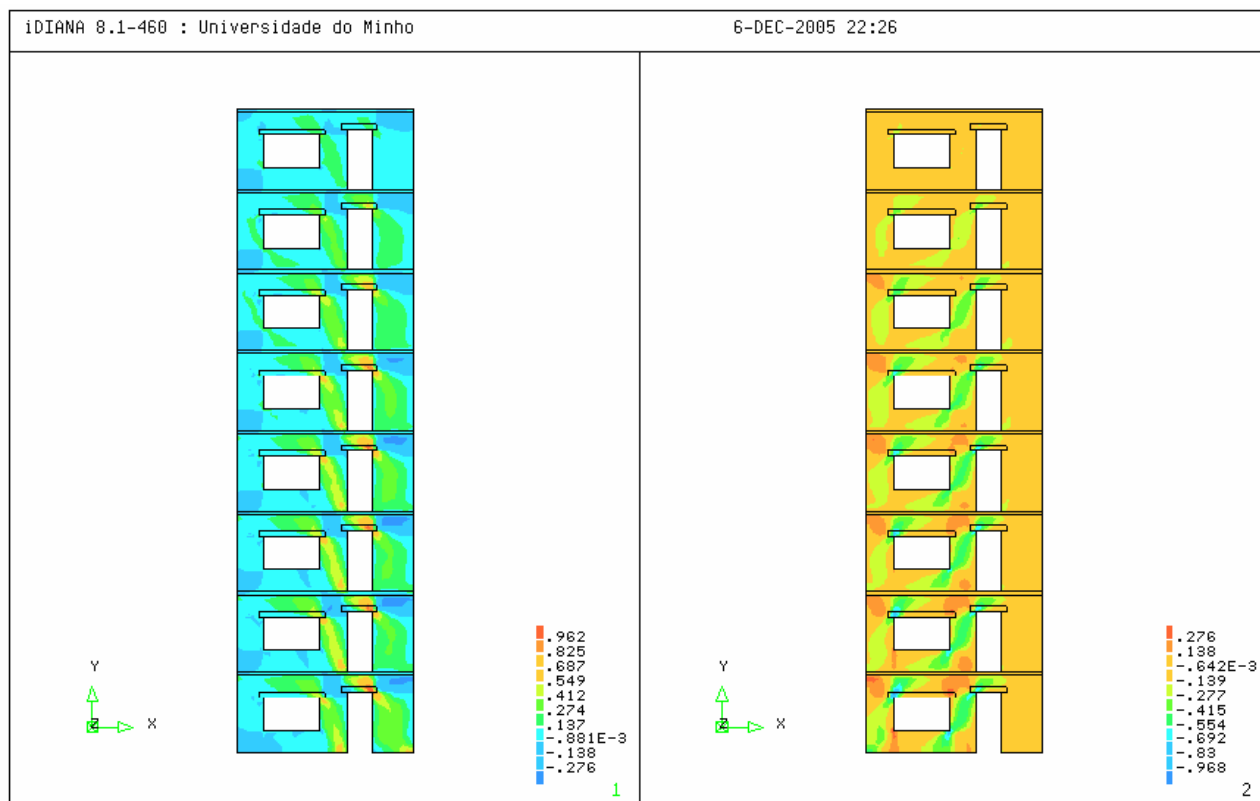


Figura 4:47 - Tensões de cisalhamento: Modelo IA: Dir.: +X e -X (N/mm²)

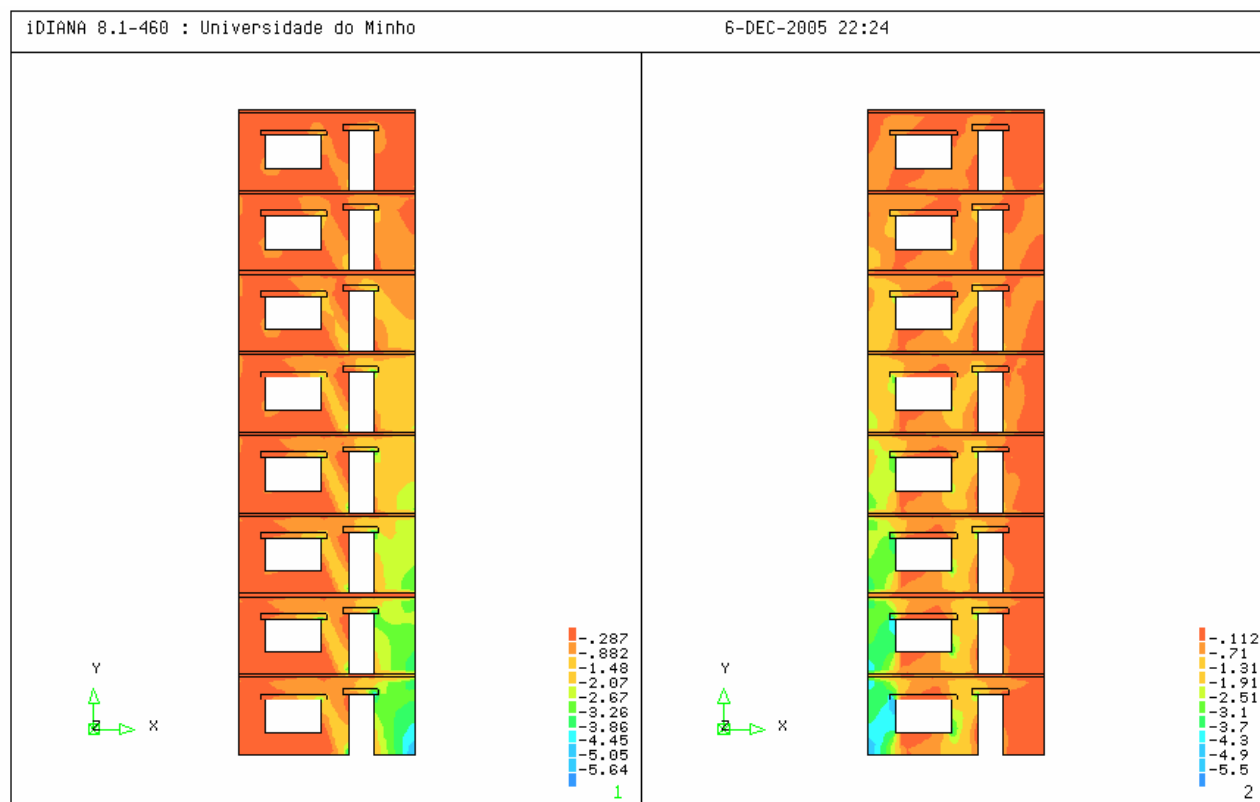


Figura 4:48 - Tensões principais mínimas: Modelo IA: Dir.: -X e -X (N/mm²)

4.5.2.3 Modelo IB: Dir. -X e Dir. -X

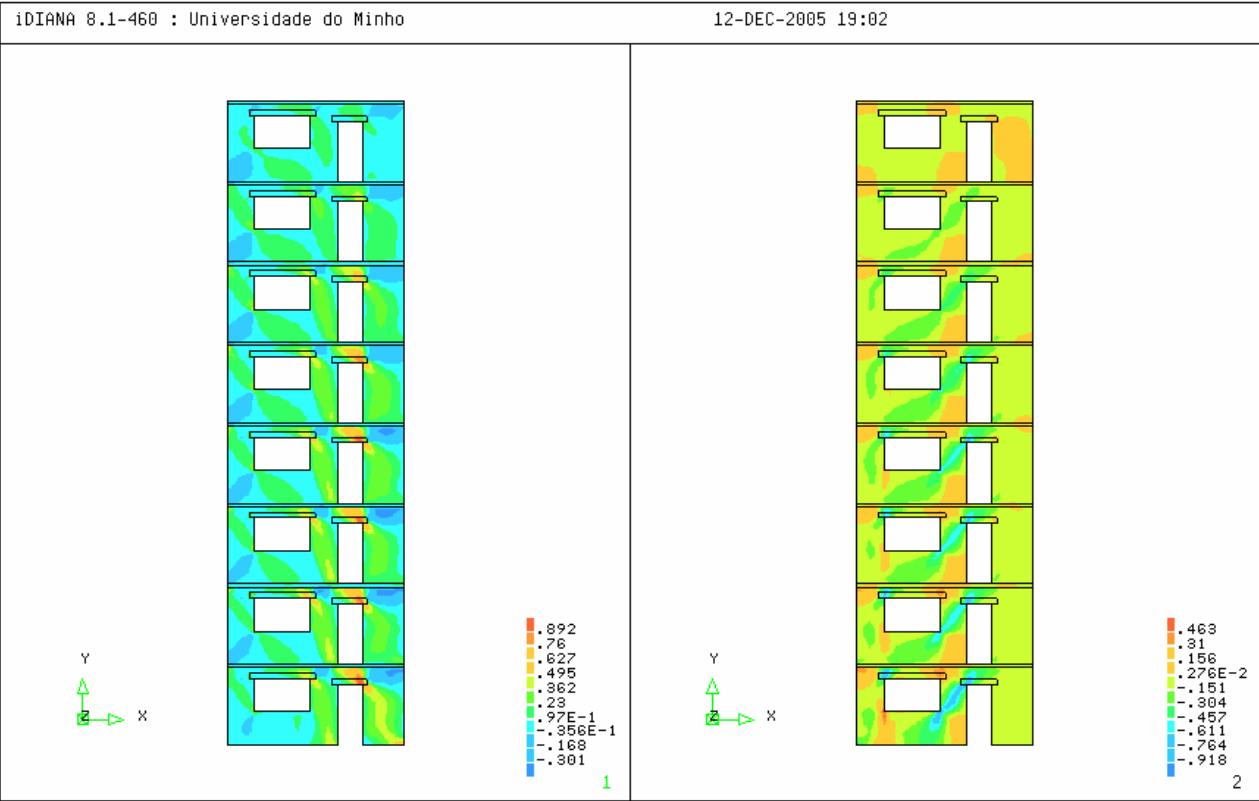


Figura 4:49 - Tensões de cisalhamento: Modelo IB: Dir.: -X e -X (N/mm²)

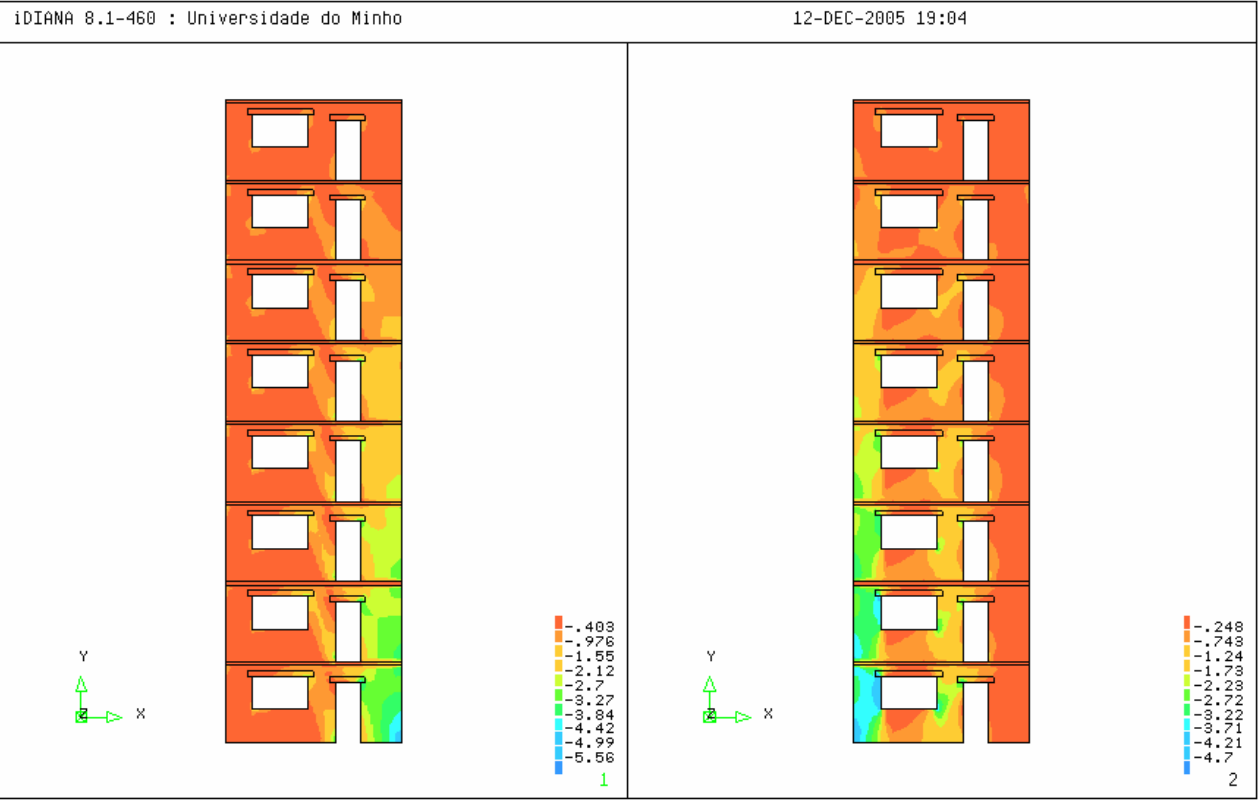
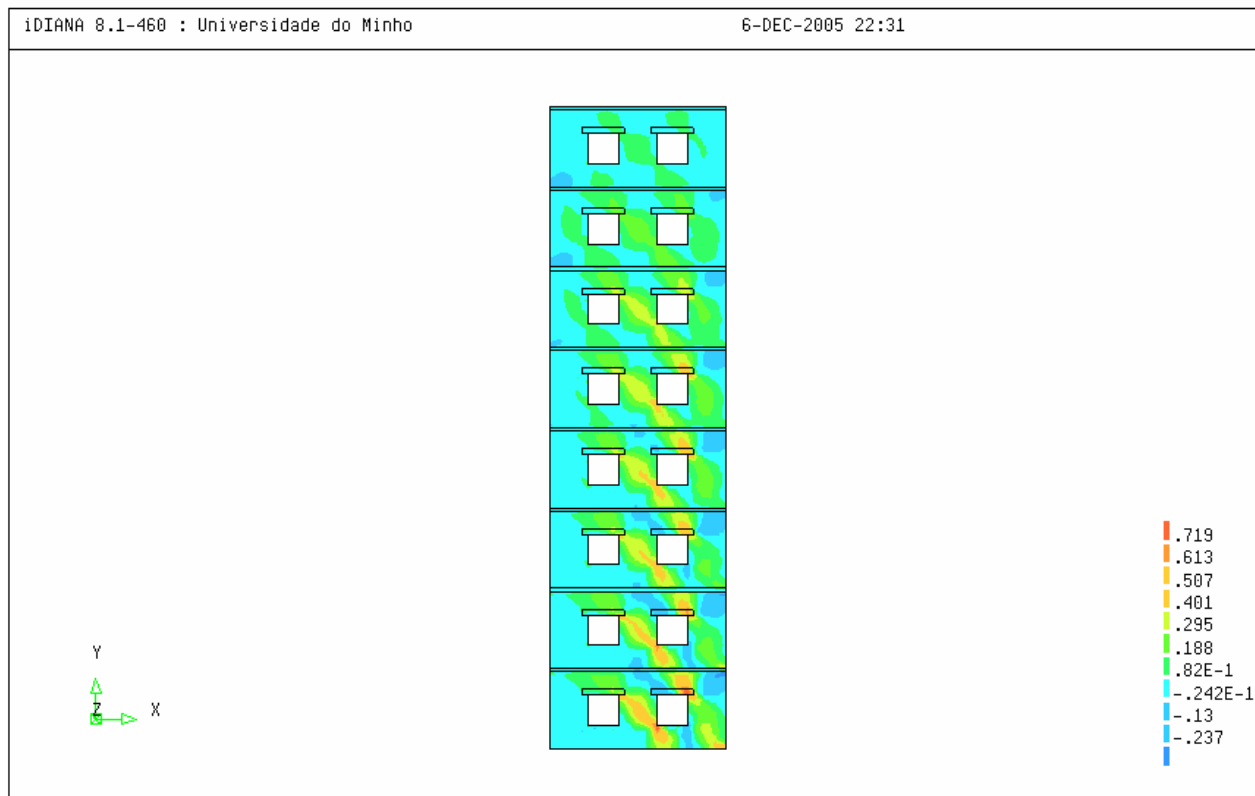
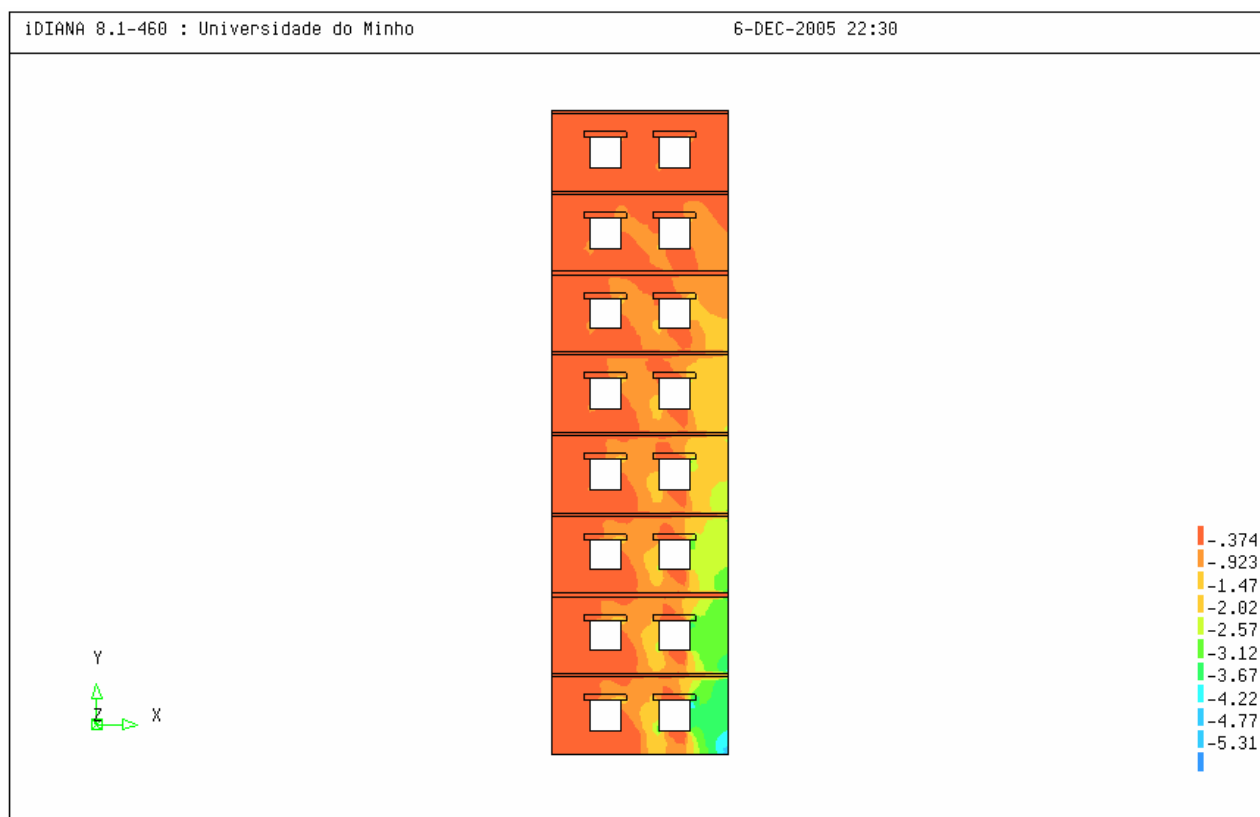
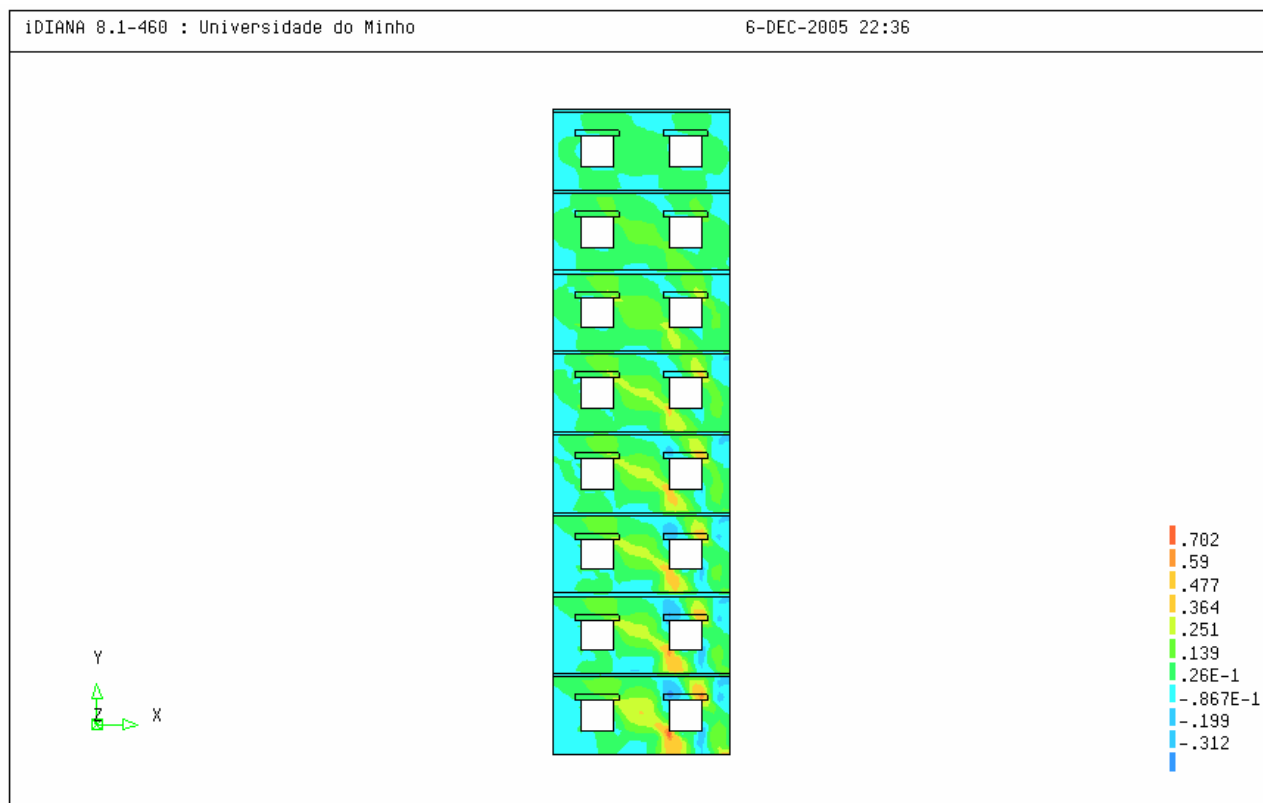
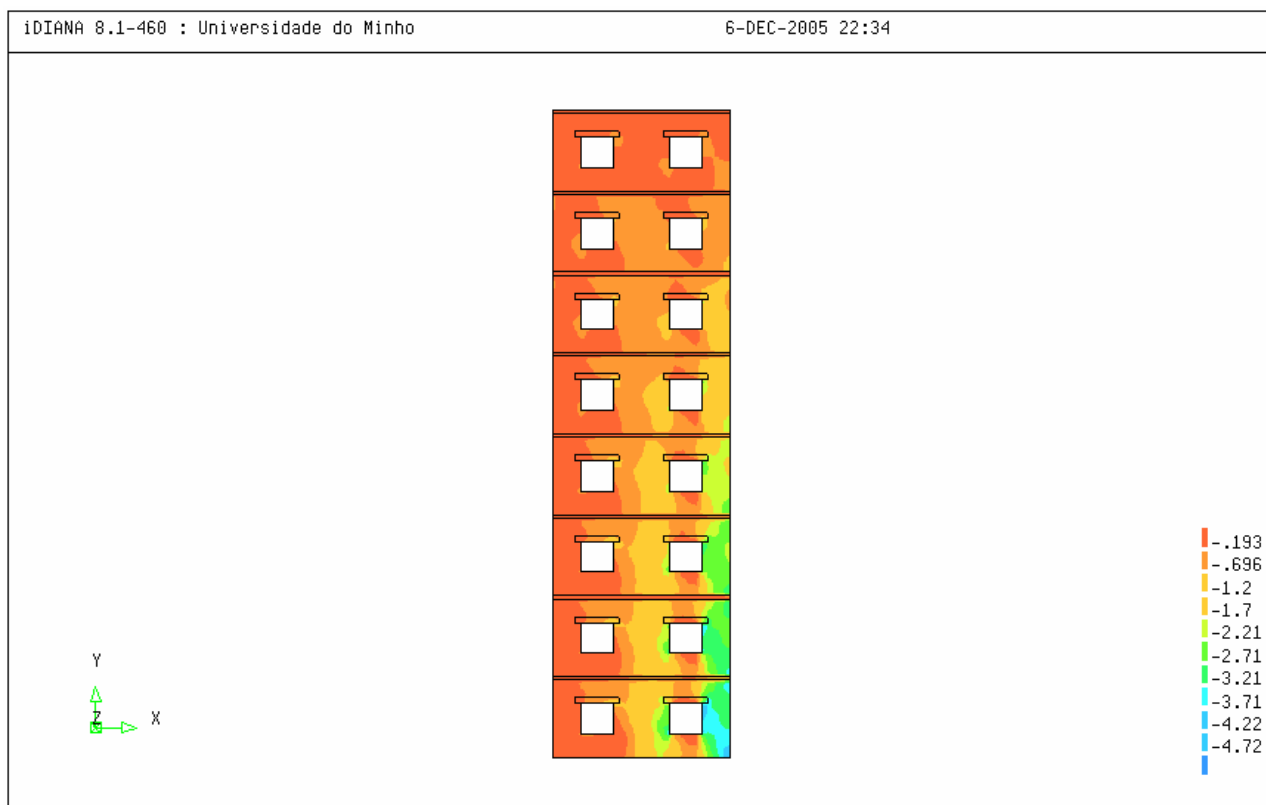


Figura 4:50 - Tensões principais mínimas: Modelo IB: Dir.: -X e -X (N/mm²)

4.5.2.4 Modelo V: Dir. +X e -X**Figura 4:51 - Tensões de cisalhamento: Modelo V: Dir.: -X e +X (N/mm²)****Figura 4:52 - Tensões principais mínimas: Modelo V: Dir.: +X e -X (N/mm²)**

4.5.2.5 Modelo VI: Dir. +X e -X**Figura 4:53 - Tensões de cisalhamento: Modelo VI: Dir.: -X e -X (N/mm²)****Figura 4:54 - Tensões principais mínimas: Modelo VI: Dir.: +X e -X (N/mm²)**

4.5.2.6 Modelos I, IA, V e VI: Dir. +X

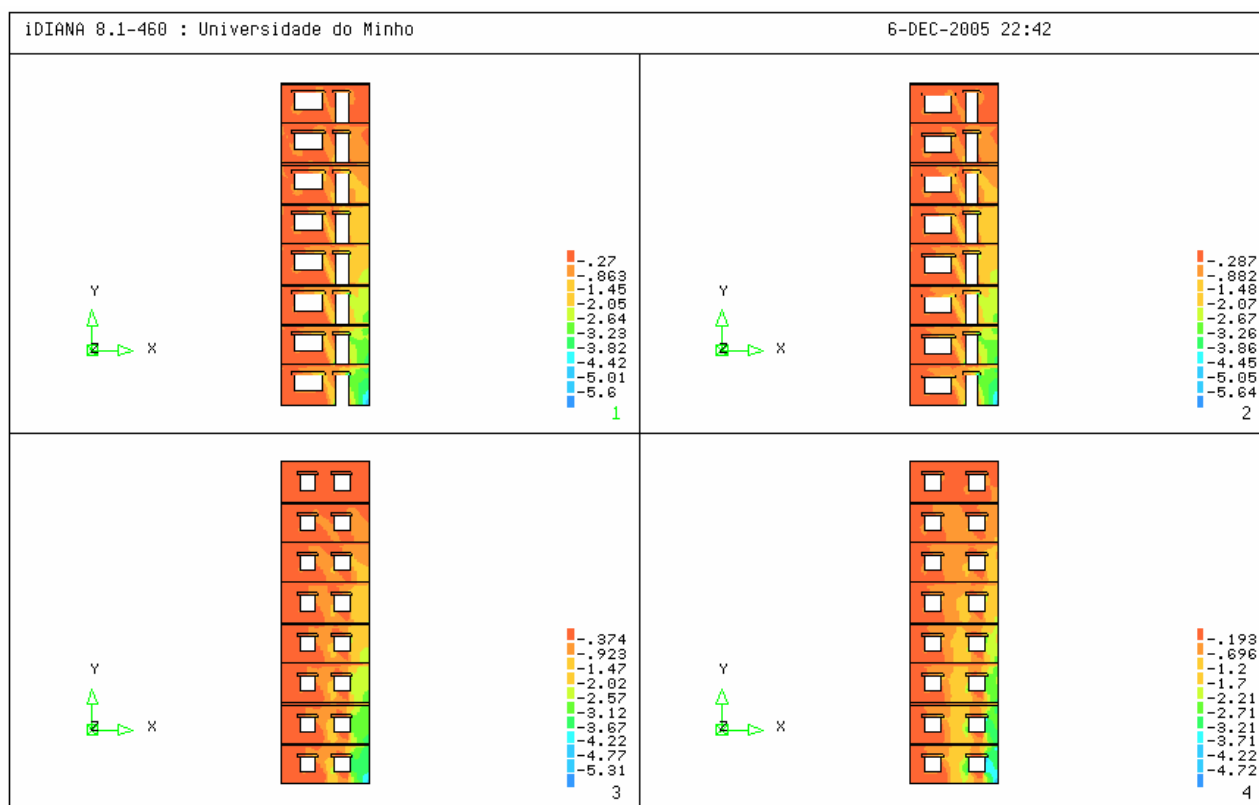


Figura 4:55 - Tensões principais mínimas: Modelo I, IA, V e VI: Dir.: +X (N/mm²)

4.5.3 Distribuição da força cortante aplicada

A distribuição da força cortante aplicada entre os membros verticais que integram a parede, ao longo da altura da edificação, foi examinada na fase em que se atingiu a capacidade de carga de cada modelo e encontra-se sumariada nas figuras que se seguem com as pertinentes considerações.

Do Gráfico 4-32 até o Gráfico 4-41 acha-se representada, em cada andar da edificação, a distribuição da força cortante aplicada entre os membros verticais dos Modelos I, IA, IB, V e VI para ação da força lateral segundo +X e -X.

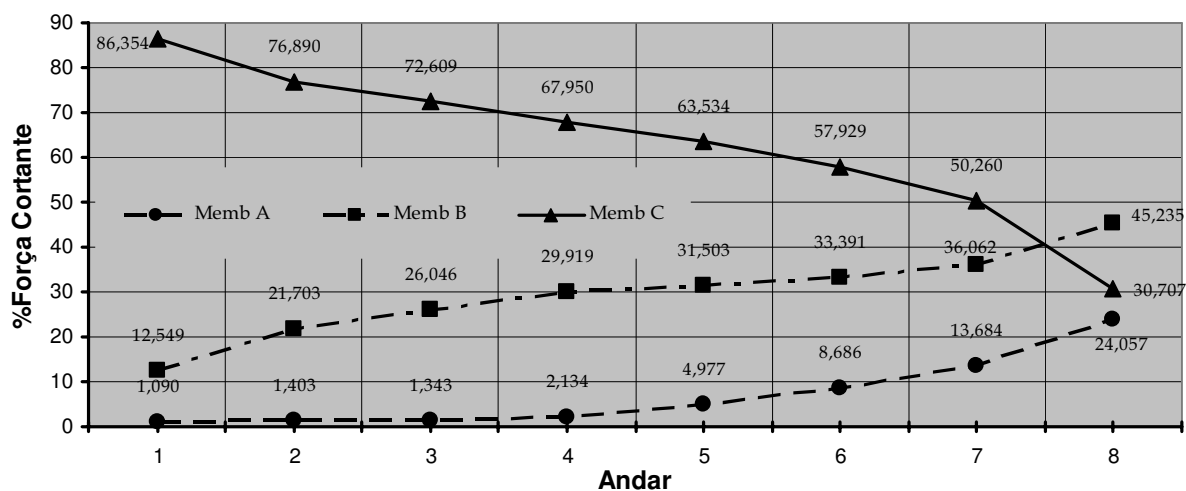


Gráfico 4-32 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo I: Membros A, B e C - Dir.: +X

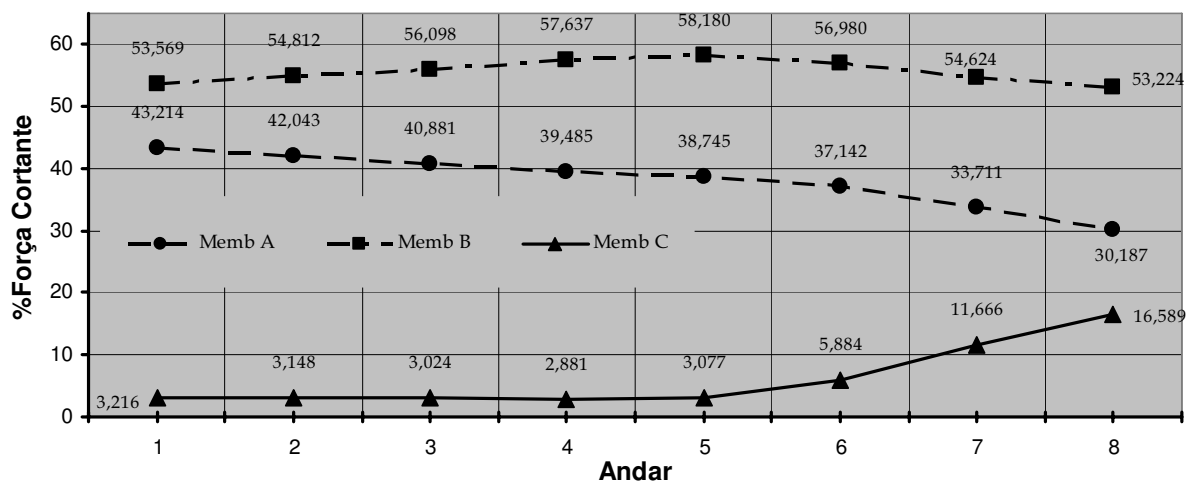


Gráfico 4-33 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo I: Membros A, B e C - Dir.: -X

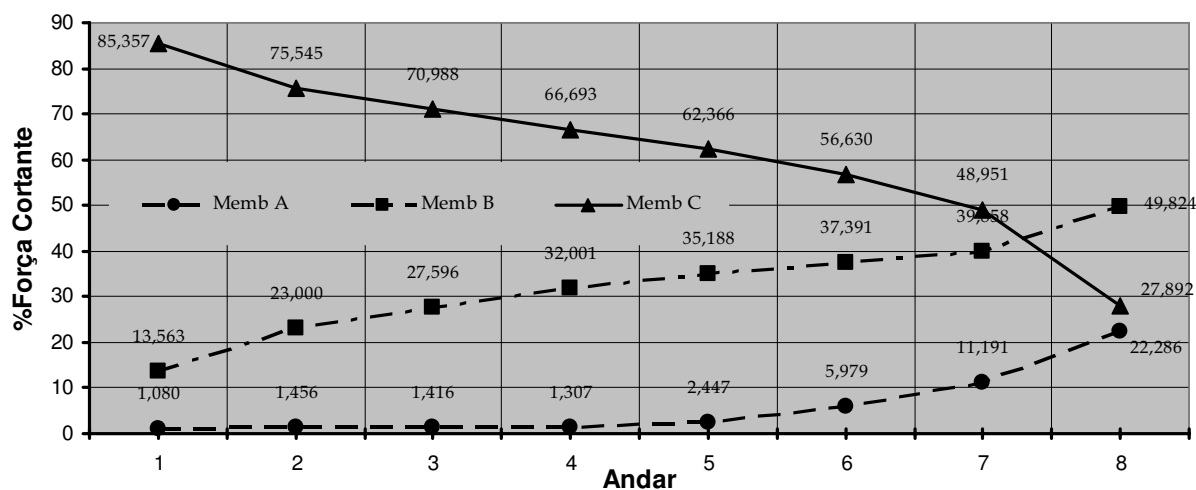


Gráfico 4-34 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo IA: Membros A, B e C - Dir.: +X

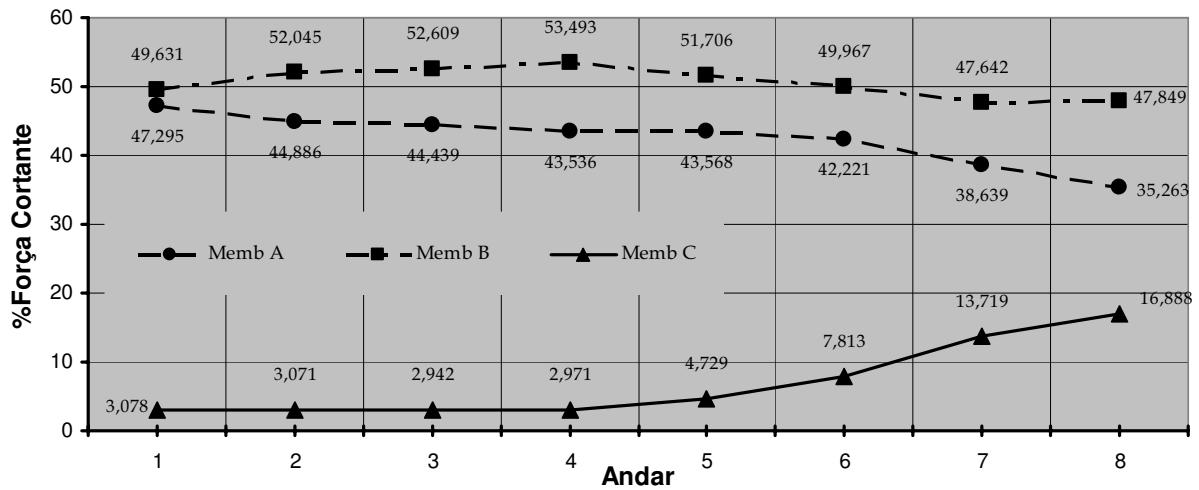


Gráfico 4-35 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo IA: Membros A, B e C - Dir.: -X

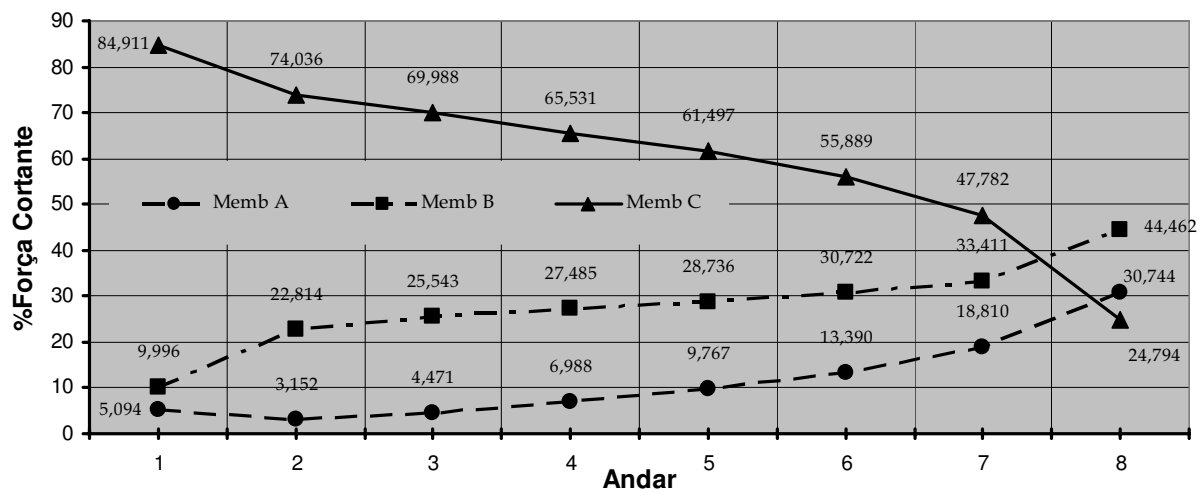


Gráfico 4-36 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo IB: Membros A, B e C - Dir.: +X

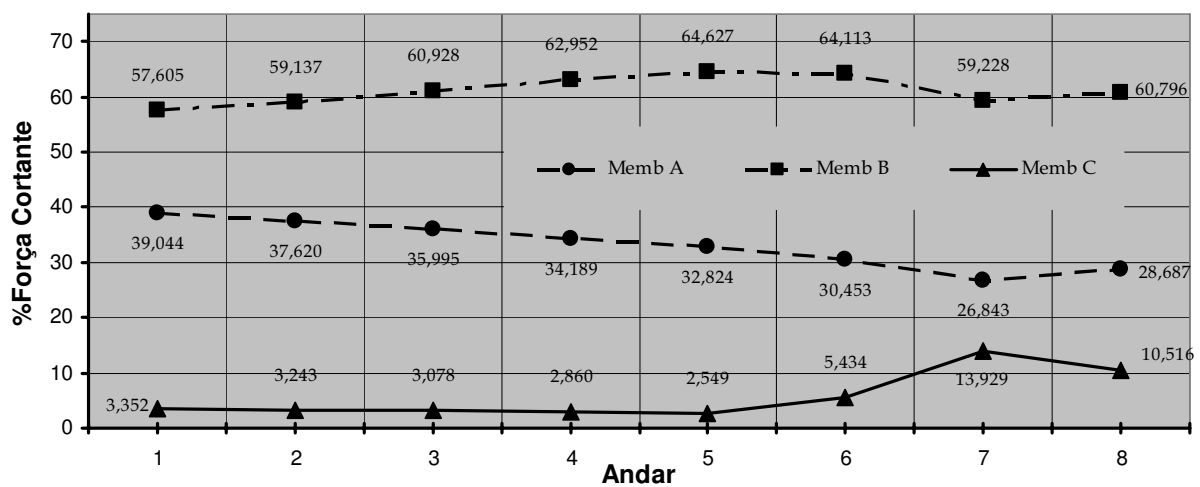


Gráfico 4-37 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo IB: Membros A, B e C - Dir.: -X

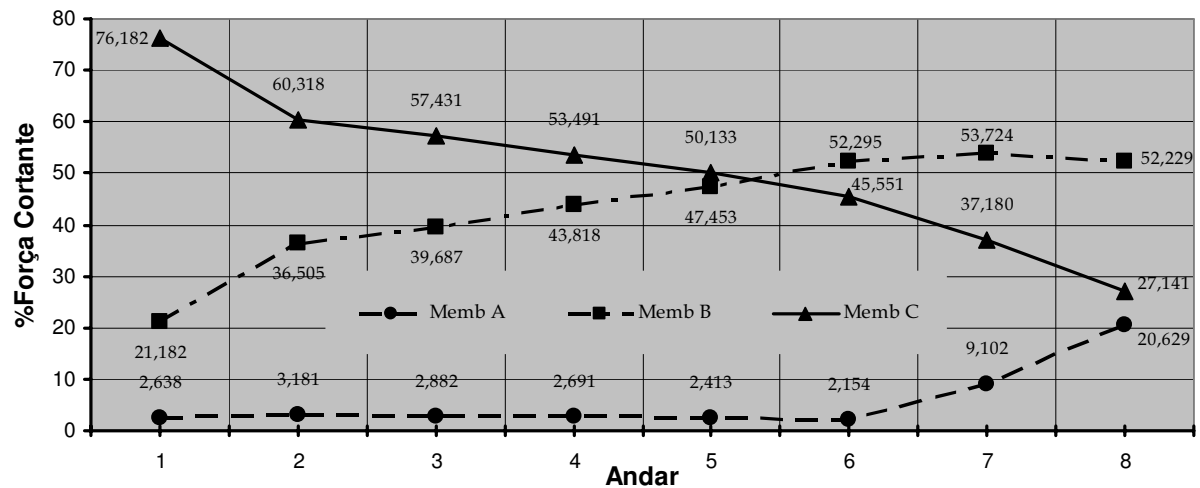


Gráfico 4-38 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo V: Membros A, B e C - Dir.: +X

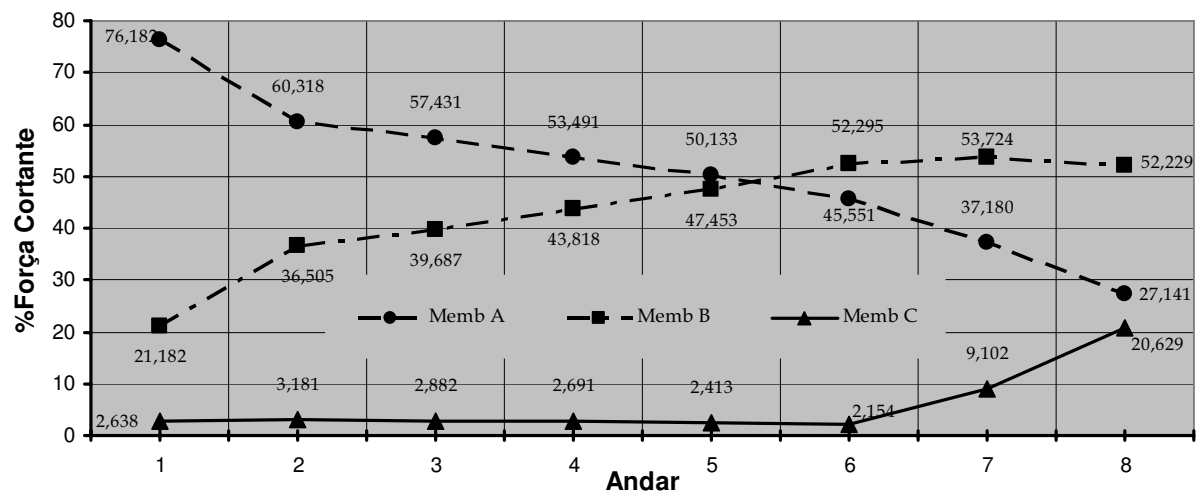


Gráfico 4-39 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo V: Membros A, B e C - Dir.: -X

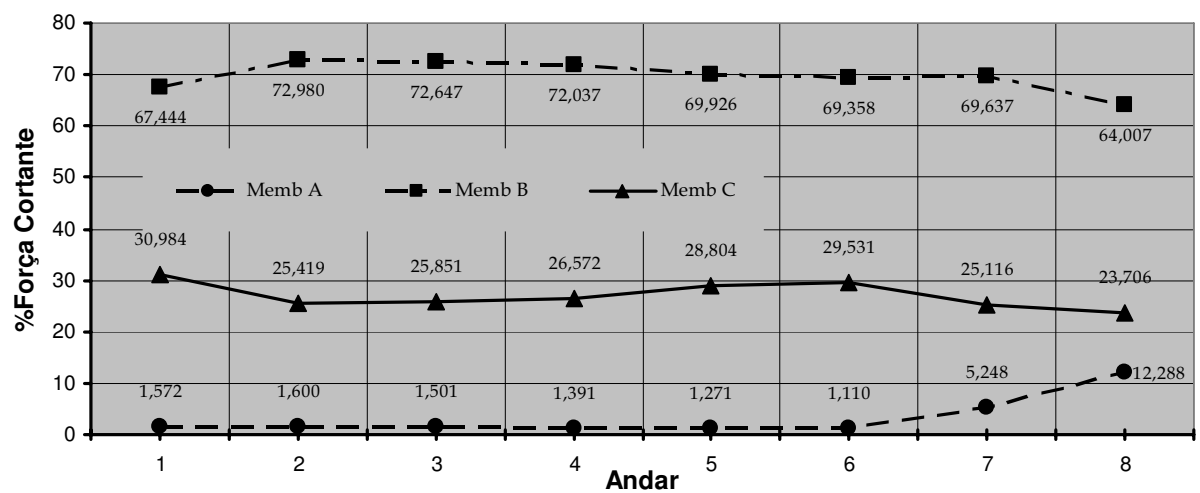


Gráfico 4-40 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo VI: Membros A, B e C - Dir.: +X

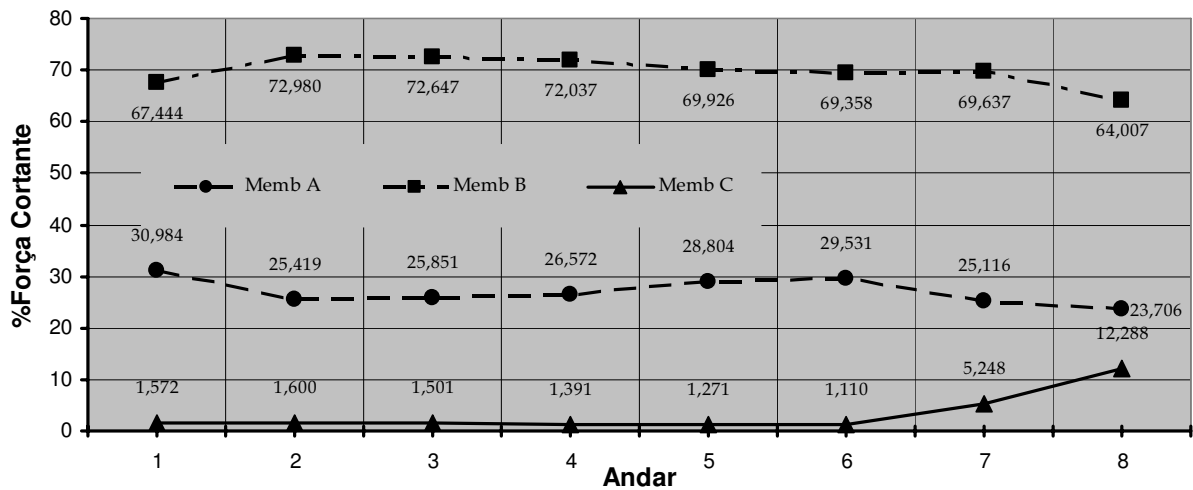


Gráfico 4-41 - Distribuição da força cortante na fase de pico - Modelo VI: Membros A, B e C - Dir.: -X

Do Gráfico 4-42 até Gráfico 4-56 acha-se representado o percentual da força cortante aplicada, cotejando-se a atuação da força lateral seguido +X e -X para todos os modelos estudados e para cada membro vertical isolado. Também se acha representado o percentual da força cortante em cada membro vertical apropriado mediante recurso ao procedimento clássico, descrito no Capítulo 3.

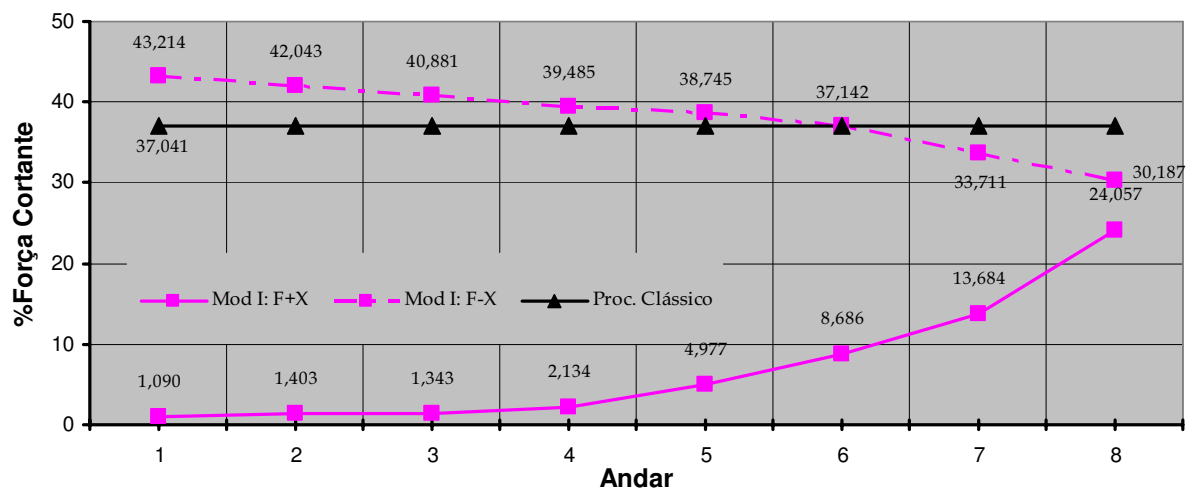


Gráfico 4-42 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro A - Modelo I: Dir.: +X e -X

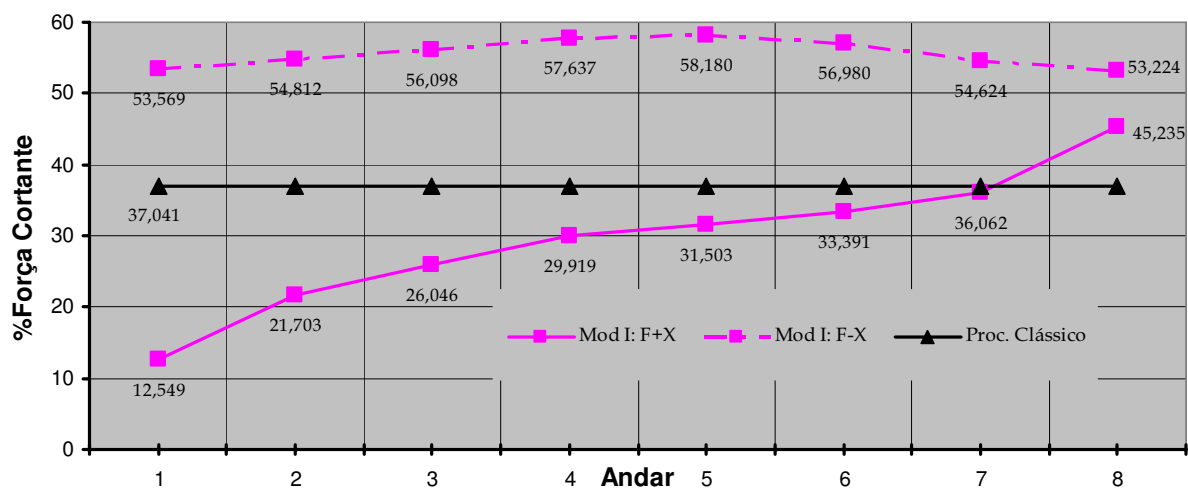


Gráfico 4-43 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro B - Modelo I: Dir.: +X e -X

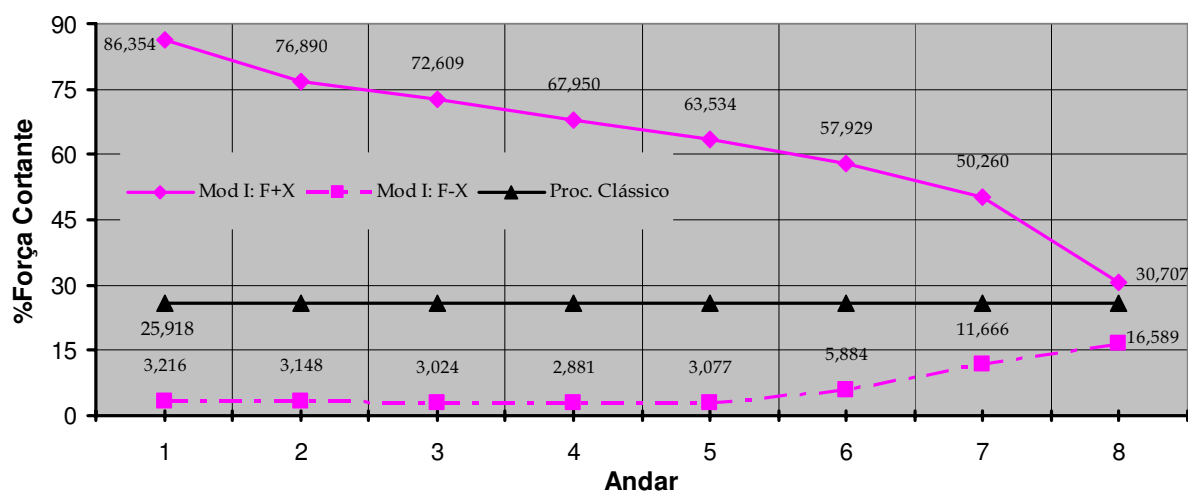


Gráfico 4-44 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro C - Modelo I: Dir.: +X e -X

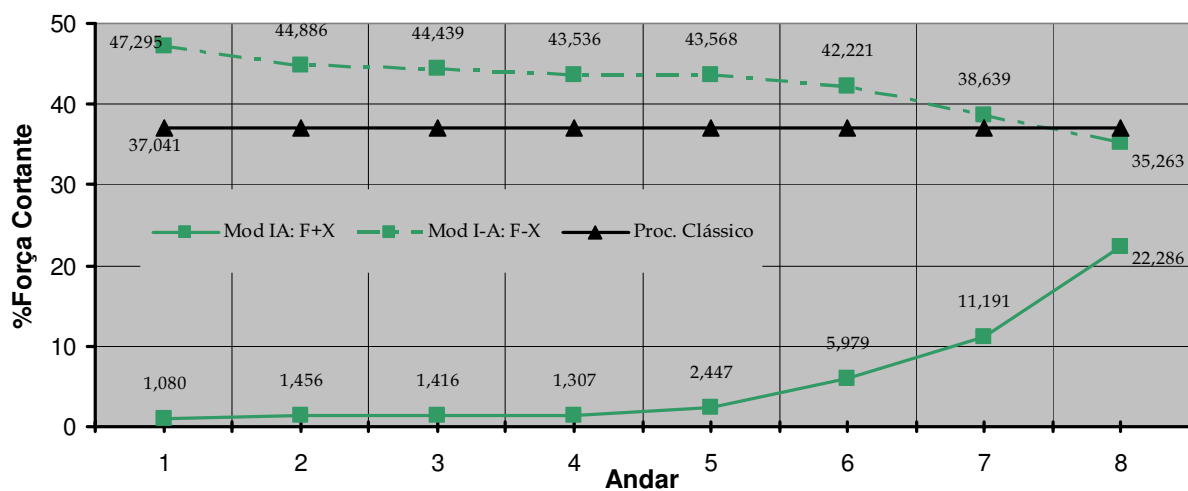


Gráfico 4-45 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro A – Modelo IA: Dir.: +X e -X

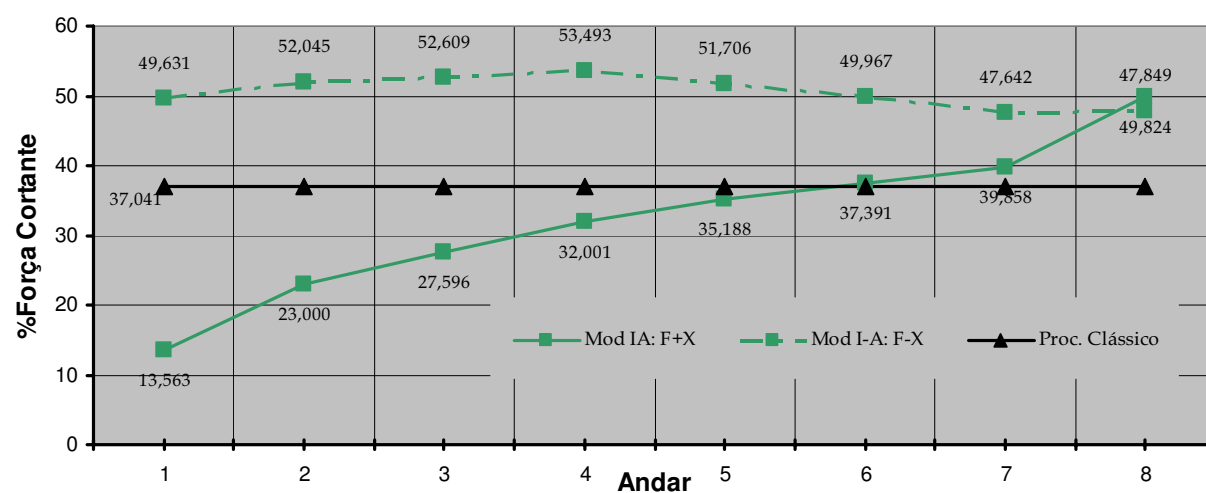


Gráfico 4-46 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro B – Modelo IA: Dir.: +X e -X

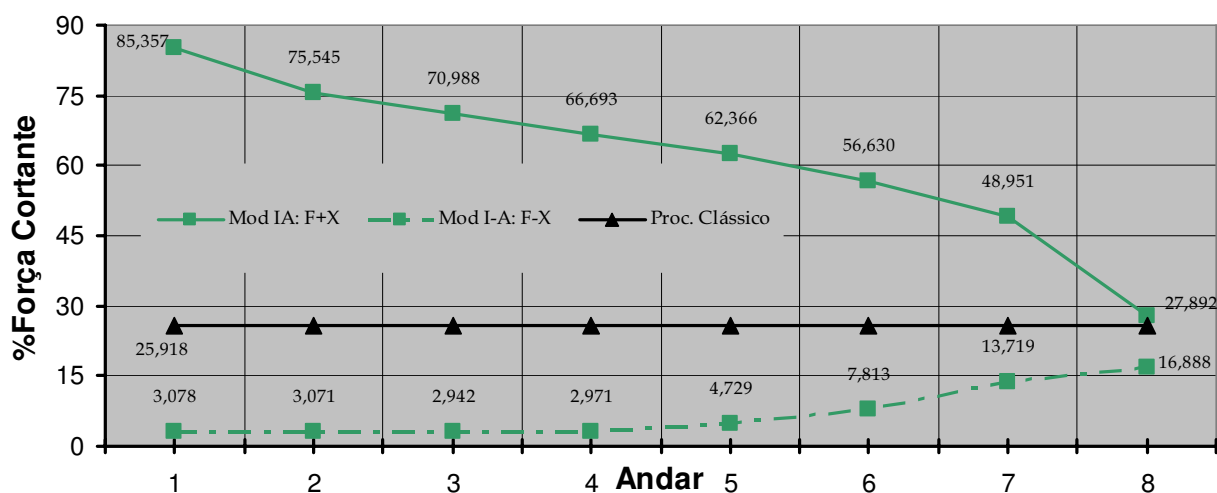


Gráfico 4-47 – Distribuição da força cortante na fase de pico Membro C – Modelo IA: Dir.: +X e -X

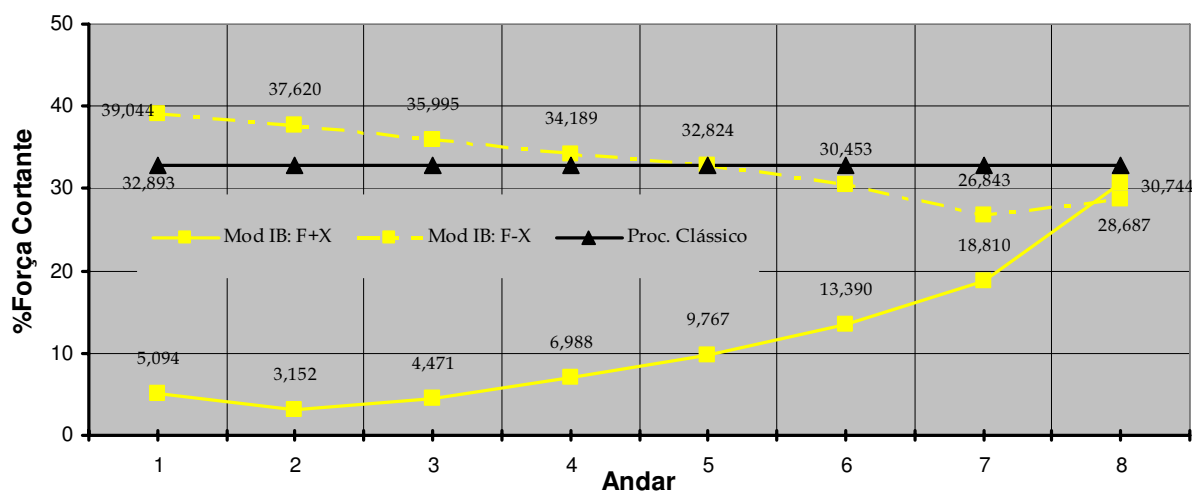


Gráfico 4-48 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro A - Modelo IB: Dir.: +X e -X

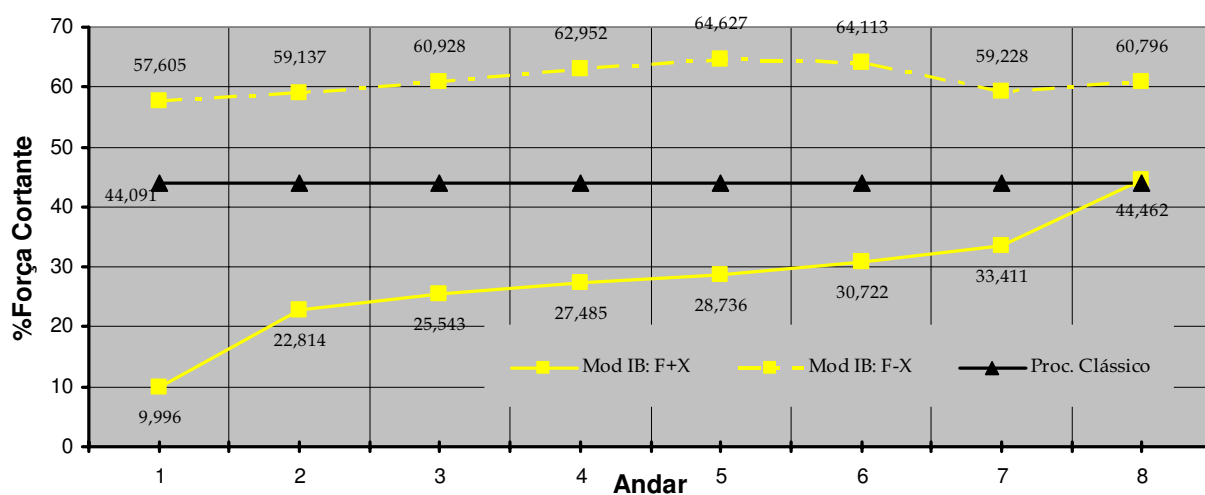


Gráfico 4-49 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro B - Modelo IB: Dir.: +X e -X

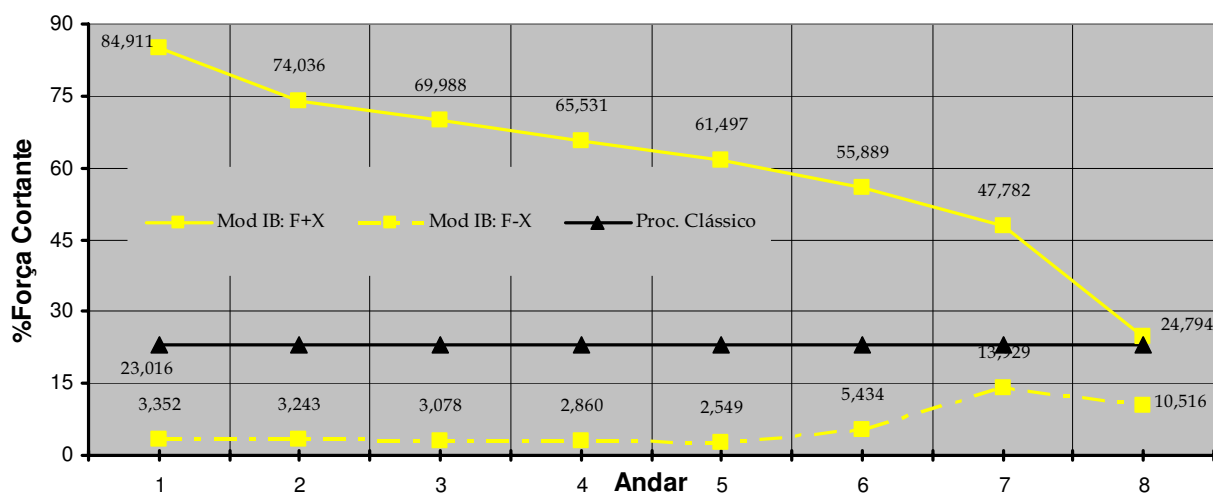


Gráfico 4-50 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro C - Modelo IB: Dir.: +X e -X

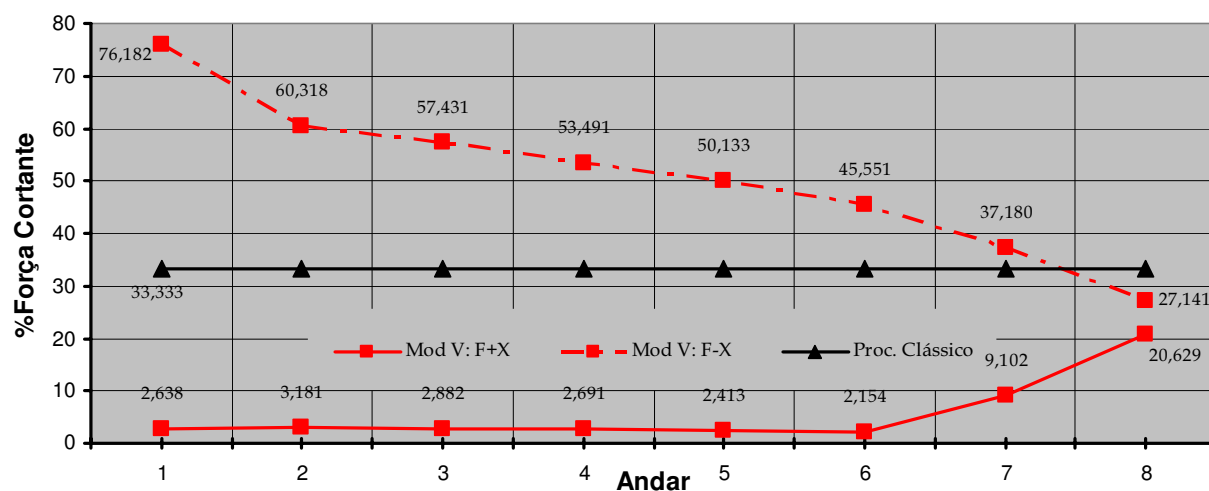


Gráfico 4-51 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro A - Modelo V: Dir.: +X e -X

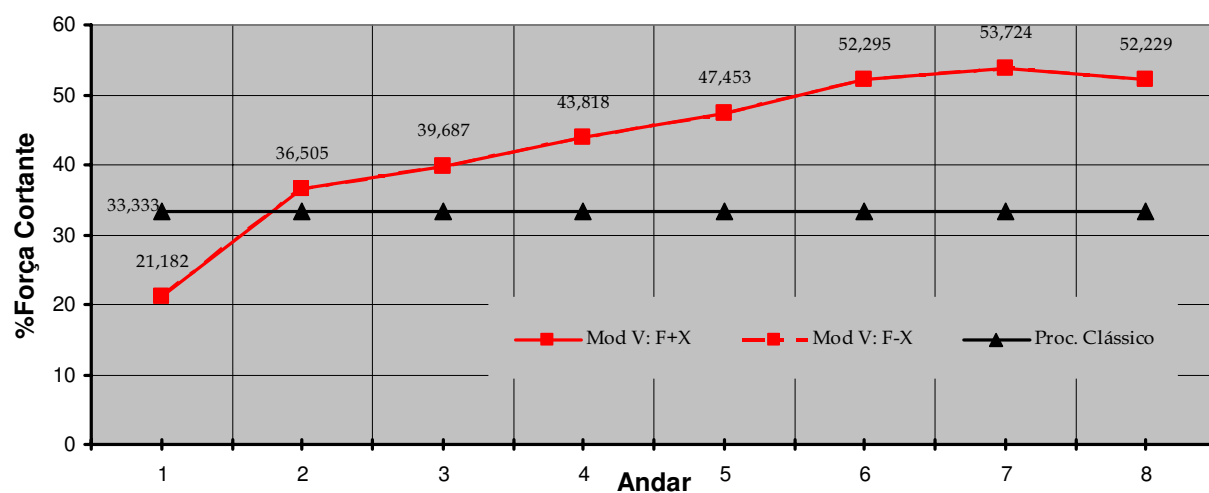


Gráfico 4-52 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro B - Modelo V: Dir.: +X e -X

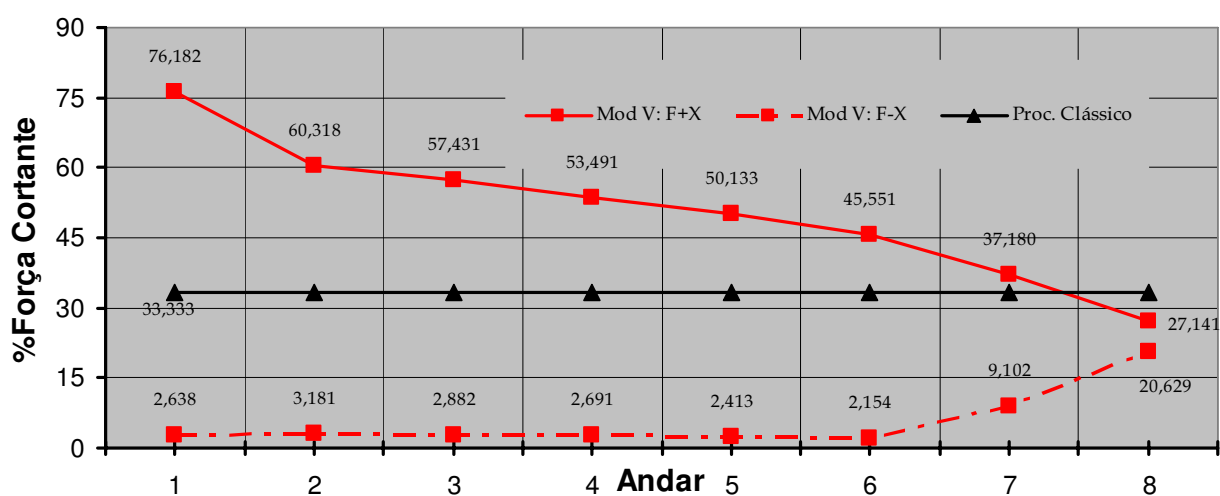


Gráfico 4-53 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro C - Modelo V: Dir.: +X e -X

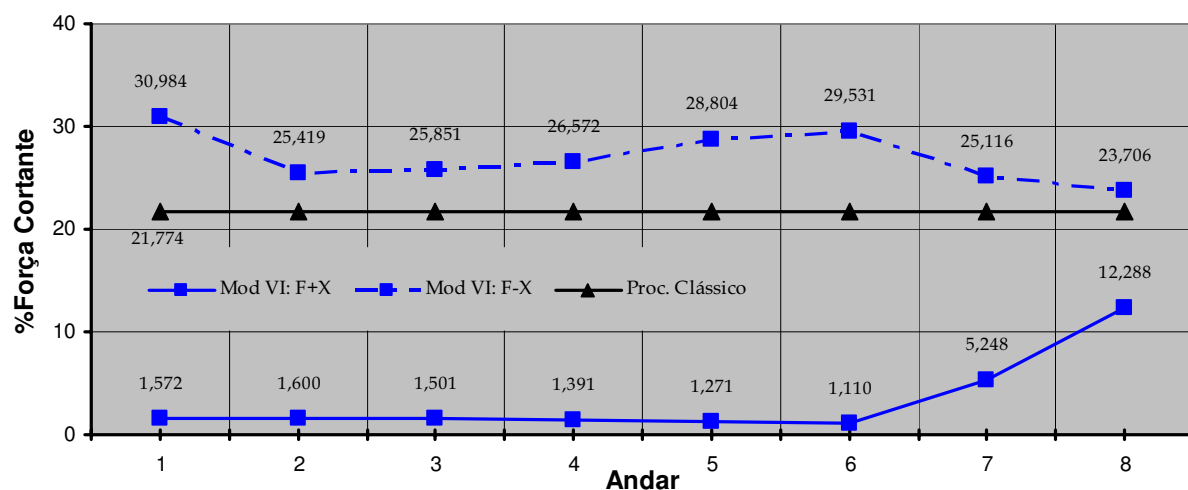


Gráfico 4-54 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro A - Modelo VI: Dir.: +X e -X

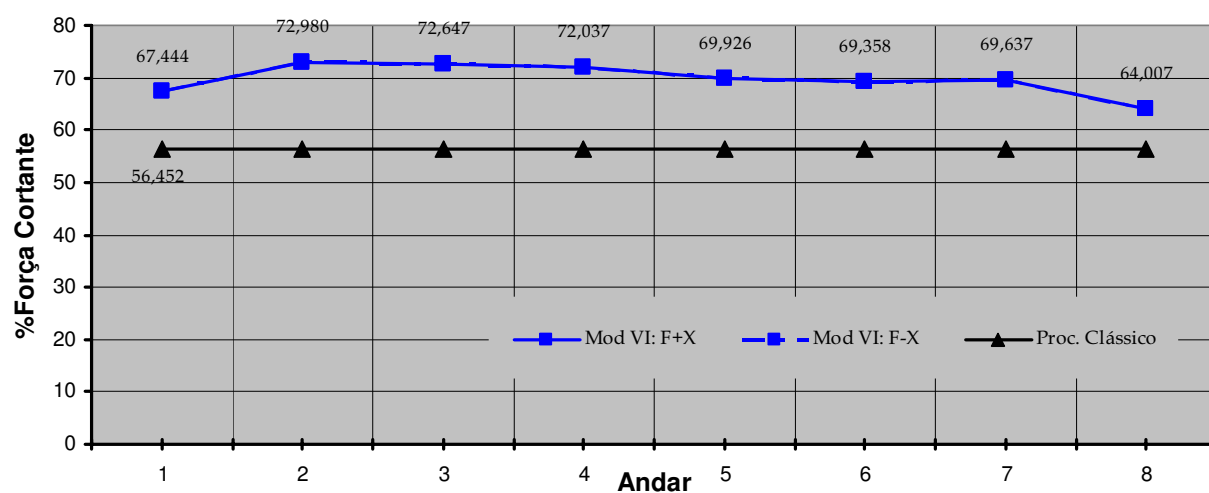


Gráfico 4-55 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro B - Modelo VI: Dir.: +X e -X

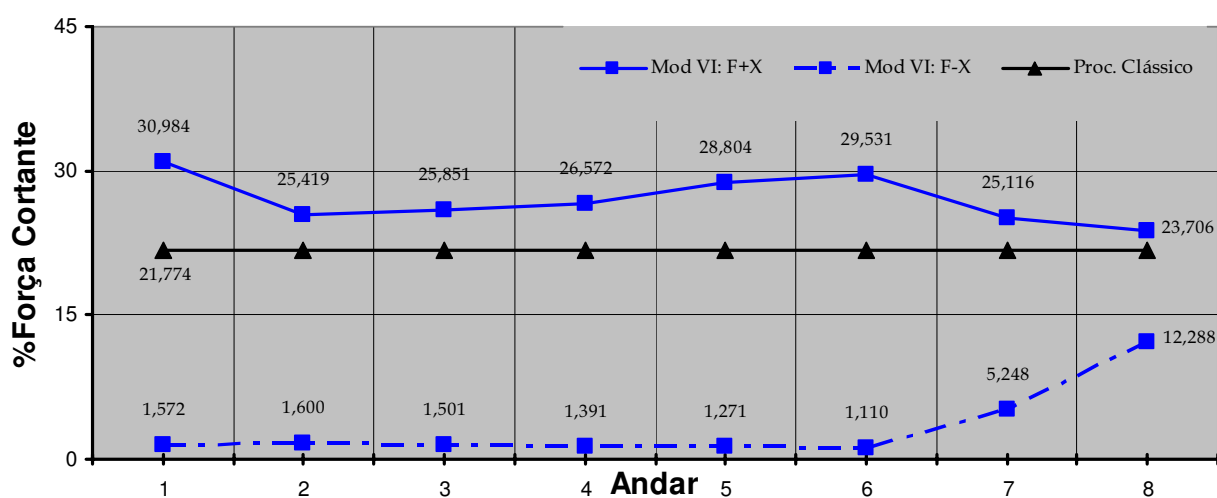


Gráfico 4-56 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro C - Modelo VI: Dir.: +X e -X

Do Gráfico 4-57 até o Gráfico 4-62 acha-se condensada a representação do percentual da força cortante que solicita cada membro vertical em todos os modelos analisados, cotejando-se a atuação da força lateral segundo +X e -X.

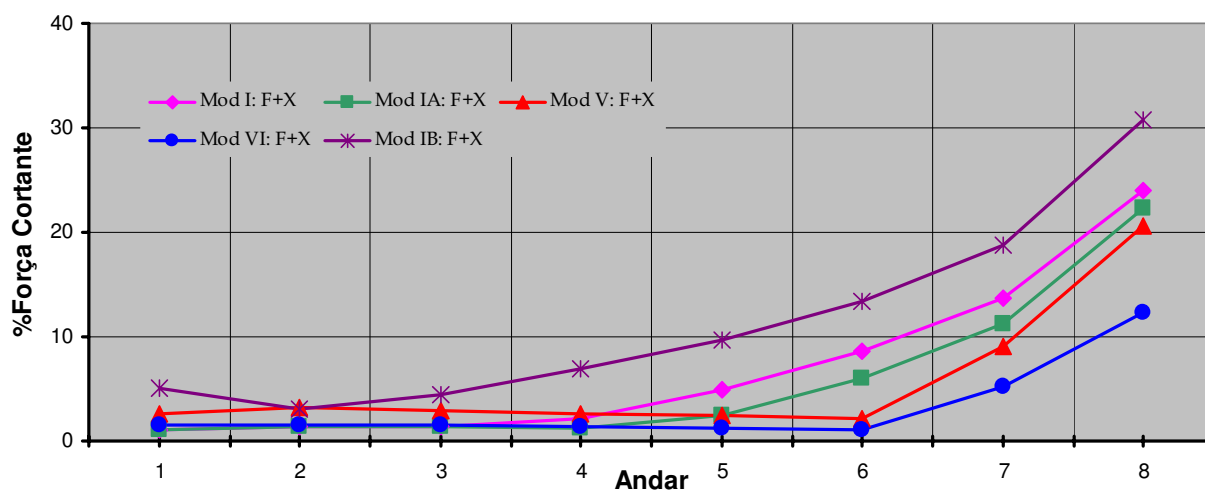


Gráfico 4-57 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro A - Modelos I, IA, IB, V e VI: +X

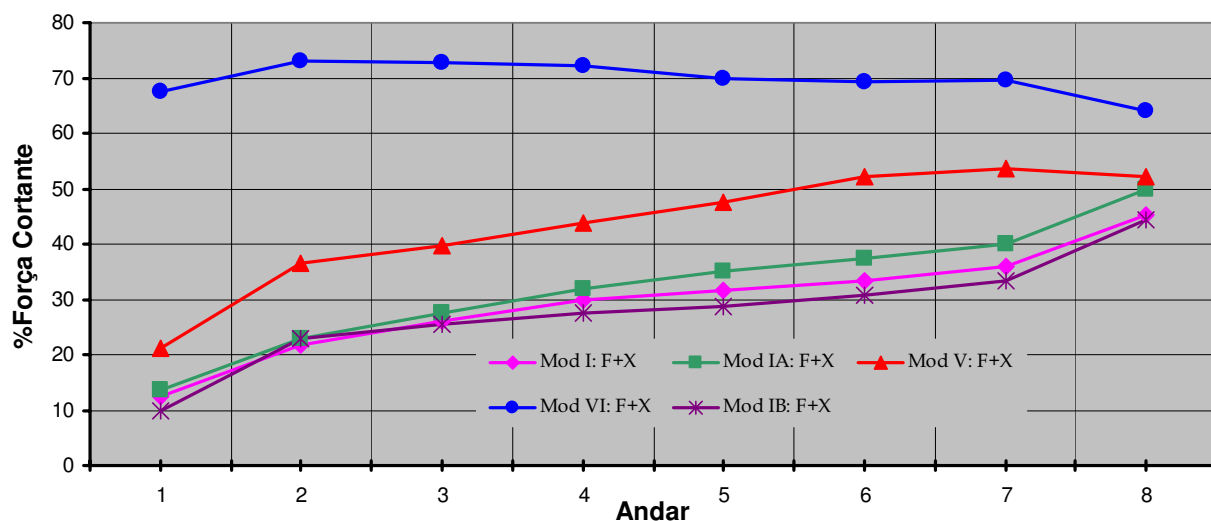


Gráfico 4-58 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro B - Modelos I, IA, IB, V e VI: +X

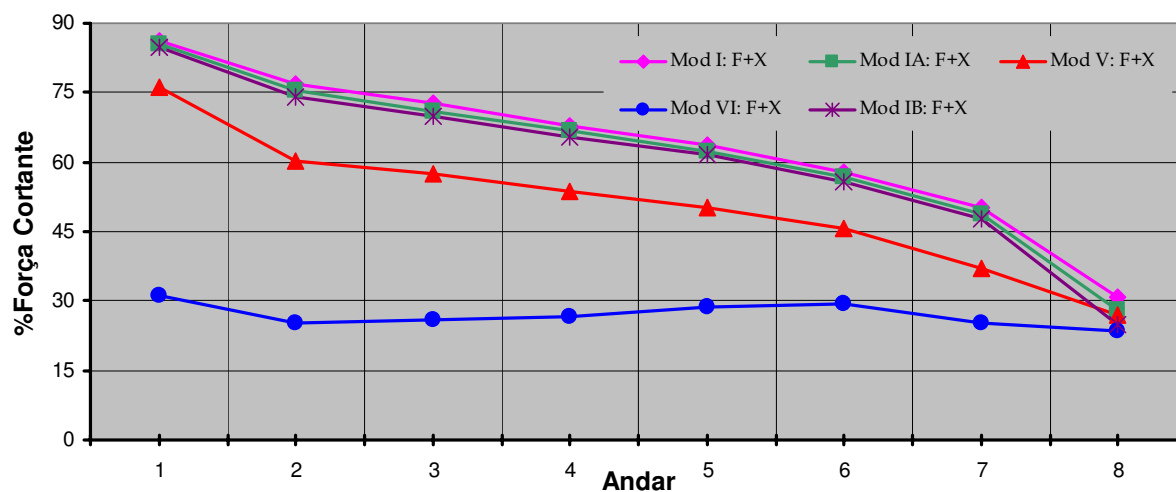


Gráfico 4-59 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro C - Modelos I, IA, IB, V e VI: +X

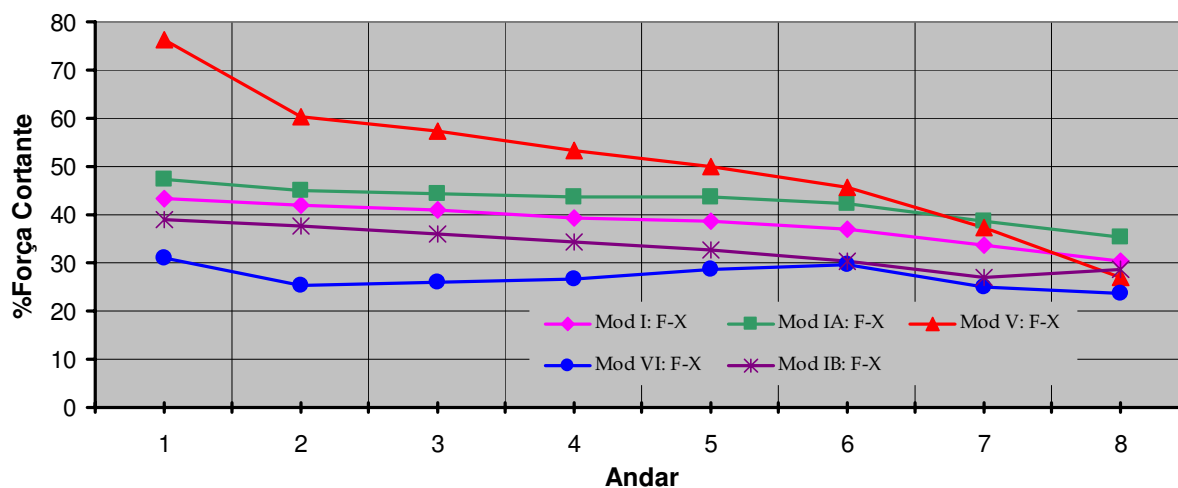


Gráfico 4-60 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro A - Modelo I, IA, V e VI: Dir.: -X

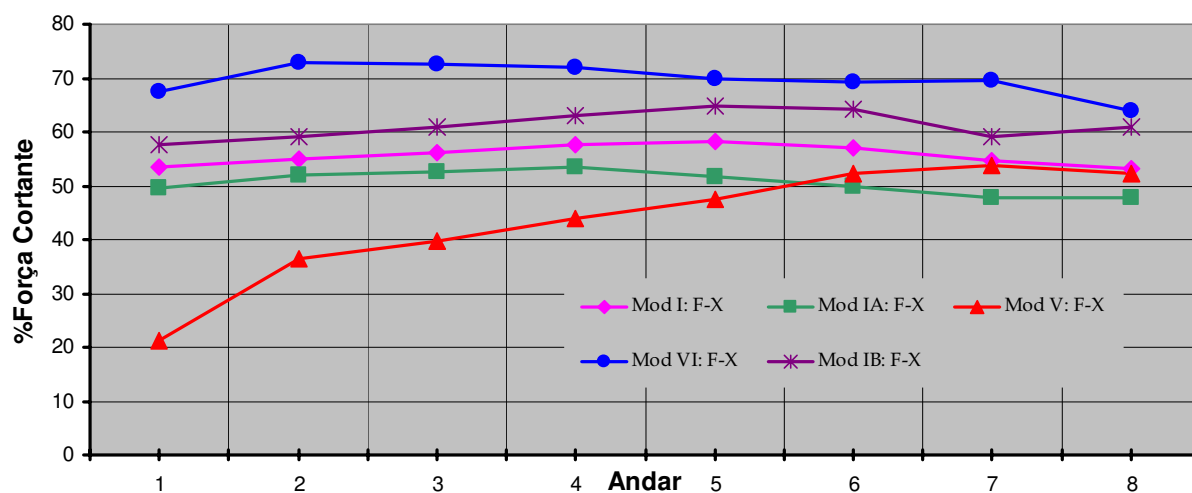


Gráfico 4-61 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro B - Modelo I, IA, V e VI: Dir.: -X

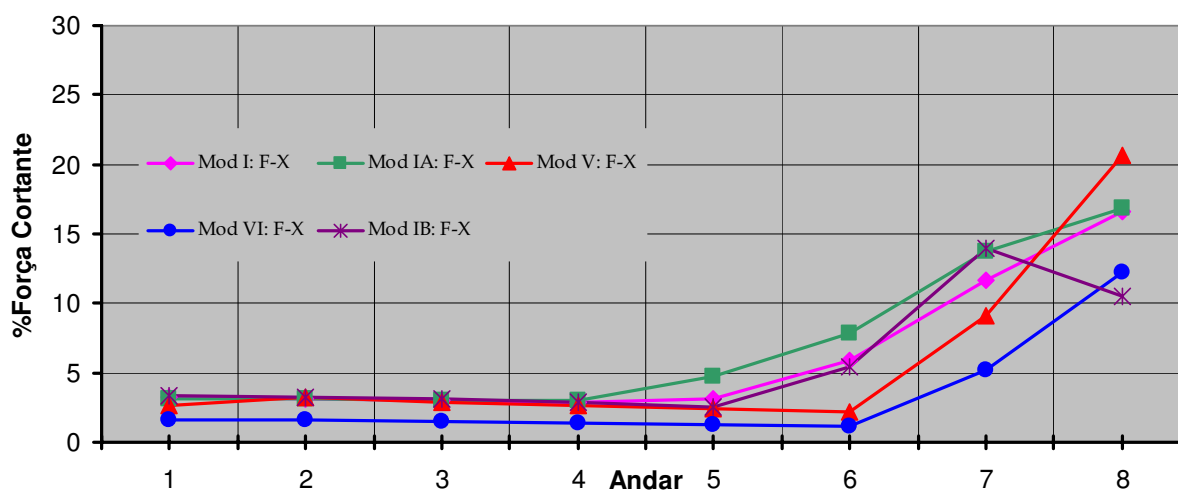


Gráfico 4-62 - Distribuição da força cortante na fase de pico Membro C - Modelo I, IA, V e VI: Dir.: -X

O exame destas figuras permite as seguintes considerações:

- Os membros verticais apresentam importante diferença de comportamento ao longo da altura da edificação, sendo notável a influência que o nível de compressão vertical desempenha na capacidade de absorção de força cortante de determinado membro (Gráfico 4-32 até o Gráfico 4-41);
- A mudança do sentido de atuação da força lateral (de +X para -X) altera de maneira importante a parcela da força cortante que solicita cada membro da parede (Gráfico 4-42 até o Gráfico 4-56);
- A apropriação da parcela da força cortante que solicita cada membro, realizada pelo procedimento clássico, conduziu a resultados sempre divergentes daquele obtidos através das análises numéricas realizadas, para todos os modelos analisados, inclusive aqueles de geometria simétrica (Gráfico 4-42 até o Gráfico 4-56);
- Para ação da força lateral segundo +X, o desnivelamento entre as aberturas do Modelo IA concorreu para a redução na parcela da força cortante que solicita o membro vertical A e acréscimo na parcela que solicita o membro vertical B. O membro vertical C quase não experimentou alteração na parcela da força cortante que o solicita em função do desnivelamento das aberturas (Gráfico 4-57 até o Gráfico 4-59), tanto no Modelo I-A quanto no Modelo I-B.
- Ainda para ação da força lateral segundo +X, o Modelo I-B apresentou um comportamento exatamente oposto daquele exibido pelo Modelo I-A, quando cotejado com o Modelo I (aberturas niveladas). Com efeito, no Modelo IB, o Membro A sempre se apresentou com forças cortantes bem superiores àquelas apresentadas por este mesmo membro no Modelo I ao passo que o Membro B se mostrou com força cortante sempre inferior àquelas apresentadas pelo modelo de aberturas niveladas.
- Esta diferença de comportamento é perfeitamente visível na parte esquerda da Figura 4:45, da Figura 4:47 e da Figura 4:49.

- O comportamento observado pode ser entendido através da observação do mecanismo de sustentação de cargas na fase de atingimento da capacidade máxima de carga lateral de um painel genérico, como se segue:
 - Para ação da força lateral segundo $+X$, as bielas comprimidas que se formam nos membros A e B dos Modelo I, I-A e I-B (Figura 4:56, Figura 4:57 e Figura 4:58) têm comprimentos diferentes por conta da ocorrência de desnivelamento entre as aberturas. Desta forma, tudo se passa como se a altura efetiva destes membros fosse alterada e àquele que tiver menor altura efetiva cabe maior parcela da força cortante aplicada. É exatamente o que pode ser observado através de uma leitura comparada da Figura 4:56 até a Figura 4:58 com o Gráfico 4-57 até o Gráfico 4-59. O membro A conta com uma altura efetiva de 1,60 m no Modelo I-B, 1,80 m no Modelo I e 2,0 m no Modelo I-A e, portanto, este membro absorve maior parcela da força cortante aplicada, no Modelo I-B, seguido do Modelo I e I-A. Mesmo raciocínio se aplica ao membro B que absorve maior parcela da força cortante aplicada, no Modelo I-A, seguido do Modelo I e Modelo I-B. Uma vez que o desnivelamento entre as aberturas não altera a altura efetiva do membro C, inexpressiva diferença de comportamento na parcela da força cortante que solicita este membro, nestes três modelos, foi observada;
 - O raciocínio acima exposto pode ser estendido para a ação da força lateral segundo $-X$, sendo importante salientar que a formação das bielas comprimidas sofre alteração na sua formação em função da mudança de sentido de atuação da força.

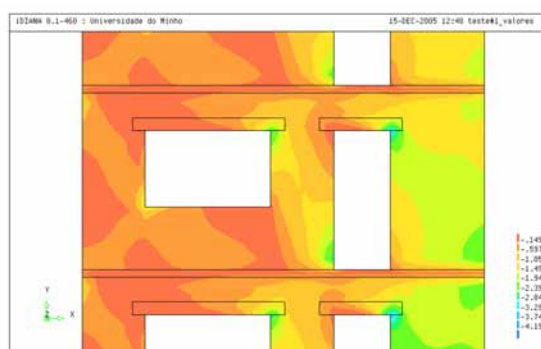


Figura 4:56 - Tensões principais mínimas - Pannel genérico - Modelo I: Dir +X

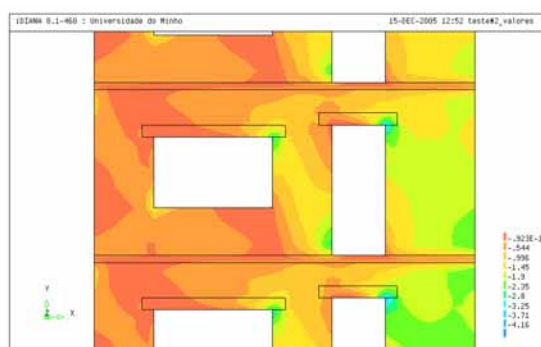


Figura 4:57 - Tensões principais mínimas - Pannel genérico - Modelo I-A: Dir +X

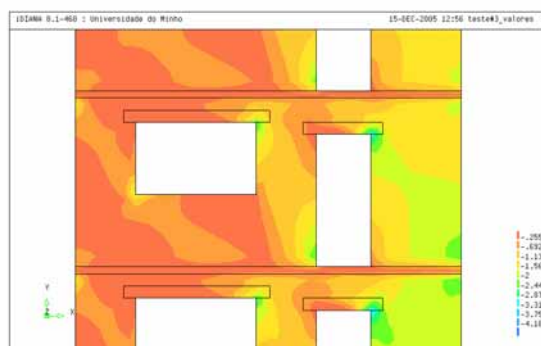


Figura 4:58 - Tensões principais mínimas - Pannel genérico - Modelo I-B: Dir +X

Os modelos de geometria simétrica (Modelo V e VI) também exibiram comportamento diferenciado entre si, sendo possível observar que o Modelo VI conta com um membro vertical de comprimento duplicado em relação aos demais, sendo por isto responsável por cerca de 70% da força cortante aplicada ao longo de todos os andares da edificação (Gráfico 4-51 até o Gráfico 4-56).

4.6 Súmula das análises numéricas realizadas

As próximas seções sumarizam os principais achados das análises numéricas realizadas, em termos do principal objetivo da presente pesquisa que é a investigação da distribuição da força cortante em paredes de contraventamento dotadas de abertura.

4.6.1 Configuração da Parede e Sentido de Atuação da Força Horizontal

O projeto de paredes de alvenaria com aberturas deve levar em consideração a quantidade, a localização e o tamanho das aberturas. A fim de oferecer informações que possam ser de utilidade para esta finalidade, serão sumarizados a seguir tópicos relativos à configuração geométrica e sentido de atuação da força horizontal nos modelos estudados.

4.6.1.1 Efeito do sentido de atuação da força horizontal

Conforme já discutido ao longo deste capítulo, o sentido de atuação da força horizontal (+X ou -X) altera de maneira importante o comportamento global das paredes de alvenaria com aberturas. Para ilustrar este fato, a Figura 4:59 e a Figura 4:60 exibem comparação da força lateral x distorção angular para dois dos modelos analisados, Modelos I e III, para o caso da parede térreo isolada. Para o Modelo I, o comportamento exibido para as duas hipóteses de atuação da força horizontal foi bastante similar, devendo ser ressaltado um ligeiro incremento na rigidez e resistência deste modelo, quando a força horizontal atua segundo -X. A ductilidade para as duas situações de carga se mostrou muito similar. Já para o Modelo III, o comportamento observado foi bastante diferente para as duas hipóteses consideradas, tanto em nível de rigidez e resistência quando em ductilidade, sendo observado que, para ação da força horizontal segundo -X, o Modelo III exibiu maior rigidez e resistência e uma menor ductilidade quando comparado com o comportamento para ação da força horizontal segundo +X.

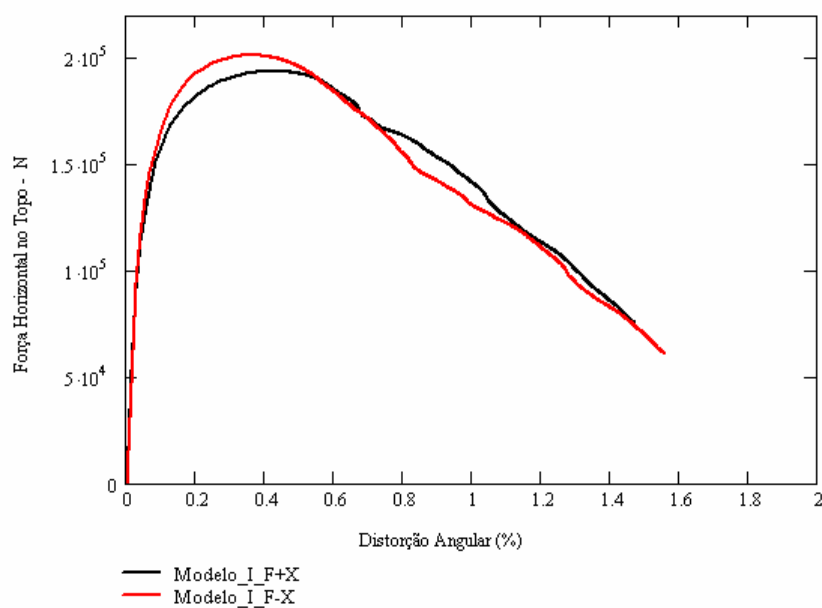


Figura 4:59 - Força horizontal - Distorção angular: Modelos I - Parede Térrea: Caso II: F+X e F-X

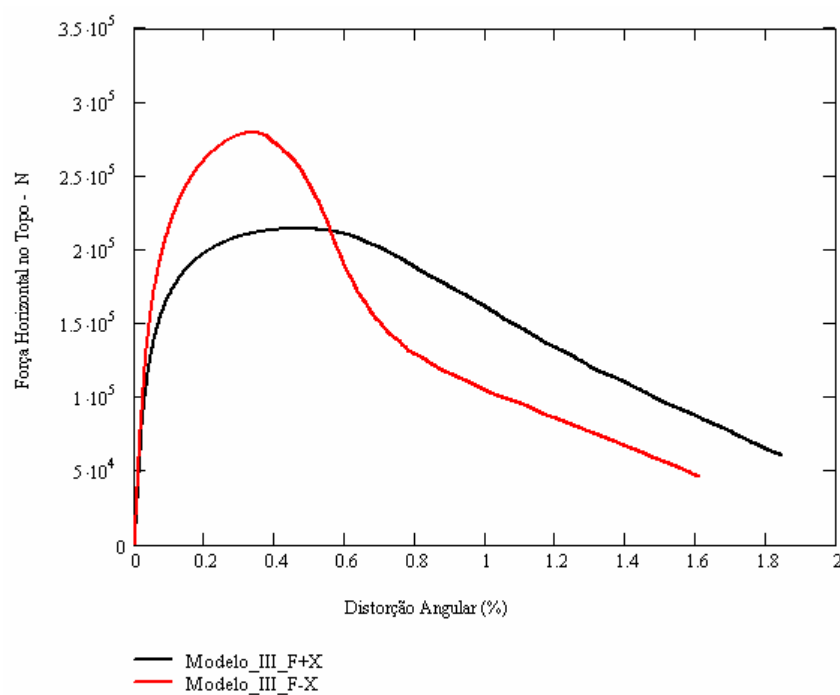


Figura 4:60 - Força horizontal - Distorção angular: Modelos II - Parede Térrea I: Caso II: F+X e F-X

Para os modelos estudados, correspondentes a paredes de contraventamento de uma edificação de múltiplos andares, também foram observadas importantes diferenças entre as respectivas curvas de capacidade quando se permuta a atuação da força lateral (vê Gráfico 4-25, Gráfico 4-26 e Gráfico 4-27).

Em termos do perfil de distribuição das tensões de cisalhamento e das tensões principais mínimas, a mudança no sentido de atuação da força horizontal gera expressivas diferenças no comportamento global das paredes com aberturas alterando, por conseguinte, a parcela da força cortante que solicita cada um dos seus membros verticais. A Figura 4:61 a seguir apresenta uma comparação entre o perfil de distribuição das tensões normais mínimas e tensões de cisalhamento, na fase de pico, para o Modelo I para atuação da força horizontal segundo a direção $+X$ e $-X$, para o caso da parede térreo isolada. Nestas figuras é possível observar com clareza a alteração de comportamento gerada pela mudança no sentido de atuação da força horizontal. Comportamento com mesma característica foi observado nos modelos de paredes de contraventamento de edificação de múltiplos andares, conforme mostram a Figura 4:46, a Figura 4:48, a Figura 4:50, a Figura 4:52 e a Figura 4:54.

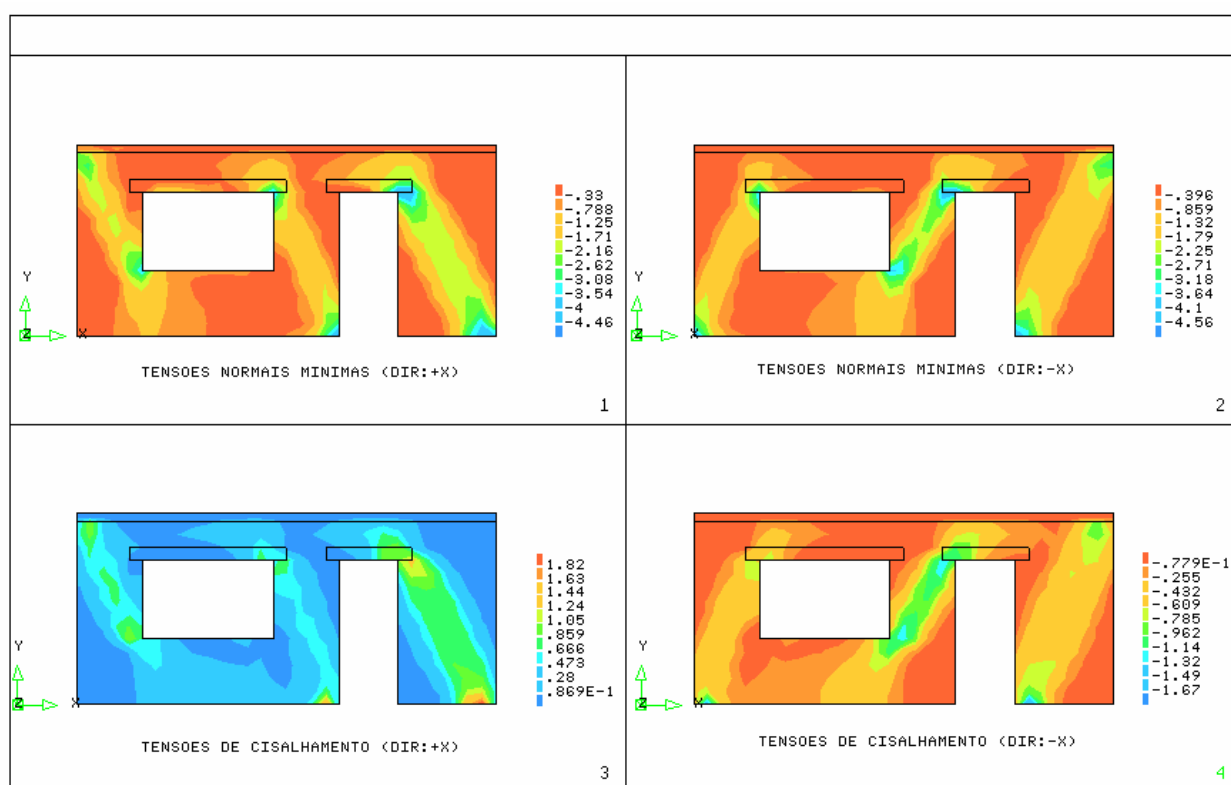


Figura 4:61 – Perfil das tensões principais mínimas e tensões de cisalhamento – Mod I – Parede Térreo

A alteração do sentido de atuação da força horizontal se reflete também na alteração dos efeitos do momento de tombamento no aumento ou decréscimo da capacidade resistente da parede. Com efeito, se o momento de tombamento atuar no sentido de transferir tensão de compressão vertical do membro vertical mais rígido para o mais flexível, a capacidade de carga da parede diminui (Modelo III, F+X, Anexo B) e se acontecer o contrário a capacidade de carga da parede aumenta (Modelo III, F-X, Anexo B). Nos modelos correspondentes a paredes de contraventamento de uma edificação de múltiplos andares este aspecto pode ser observado no Gráfico 4-30 e no Gráfico 4-31.

O Gráfico 4-63 e o Gráfico 4-64 a seguir exemplificam, para o caso dos Modelos I e I-A da parede térreo isolada, a alteração da parcela da força cortante que solicita os membros verticais da parede em decorrência da alteração no sentido de atuação da força lateral.

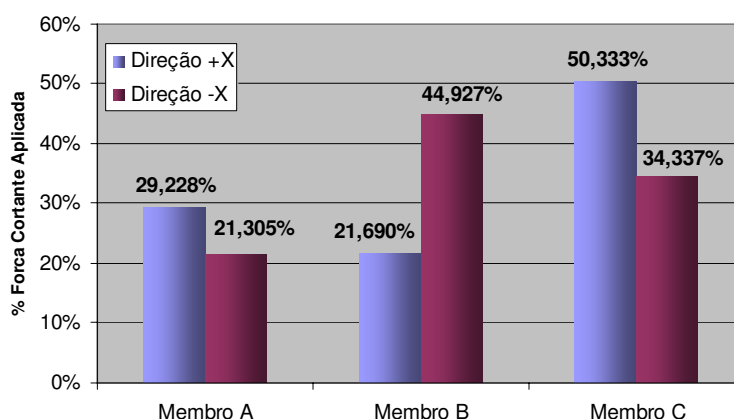


Gráfico 4-63 - Distribuição da força cortante - Modelo I - Caso II - Parede Térrea: Dir. +X e -X

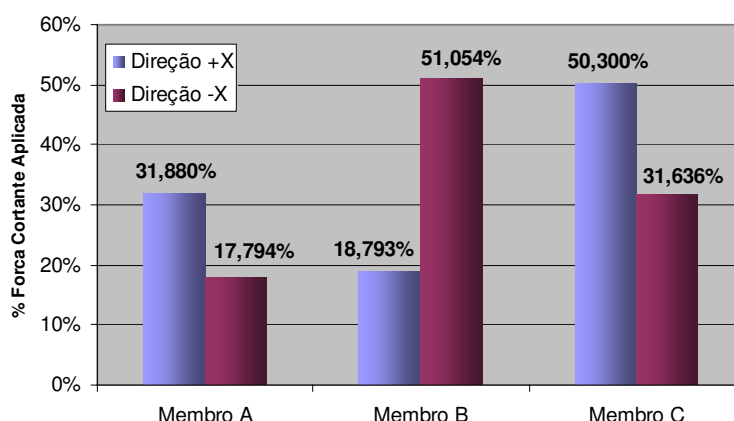


Gráfico 4-64 - Distribuição da força cortante - Modelo I-A - Caso II - Parede Térrea: Dir. +X e -X

Para a parede da edificação de múltiplos andares, este comportamento pode ser visto no Gráfico 4-42 até o Gráfico 4-56.

4.6.1.2 Efeito da localização das aberturas

Os resultados dos modelos analisados mostraram que a localização das aberturas no interior da parede de contraventamento altera o comportamento global da mesma. Para ilustrar isto, o Gráfico 4-67 exibe uma comparação da força lateral x distorção angular para dois dos modelos analisados (Modelos I e III) com força horizontal segundo +X, para o caso da parede térreo isolada.

Em termos de ductilidade, o comportamento de ambos os modelos é razoavelmente similar muito embora seja possível observar que o Modelo III exibiu uma maior rigidez e resistência quando comparado com o Modelo I. Isto pode ser explicado pelo fato de que modificando a localização das aberturas no interior do painel resultam modificações geométricas nos elementos verticais que compõem a parede, sendo criado, desta forma, elementos maiores e rígidos e outros menores e flexíveis. O comportamento destes dois modelos é, então, governado pelo comportamento do membro maior que obviamente possui uma maior rigidez e resistência. No caso do Modelo III, o maior membro vertical tem comprimento de 1,8 m ao passo que no Modelo I este comprimento é de 1,5 m, daí o melhor desempenho do Modelo III.

O fato da ductilidade destes dois modelos não se mostrar muito diferente se está associado à relação de forma dos respectivos membros mais rígidos, levando-se em consideração a altura do membro definida a partir do mecanismo de sustentação de cargas na fase de pico da força horizontal, caracterizado pela formação das bielas. Para o membro C do Modelo I esta relação vale 1,467 (2,2 m / 1,5 m) e para o membro B no Modelo III esta relação vale 1,222 (2,2 m / 1,8 m). Deve-se ressaltar ademais que a menor relação de forma do membro B no Modelo III concorre para uma discreta redução da ductilidade deste modelo. Este comportamento pode ser visualizado de maneira mais clara no Gráfico 4-66, que compara as mesmas variáveis para os Modelos V e VI (relação de forma do membro mais rígido de 0,786 no Modelo V e 0,55 no Modelo VI).

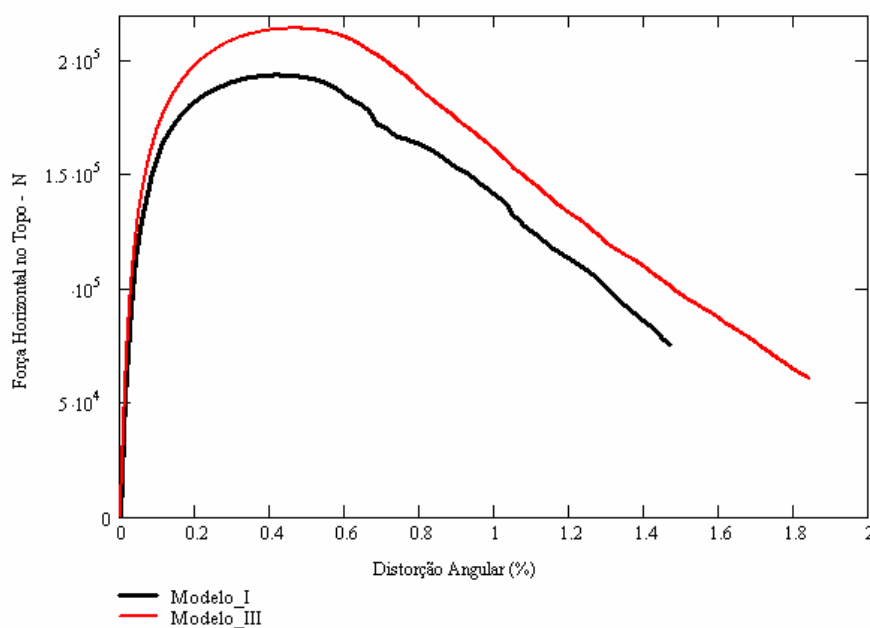


Gráfico 4-65 – Força horizontal – Distorção angular: Modelos I e III - Parede Térrea: Caso II: F+X

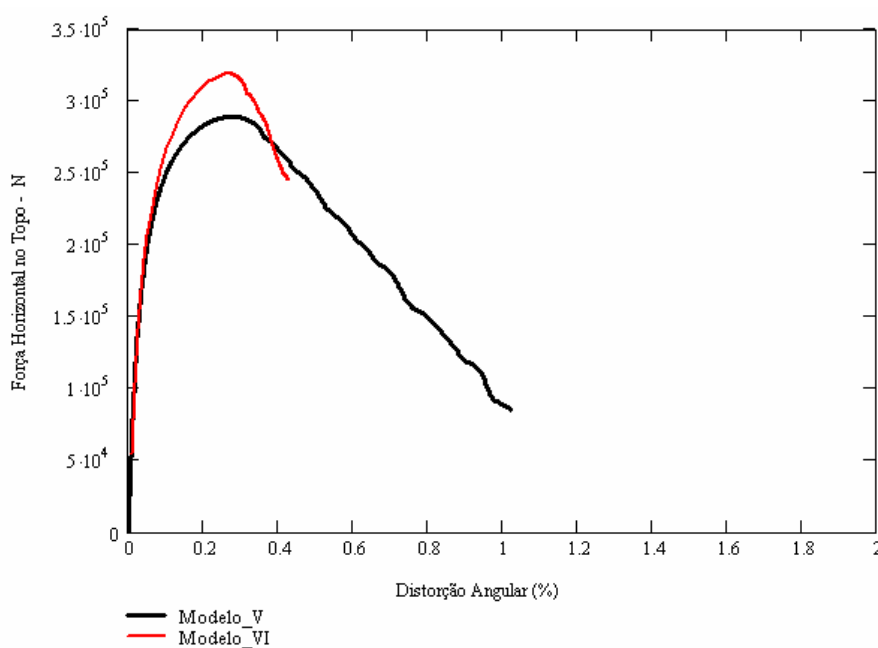


Gráfico 4-66 – Força horizontal – Distorção angular: Modelos V e VI - Parede Térrea I: Caso II

No que diz respeito à distribuição da força cortante aplicada, o efeito da localização da abertura, para o caso da parede térreo isolada, acha-se exemplificado no Gráfico 4-67 a seguir, que mostra a parcela da força cortante que solicita cada membro da parede para Modelos I, III, V e VI, que têm diferentes localizações de aberturas.

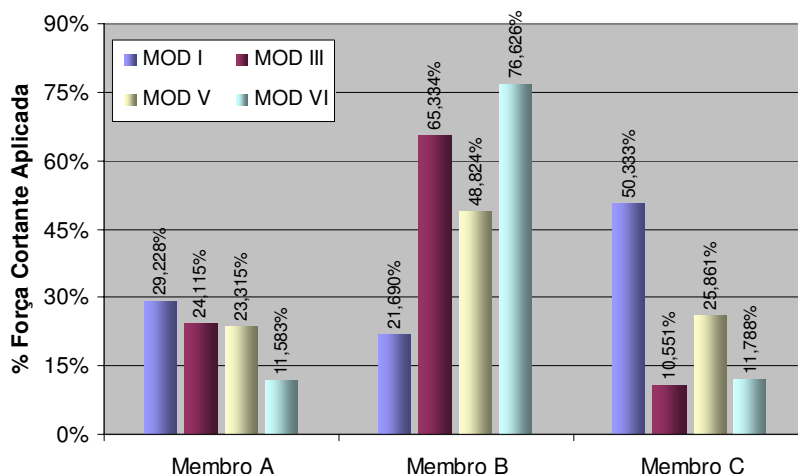


Gráfico 4-67 - Efeito da localização da abertura - Mod I, III, V e VI - Caso II - Parede Térrea: Dir. +X

Nos modelos correspondentes às paredes de contraventamento da edificação de múltiplos andares o efeito da localização das aberturas pode ser visualizado comparando-se Modelos I, V e VI, para cada membro isoladamente, ao longo da altura da edificação, conforme exibem o Gráfico 4-68, o Gráfico 4-69 e o Gráfico 4-70 a seguir.

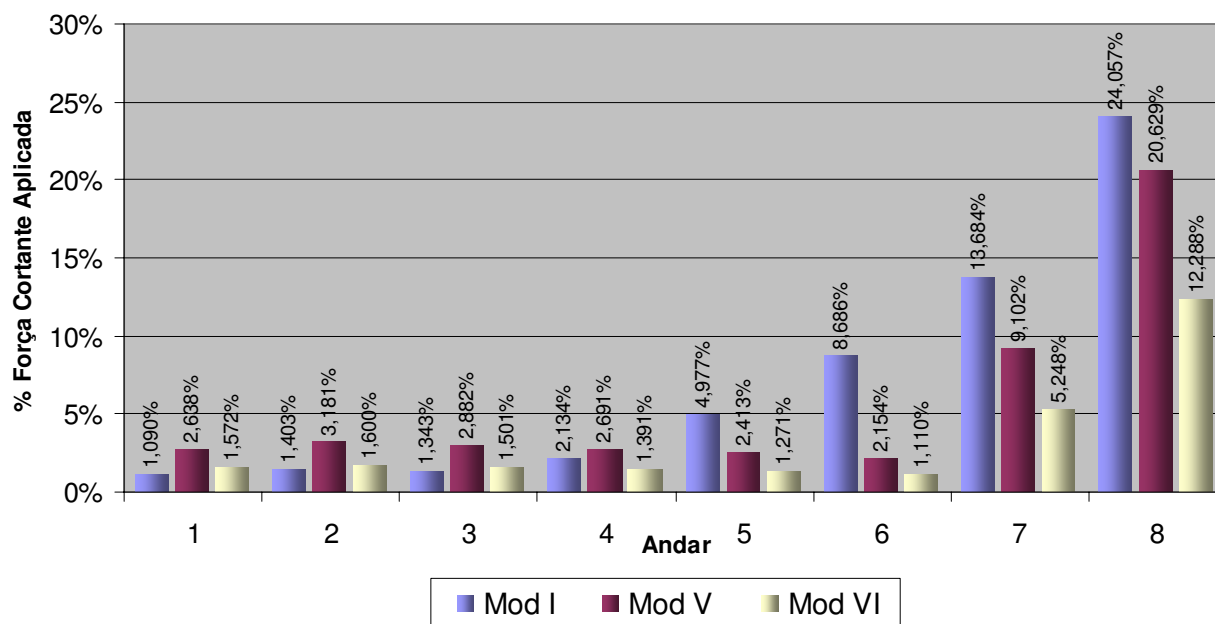


Gráfico 4-68 - Efeito da localização das aberturas - Membro A - Mod I, V e VI - 8 Pav: Dir. +X

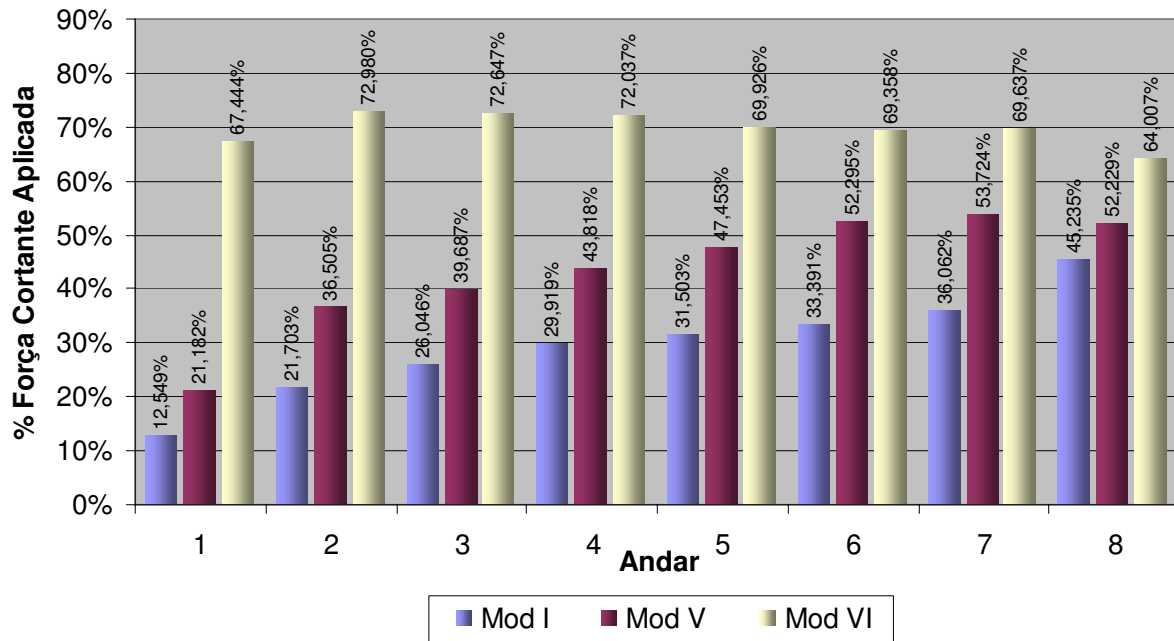


Gráfico 4-69 - Efeito da localização das aberturas - Membro B - Mod I, V e VI - 8 Pav: Dir. +X

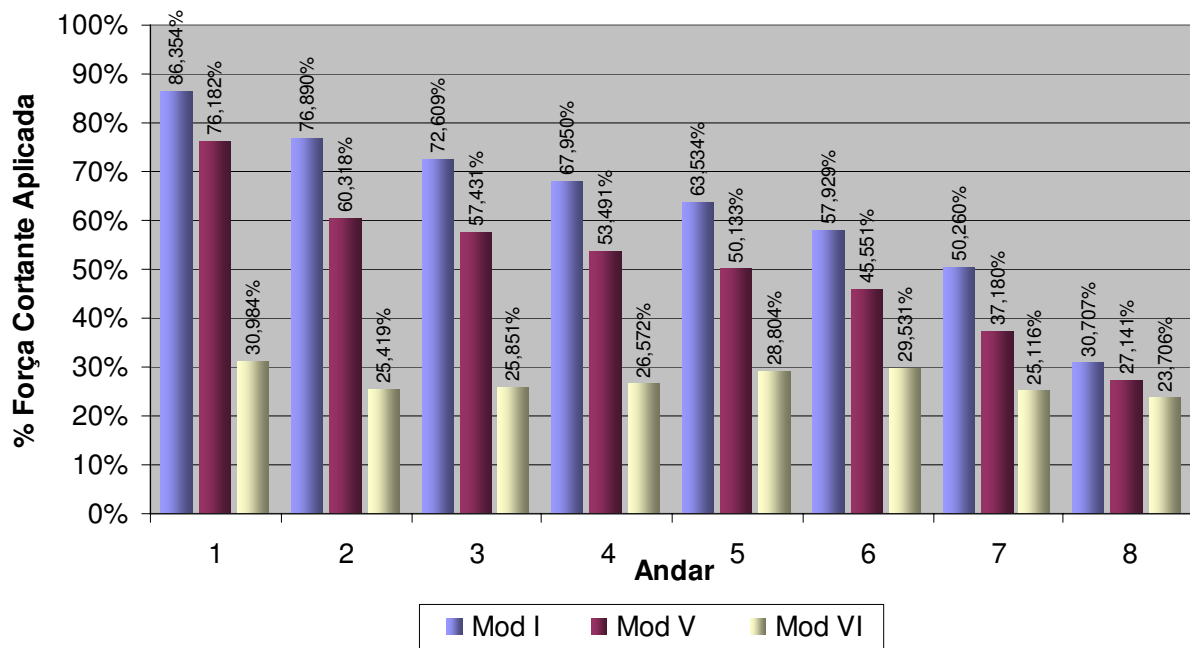


Gráfico 4-70 - Efeito da localização das aberturas - Membro C - Mod I, V e VI - 8 Pav: Dir. +X

4.6.1.3 Efeito do desnivelamento das aberturas

O comportamento global dos modelos também se mostrou afetado pelo desnivelamento entre as aberturas. O Gráfico 4-71 e o Gráfico 4-72 exibem uma comparação da força lateral x distorção angular para dois grupos dos modelos analisados

(Modelos I, I-A e I-B; Modelos III, III-A e III-B) com força horizontal segundo +X, para o caso da parede térreo isolada.

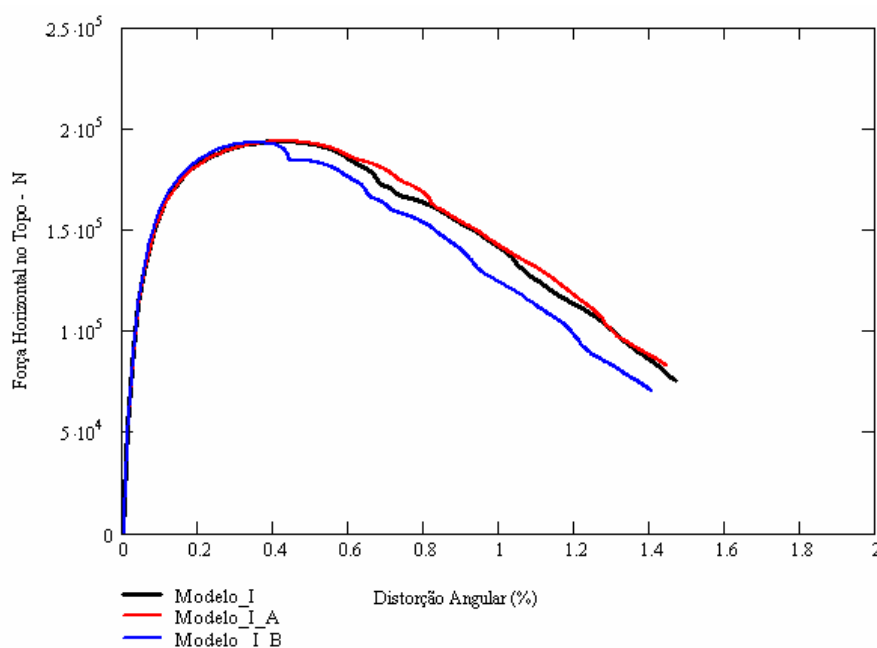


Gráfico 4-71 - Força horizontal - Distorção angular: Modelos I, I-A e I-B - Parede Térrea: Caso II: F+X

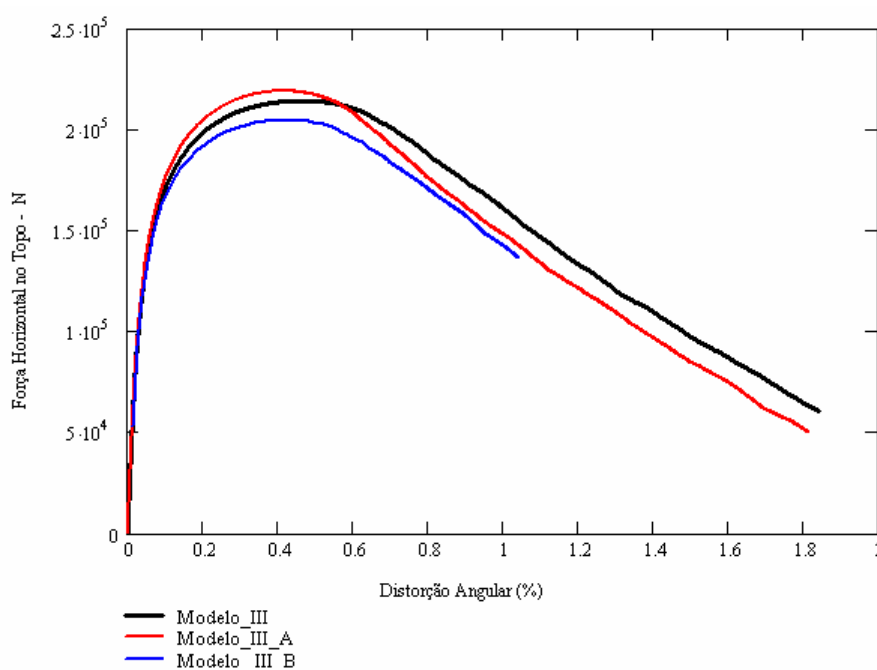


Gráfico 4-72 - Força horizontal - Distorção angular: Modelos III, III-A e III-B - Parede Térrea: Caso II: F+X

É possível observar que as diferenças de comportamento foram mais expressivas na fase de pico e pós-pico para os Modelos III e na fase de pós-pico para os Modelos I, sendo que o modelo que conta com abertura da janela desnivelada para cima

em relação à da porta (Modelo III-B) exibiu menor rigidez e resistência quando comparado com o modelo com aberturas niveladas. As ductilidades destes modelos são razoavelmente similares.

No que respeita à distribuição da força cortante aplicada, o efeito do desnivelamento entre as aberturas, para o caso da parede térreo isolada, acha-se exemplificado no Gráfico 4-73 a seguir, que mostra a parcela da força cortante que solicita cada membro da parede para Modelos I, I-A e I-B, que contam com aberturas em níveis diferentes.

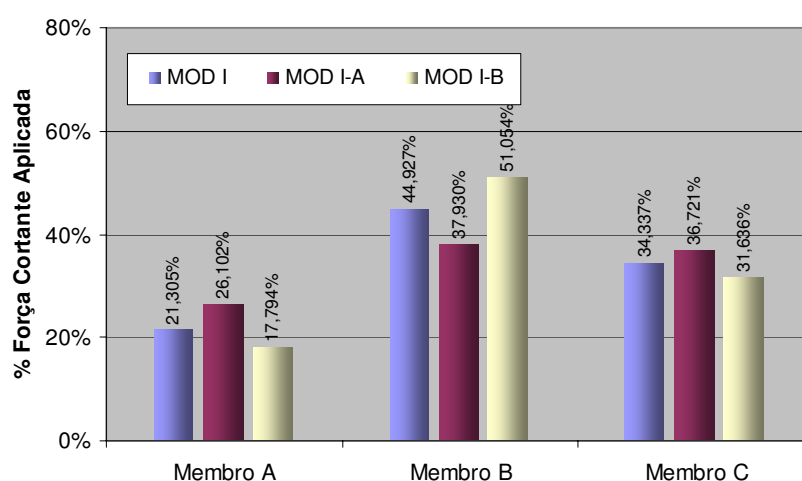


Gráfico 4-73 - Efeito do desnivelamento das aberturas - Mod I, I-A e I-B - Caso II - Parede Térrea: Dir. -X

Nos modelos correspondentes às paredes de contraventamento da edificação de múltiplos andares o efeito do desnivelamento das aberturas pode ser visualizado comparando-se Modelos I, I-A e I-B, para cada membro isoladamente, ao longo da altura da edificação, conforme exibem o Gráfico 4-74, o Gráfico 4-75 e o Gráfico 4-76 a seguir.

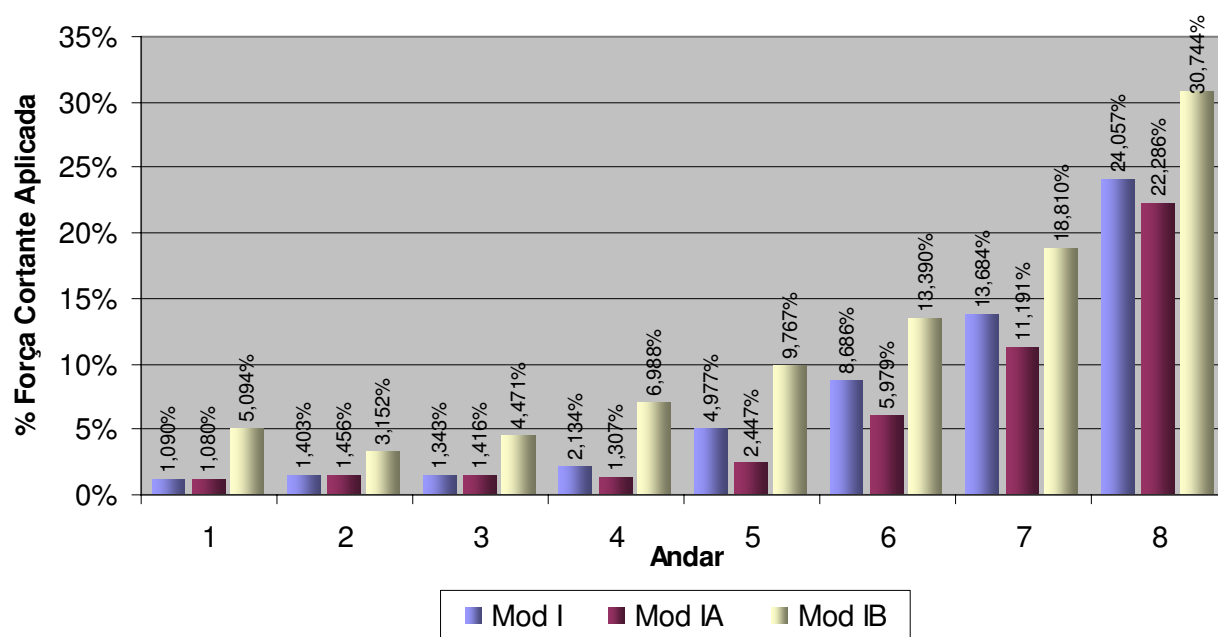


Gráfico 4-74 - Efeito do desnivelamento das aberturas - Membro A - Mod I, I-A e I-B - 8 Pav: Dir. +X

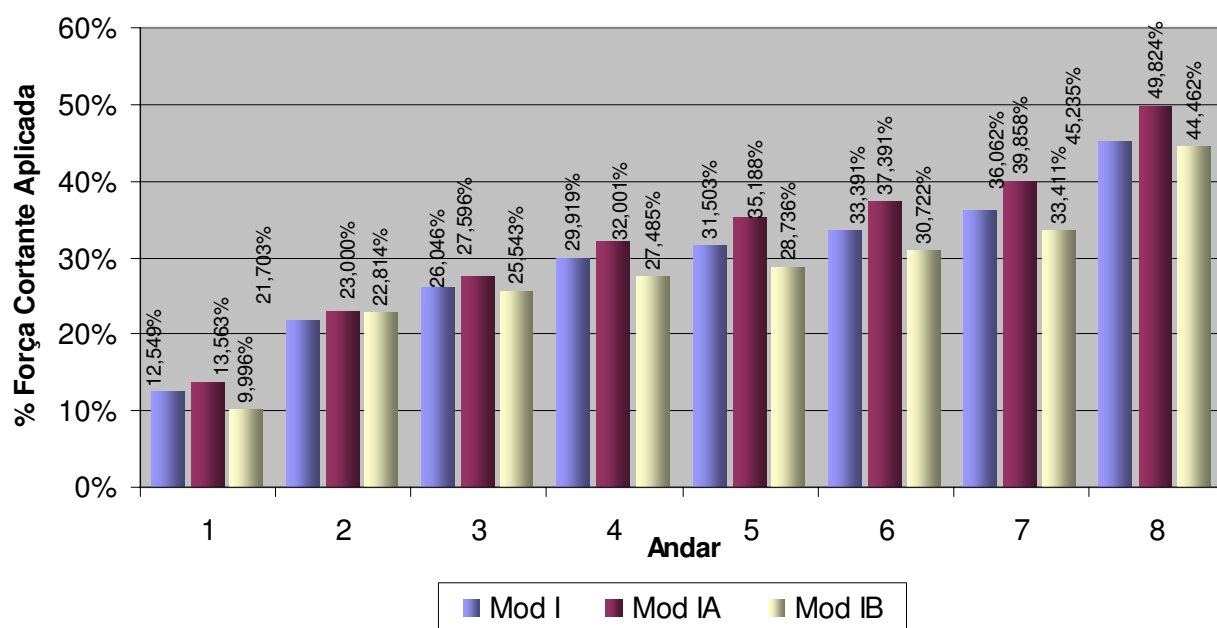


Gráfico 4-75 - Efeito do desnivelamento das aberturas - Membro B - Mod I, I-A e I-B - 8 Pav: Dir. +X

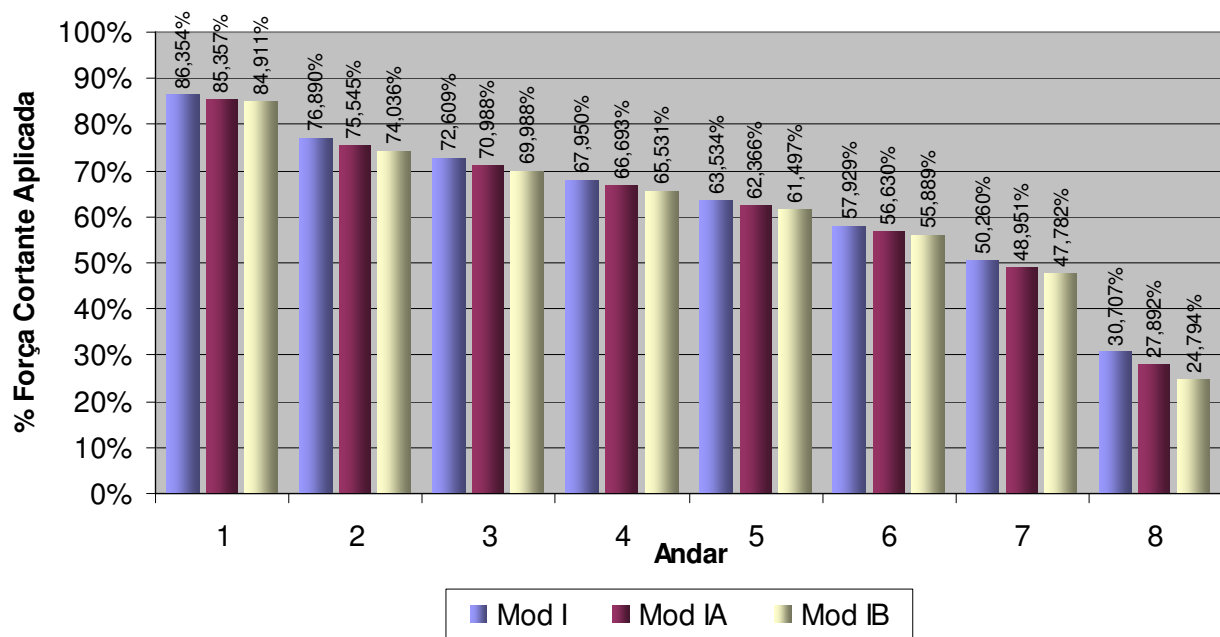


Gráfico 4-76 - Efeito do desnivelamento das aberturas - Membro C - Mod I, I-A e I-B - 8 Pav: Dir. +X

4.6.1.4 Efeito da área de aberturas

A área de aberturas também influenciou de maneira importante o comportamento dos modelos analisados. O Gráfico 4-77 exibe uma comparação entre as curvas força horizontal x distorção angular para Modelos V, VI e I, para o caso da parede térreo isolada, que têm a mesma dimensão global, mas apresentam taxa de abertura diferentes, 13,5%, 14,73% e 24,44%, respectivamente. Também se acha contemplada nesta figura a curva correspondente ao modelo sem aberturas.

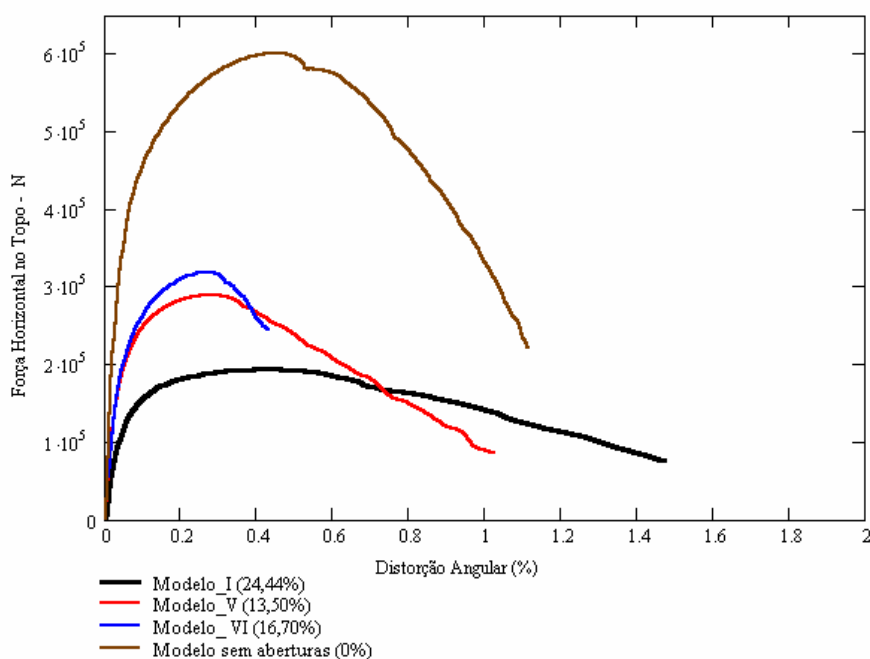


Gráfico 4-77 – Força horizontal – Distorção angular: Modelos I, V e VI - Parede Térrea: Caso II: F+X

O exame do Gráfico 4-77 permite observar que a rigidez e a capacidade de carga lateral de paredes com aberturas diminuem significativamente com o aumento do tamanho das aberturas. Introduzindo aberturas numa taxa de 13,5% ocasionou-se uma redução na rigidez e na capacidade de carga lateral do modelo sem aberturas de 23,68% e 51,87%, respectivamente. Aumentando-se a taxa de abertura para 24,44% resultou numa redução na rigidez e na resistência de 65,09% e 67,73%, respectivamente. Pode-se observar ainda que o efeito do aumento na taxa de aberturas foi mais expressivo na resistência da parede do que na sua rigidez. Também é importante observar no Gráfico 4-77 que o deslocamento último e a ductilidade aumentaram consideravelmente com o acréscimo da taxa de abertura. Convém ressaltar, complementarmente, que a introdução de grandes aberturas em paredes de contraventamento conduzirá a paredes circundadas por elementos verticais que apresentam elevada relação de forma e que têm a habilidade de rotacionar e deformar-se além do limite elástico.

O exame das curvas dos modelos estudados revelou que para paredes com dimensão global similar, notadamente a altura, o efeito das aberturas na redução da resistência e rigidez foi proporcional. Para ilustrar este interessante fenômeno, a força horizontal normalizada (força/força última) foi plotada contra o deslocamento da parede e os resultados se acham apresentados no Gráfico 4-78 e no Gráfico 4-79, onde se pode observar que, tanto em paredes sem abertura quanto em paredes com aberturas

(independente do tamanho, localização e nivelamento das mesmas), o deslocamento horizontal para uma força equivalente a 70% da força horizontal última foi aproximadamente o mesmo (1,8 mm), para ação da força horizontal segundo +X e -X.

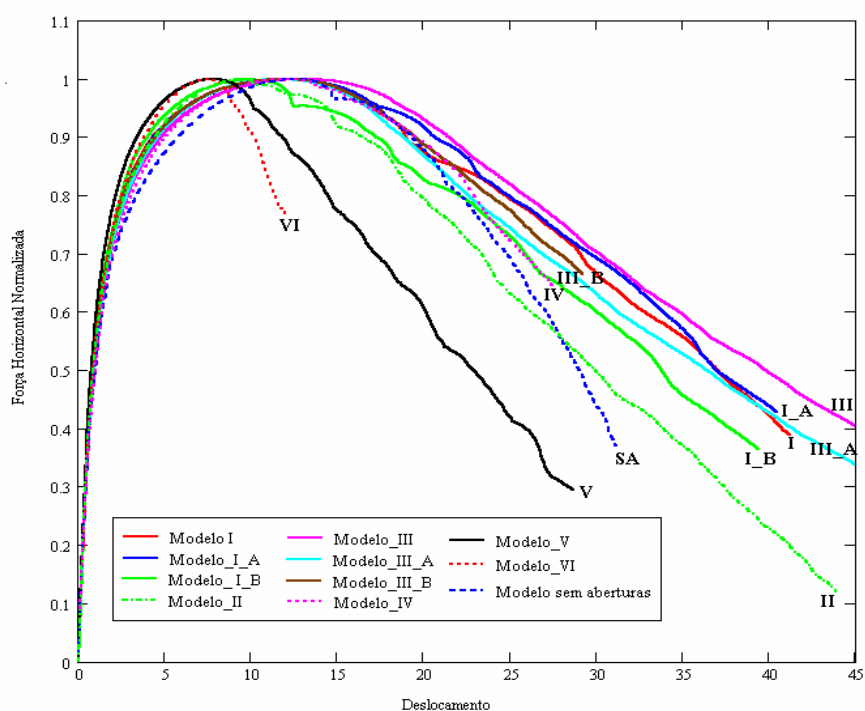


Gráfico 4-78 – Força horizontal normalizada x Deslocamento Horizontal - Parede Térrea: Caso II: F+X

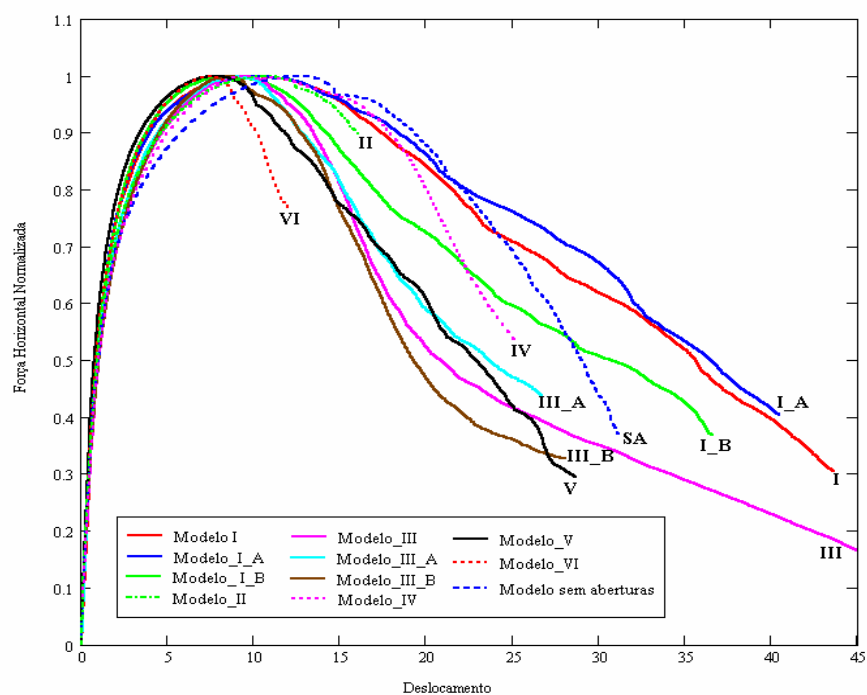


Gráfico 4-79 – Força horizontal normalizada x Deslocamento Horizontal - Parede Térrea: Caso II: F-X

No que respeita à distribuição da força cortante aplicada, o efeito da área de aberturas, para o caso da parede térreo isolada, acha-se exemplificado no Gráfico 4-80 a seguir, que mostra a parcela da força cortante que solicita cada membro da parede para os Modelos I, V e VI.

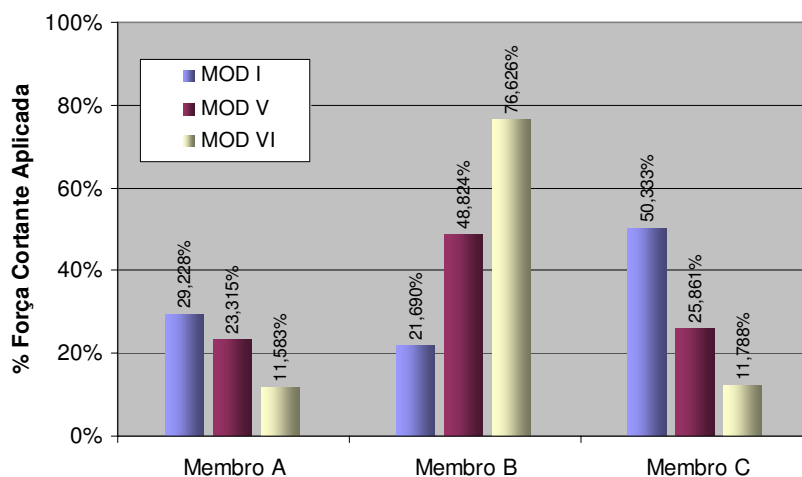


Gráfico 4-80 - Efeito da área de aberturas - Mod I, V e VI - Caso II - Parede Térrea: Dir. +X

4.7 Síntese dos modos de ruptura observados

A seguir é apresentada uma síntese dos modos de ruptura dos modelos analisados tanto para a parede isolada quanto para a parede da edificação de oito pavimentos.

Nos modelos de parede térrea, o mecanismo de ruptura pela formação das bielas segundo as diagonais comprimidas foi observado com muita nitidez na totalidade dos modelos analisados, conforme já se discutido ao longo do presente capítulo. A seguir, explicita-se este tipo de mecanismo através do exame da deformada incremental e do perfil de fissuração nos pontos de Gauss em um dos modelos estudados (Modelo I - F+X), mostrados na Figura 4:62 e Figura 4:63 a seguir.

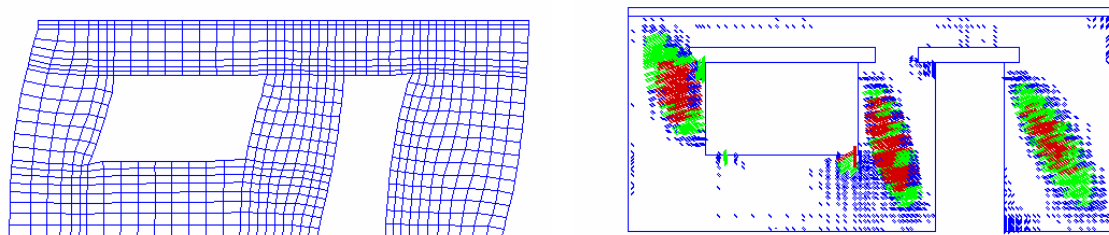


Figura 4:62 - Resultados da análise em $d = 2,0 \text{ mm}$: (a) malha deformada incremental; (b) fissuras

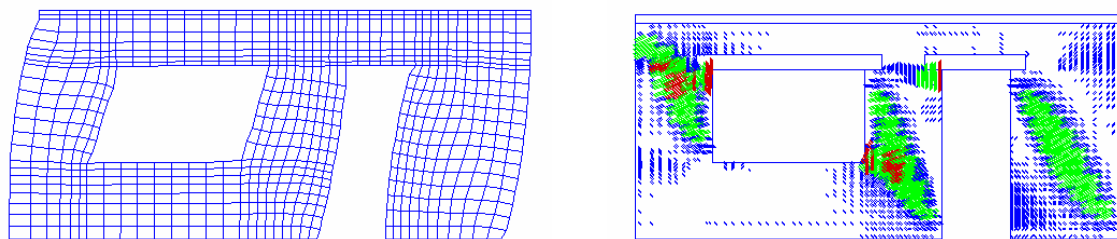


Figura 4:63 - Resultados da análise em $d = 11,70$ mm : (a) malha deformada incremental; (b) fissuras

Inicialmente, um extensivo processo de fissuração diagonal é observado na parede (parte direita da Figura 4:62), que se concentra mais fortemente na parte central das diagonais comprimidas. Com o contínuo aumento da magnitude da força horizontal aplicada, a fissuração tende a se concentrar no entorno das aberturas (parte direita da Figura 4:62).

O exame do perfil das tensões principais mínimas no momento do atingimento da capacidade de carga da parede (ruptura), apresentado na Figura 4:64, permite identificar valores de tensões superiores à resistência à compressão da parede, aspecto que sugere que a ruptura é governada pelo regime de compressão.

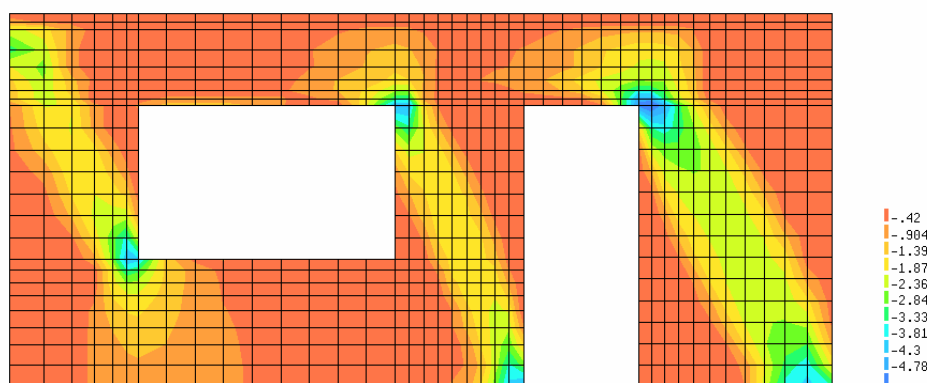


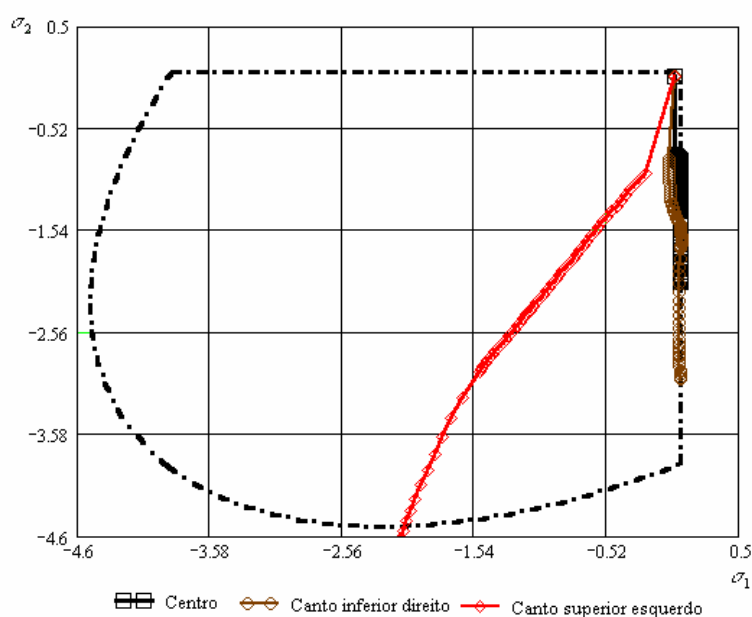
Figura 4:64 - Tensões principais mínimas na ruptura: Modelo I - F+X - Caso II (N/mm²)

Os elementos localizados nas extremidades opostas das diagonais comprimidas apresentaram os maiores valores das tensões principais mínimas e, dentre estes, o elemento situado no canto superior esquerdo do membro vertical contíguo à abertura da porta (membro mais solicitado) apresentou valor de tensão principal mínima de 4,91 MPa, indicando que o processo de ruptura por compressão (bi-axial) se iniciou neste trecho da parede.

O exame da história das tensões principais em três elementos situados na diagonal do membro C deste modelo, Figura 4:65 a seguir, corrobora a interpretação acima

formulada. Nesta figura se acham indicadas, juntamente com a função de falha considerada, as tensões principais nos elementos situados no canto superior esquerdo, no centro e no canto inferior direito daquela diagonal.

Nesta figura é possível observar que o elemento localizado no canto superior esquerdo acha-se submetido a um estado bi-axial de compressão ao passo em que os outros elementos (centro e canto inferior direito) estão submetidos a estado de compressão-tração. Percebe-se, ainda, que desde a fase inicial do comportamento, tanto o elemento do centro quanto o do canto inferior direito atingem a superfície de falha por tração (se inicia o processo de fissuração) e continuam nesta superfície ao longo do processo de incremento da carga que solicita a parede. Aqui não se caracteriza ainda a ruptura do modelo por tração, sendo a parede capaz de suportar o incremento do carregamento lateral aplicado. No momento de atingimento da capacidade de carga do modelo, as tensões de compressão mínima nestes dois elementos valem, respectivamente, 2,06 MPa e 3,03 MPa que são valores inferiores à resistência à compressão da parede. Já o elemento situado no canto superior esquerdo acha-se submetido, desde o início do comportamento, a um estado de compressão biaxial alcançando a superfície de ruptura em compressão no momento de atingimento da capacidade de carga da parede, com um valor de 4,88 MPa de tensão principal mínima, caracterizando uma ruptura por esmagamento da alvenaria neste trecho da parede.



**Figura 4:65 – História das tensões principais em três elementos na diagonal do membro C
Modelo I – F+X – Caso II (N/mm²)**

Esta interpretação do mecanismo de ruptura pode ser estendida aos modelos de parede da edificação de oito pavimentos. Com efeito, observando a Figura 4:66 percebe-se que a parede localizada no térreo da edificação encontra-se mais solicitada e, dentre os membros verticais que a integram, aquele situado à direita da abertura da porta apresentou os maiores valores da tensão principal mínima. Podem-se observar valores da tensão normal mínima superiores à resistência à compressão da alvenaria utilizada nas análises numéricas, aspecto que sugere que a ruptura foi governada pelo regime de compressão (bi-axial), a exemplo do que fora observado nos modelos de parede térrea. Novamente, o elemento mais solicitado se acha localizado no canto superior esquerdo do membro vertical situado do lado direito da abertura da porta sendo esta a localização onde se iniciou o processo de ruptura do modelo em exame. Esta interpretação do mecanismo de ruptura do Modelo I é típica de todos os modelos analisados.

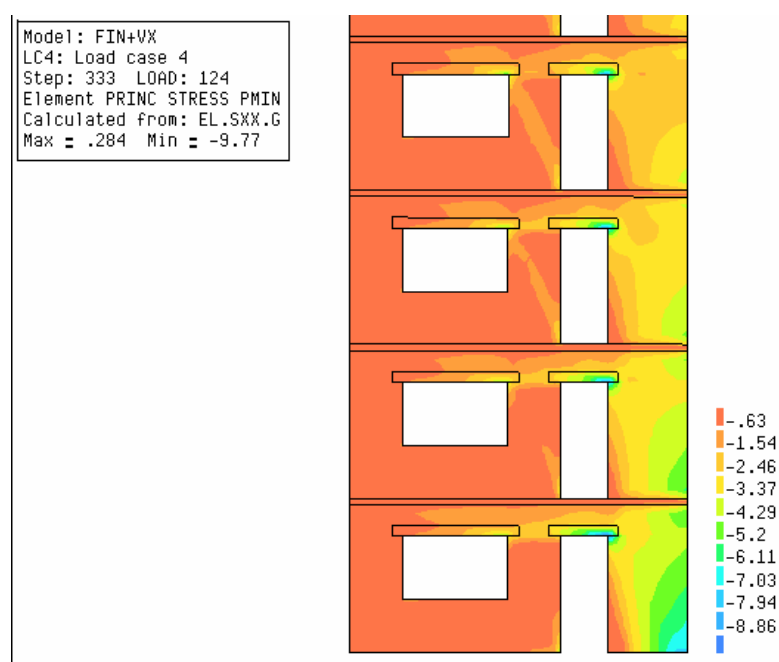


Figura 4:66 – – Tensões principais mínimas na ruptura: Modelo I - F+X -(N/mm²)

5. Conclusões e sugestões

5.1 Conclusões

A partir das análises numéricas realizadas podem ser formuladas as seguintes conclusões:

a) Comportamento Global

- A introdução de aberturas em paredes de contraventamento de alvenaria estrutural introduz importante alteração na sua capacidade resistência às ações laterais. Nos modelos estudados esta redução chegou a 66%, para o caso da parede térreo isolada, e a 23%, para o caso da parede da edificação de múltiplos andares;
- Os resultados obtidos apontaram que mais importante do que o desnivelamento das aberturas, a percentagem de área destas aberturas em relação à área total do modelo e a localização destas aberturas no interior do painel influenciaram de maneira mais nítida o comportamento global dos modelos estudados;
- O sentido de atuação da força horizontal (+X ou -X) altera de maneira importante o comportamento global das paredes de alvenaria com aberturas, influndo de maneira decisiva no acréscimo ou decréscimo de sua capacidade de carga lateral (dependendo da geometria da parede). Nos modelos estudados, observou-se diferença de até 46% na capacidade de carga lateral (Modelo III-B, Anexo B), para o caso da parede térreo isolada, e de 27%, para o caso da parede da edificação de múltiplos andares (Modelo I-B);
- Nos modelos relativos ao caso da parede térrea isolada foi observado que, tanto em paredes sem abertura quanto em paredes com aberturas (independente do tamanho, localização, nivelamento das mesmas e direção de atuação da força lateral), o deslocamento horizontal para uma força equivalente a 70% da força horizontal última foi aproximadamente o mesmo;
- Nos modelos correspondentes a paredes de contraventamento de uma edificação de múltiplos andares, o desnivelamento das aberturas teve pouca influência na capacidade de carga lateral dos modelos, tanto para ação da força lateral segundo +X quanto em -X. Nestes modelos, observou-se que mais importante do que a área de aberturas, a localização das mesmas no interior do painel (que altera a geometria

dos membros verticais) influenciou de modo mais decisivo sua capacidade de carga lateral;

b) Distribuição da Força Cortante

- Os procedimentos disponíveis na literatura para a distribuição da força cortante em paredes de contraventamento dotadas de aberturas apresentaram resultados divergentes daqueles obtidos com o Método dos Elementos Finitos, mesmo no caso de comportamento elástico linear e nos modelos que contam com membros verticais de idêntica geometria;
- A provável explicação para a divergência de resultados observada está associada à hipótese adotada de que estes membros se comportam como vigas. Os resultados obtidos através das análises numéricas realizadas mostram que o mecanismo de sustentação de cargas em paredes de contraventamento com aberturas é caracterizado pela formação de bielas comprimidas segundo as diagonais dos seus membros verticais, aspecto que torna discutível a hipótese considerada por aqueles procedimentos;
- A parcela da força cortante que solicita os membros verticais de paredes de contraventamento dotadas de abertura é fortemente influenciada pelo nível de compressão vertical a que este membro se acha submetido. Os procedimentos clássicos de distribuição da força cortante disponíveis na literatura não levam em consideração esta variável e sua utilização, nos modelos relativos ao caso da parede térrea isolada, conduziram a subestimação de até 49% na força cortante, quando comparado com os resultados obtidos pelo MEF;
- A influência do desnivelamento das aberturas na alteração da parcela da força cortante que solicita os membros das paredes de contraventamento analisadas foi mais significativa na fase de pico, nos modelos relativos ao caso da parede térrea isolada. Este comportamento também foi observado nos modelos correspondentes a paredes de contraventamento de uma edificação de múltiplos andares. A razão deste comportamento está associada à alteração no comprimento das bielas comprimidas que o desnivelamento entre as aberturas introduz.

5.2 Sugestões

Com base nos resultados obtidos propõem o que se segue para a continuidade da presente pesquisa:

- Realização de ensaios experimentais abrangentes que possibilitem a obtenção das propriedades físicas das alvenarias estruturais utilizadas no Brasil, com especial enfoque ao caso pernambucano, com a finalidade de tornar viável o uso de modelos numéricos mais refinados de modelagem já existentes (macro modelos ortotrópicos, por exemplo);
- Realização de modelagens numéricas 3D para se avaliar os efeitos da interação tridimensional no comportamento de paredes de contraventamento dotadas de aberturas;
- Estudo da possibilidade da utilização do modelo biela-tirante para se estimar a capacidade de carga lateral de paredes de contraventamento de alvenaria estrutural não armada dotadas ou não de aberturas. Este modelo já é largamente utilizado para representar as condições últimas de componentes de concreto armado, mas ainda não foi reservada muita atenção para sua extensão a paredes de alvenaria não armada, talvez porque os conceitos que envolvem sua aplicação no concreto armado não possam ser integralmente aplicados a um material de natureza frágil, tal como a alvenaria não armada. Uma dificuldade específica é a ausência de componentes que exibam comportamento plástico, a exemplo das barras de aço num elemento de concreto armado.

6. Referências bibliográficas

ALBIGES, M. ; GOULET, J., Contravement des Batiments – Annales I.T.B.T.P, nº 149, pp. 473-500, 1960.

ALMEIDA, S DE F., Métodos de Análise de Edifícios de Alvenaria Estrutural Submetidos a Cargas Laterais, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 1995.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Building Code Requirements and Specifications for Masonry Structures and Related Commentaries, ACI 530/530.1-05, 2005.

AMRHEIN, J. E., Reinforced Masonry Engineering Handbook, 4th Edition, Masonry Institute of America, Los Angeles, CA, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Cálculo de alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto, NBR 10837, 1989.

ATKINSON, R. H.; AMADEI, B. P.; SAEBS.; STURE S., Response of masonry bed joints in direct shear, Journal of Structural Engineering ASCE, vol. 115, no. 9, p. 2276-2279, 1989.

BENEDETTI, D.; TOMAZEVIC M., Sulla verifica sismica di costruzioni in muratura, Ingegneria Sismica, vol. I, no.0., 1984.

BENJAMIN, R.; WILLIAMS H.A., The behaviour of one-story brick shear wall, Journal of Structural Division ASCE, 84, 1723, 1-30, 1958.

CHEN, S. J.; HIDALGO, P. A.; MAYES, R. L.; CLOUGH, R. W. AND MCNIVEN, H.D., Cyclic Loading Tests of Masonry Single Piers, Volume 2 –Height to Width Ratio of 1, Report No. UCB/EERC-78/28, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 1978.

DE SOUZA NETO, E. A. , PERIC, D. , OWEN, D. R. J. , Computational plasticity: small and large strain finite elements analysis of elastic and inelastic solids, 2002.

DIANA, DIANA 7.2 – Reference Manual, *Diana*, Release 7.2, TNO Building and Construction Research, Delft, The Netherlands, 1999.

DRYSDALE, R. G.; VANDERKYLE, R.; HAMID, A., Shear Strength of Brick Masonry Joints, in Proceedings of the Fifth International Brick Masonry Conference, Washington, DC, 99. 106-113, 1979.

DRYSDALE, R. G.; HAMID A. A. ; BAKER L. R., Masonry structures: behaviour and design, Prentice Hall, New Jersey, 1994.

EUROCÓDIGO 6, Projeto de estruturas de alvenaria. Parte 1-1 : Regras para edifícios – Regras para alvenaria armada e simples, Versão Portuguesa ,1995.

ELSHAFIE, H. , Behaviour of Masonry Walls with Openings, Ph.D. Dissertation, Department of Structural Engineering, Ain Shams University, Cairo, Egypt, 1997.

FEENSTRA P. H. ; DE BORST R. , A plasticity model and algorithm for Mode-I cracking in concrete, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 38, pp. 2509-2529, 1995.

FEENSTRA P. H. ; DE BORST R. , A composite plasticity model for concrete, Int. J. Solids Structures, 33(5), p. 707-730, 1996.

GONCHOROVSKI G. , Modelagem de Paredes na Análise Tridimensional de Edifícios de Alvenaria Estrutural, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

GOTTFREDSEN, F. R. , Laterally Loaded Masonry, SBI Report 289, Danish Research Institute, 1997

HENDRY, A. W. , Structural Masonry, Second Edition, Macmilan Press Ltd., 1998.

HUGHES, T. J. R. , The Finite Element Method - linear static and dynamic finite element *analysis*. Prentice-Hall, 1987.

IMAI, H.; MIYAMOTO M. , Seismic Behavior of Reinforced Masonry Walls With Small Opening, Fourth Meeting of the U.S.-Japan Joint Technical Coordination Committee on Masonry Research, San Diego, October,1988.

IMAI, H.; MIYAMOTO M. , Seismic Behavior of Reinforced Masonry Walls With Small Opening, Fifth Meeting of the U.S.-Japan Joint Technical Coordination Committee on Masonry Research, San Diego, October,1989.

KLINGER, R. E.; ANTROBUS, N.; LEIVA, G.; MERRYMAN, K. M. , In-plane Seismic Resistance of Two-Story Concrete Masonry Coupled Shear Walls, U.S.-Japan Coordinated Program for Masonry Building Research, Report No. 7.1-1, Department of Civil Engineering, The University of Texas at Austin, May, 1990.

LANER, F. , Prove di resistenza al taglio della muratura in laterizio, Proc. of the 6th Int. Brick Masonry Conference, Rome, 335-351, 1982.

LIBERATORI D. , Progetto Catania , Indagne sulla risposta sismica di due edifici in muratura, Grupo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Rome, 2000.

LOURENÇO, P. B.; ROTS, J. G. , On the use of micro-models for the analysis of masonry shear, STRUMAS II, Proceedings 2nd International Computer Methods in Structural Masonry, Eds. G. N. Pande and J. Middleton, Swansea, UK, 1993.

LOURENÇO, P. B.; ROTS, J. G.; BLAUWENDRAAD J. ,Implementation of an interface cap model for the analysis of masonry structures, Proc. EURO-C Conf. on Computation Modeling of Concrete Structures, Innbruk, 1994.

LOURENÇO P. B. , Computational Strategies for Masonry Structures , Doctoral Thesis, TU Delft, Netherlands, 206 pages, 1996.

LUBLINER, J. , Plasticity Theory, Macmillan Publishing Company, New York, 1990.

LURATI, F. and THURLIMANN, B. (1990) - Tests in concrete masonry walls. Rep. No. 8401-3, Inst. Of Struct. Engrg., ETH Zurich, Zurich, Switzerland (in German).

LURATI, F. , GRAF, H. and THURLIMANN, B. (1990) - Experimental determination of the strength parameters of concrete masonry. Report No. 8401-2, Inst. Of Struct. Engrg., ETH Zurich, Zurich, Switzerland (in German).

MANN, W.; MULLER, H. , Failure of Shera-Stressed Masonry – An Enlarged Theory, Tests and Application to Shear Walls, Reports of Technical University, Darmstadt, 1976.

MAGENES G.; BOLOGNINI D.; BRAGGIO C. , Metodi semplificati per l'analyse sismica non lineare di edifici in muratura, CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti – Roma, 2000, 9 pp.

MAGENES, G. , DELLA FONTANA, A., Simplified Non-linear Seismic Analysis of Masonry Building, Proc. of the British masonry Society, Vol. 8, October, 1988, pp. 190-195.

MATSUNO, M.; YAMAZAKI, Y.; KAMINOSOMO, T.; TESHIGAWARA, M.; NISHI, T. , Experimental and Analytical Study of the Three Story Reinforced Clay Block Specimen, Third Meeting of the U.S.-Japan Joint Technical Coordination Committee on Masonry Research, Hokkaido, Japan, October, 1987.

MAYES, R. L., OMOTE, S. W. AND CLOUGH, R. W. , Cyclic Shear Tests on Masonry Piers, Volume I: Test Result, EERC Report No. 76-8, University of California, California, 1976.

MAYES, R. L.; OMOTE, S. W.; CLOUGH, R. W. , Cyclic Shear Tests on Masonry Piers, Volume II: Analysis of Test Result, EERC Report No. 76-16, University of California, California, 1976.

NAGTEGAAL, J. C.; PARKS, D. M.; RICE, J. R. On numerically accurate finite element solutions in the fully plastic range. *J. Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.* 4 (1974), 153-177.

NOLAND, J. L. , 1990 Status Report: U.S. Coordinated Program for Masonry Building Research, Proceedings of the Fifth North America Masonry Conference, Urbana Champaign, Illinois, pp 57-67, June, 1990.

PAGE A. W. , The biaxial compressive strength of brick masonry, Proceeding of the Institute of Civil Engineer, Paris, Vl. 71, Part 2, September, pp 893-906, 1981.

PAGE A. W. , The strength of brick masonry under biaxial compressive-tension, International Journal of Masonry Construction, Vol. 3, No. 1, pp 26-31, 1983.

PAULSON, T.; ABRAMS, D. , Measured Inelastic Response of Reinforced Maonry Building Structures to Earthquaques Motions, U.S.-Japan Coordinated Program for Masonry Building Research, Report No. 7.1-1, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, October, 1990.

PLUIJM R. VAN DER, Out-of-Plane Bending of Masonry, Behavior nad Strength, Ph. D. Thesis, TUDelft, The Netherlands, 1999.

PLUIJM R. VAN DER, Material properties of masonry and its components under tension and shear, in: Proc. 6th Canadian Masonry Symposium, eds. V.V. Neis, Saskatoon, Saskatchewan, Canada, p. 675-686, 1992.

PLUIJM R. VAN DER, Shear behaviour of bed joints, in: Proc. 6th North American Masonry Conf., eds A.A. Hamide and H. G. Harris, Drexel University, Philadelphia, Pennsylvania, USA, p 125-136, 1993.

QAMARUDDIN, M, AL-ORAIMI S., HAGO, A. W., Mathematical Model For Lateral Stiffness of Shear Walls With Openings, Seventh North American Masonry Conference, June 2-5, pp 605-11, 1996.

QAMARUDDIN, M, In-plane stiffness of shear walls with openings. Building and Enviromental, 34, 109-127, 1999.

RIDDINGTON, J. R.; GHAZALI, M. Z. , Shear strength of masonry walls, Proc. 8th Int. Brick/Block Masonry Conf. Dublin, 549-558, 1988.

ROTS, J. G., Computer simulation of masonry fracture: continuum and discontinuum models, Proceedings Second International Symposium on Computer Methods in Strcutural Masonry, Eds. G. N. Pande and J. Middleton, Swansea, UK, 1993.

SAFFARINI, H. S.; WILSON, E. , New Approaches in the Structural Analysis of Building Systemns. Califórnia , Berkeley: Departemnte of Civil Engineering University of Califórnia, Report n° UCB/SESM-83/08 258p., 1983.

SALIBA, J. E.; SEXTON, A. J. , Distribution of shear forces in walls having openings, The Masonry Society Journal (TMS), August, 1991.

SAMARASINGHE, W.; PAGE, A. W.; HENDRY, A. W. , Behaviour of brick masonry shear walls, The Structural Engineer, Volume 59 B, No. 3, pp 42-48, September, 1981.

SCRIVENER, J. C. , Summary of Findings of Cyclic Shear Tests on Masonry Piers, U.S.-Japan Coordinated Program for Masonry Building Research, Atkinson-Noland & Associates, Boulder, Colorado, June 1986.

SEIBLE, F.; OKADA, T.; YAMAZAKI, Y.; TESHIGAWARA, M. , The Japanese 5-Story Full Scale Reinforced Concrete Masonry Test-Design and Construction of the Test Building, The Masonry Society Journal, July-December 1987, pp. T1-T19.

SEIBLE, F.; OKADA, T.; YAMAZAKI, Y.; TESHIGAWARA, M. , The Japanese 5-Story Full Scale Reinforced Concrete Masonry Test-Loading and Instrumentation of the Test Building, The Masonry Society Journal, July-December 1987, pp. T20-T37.

SILVA, F. A. N.; FILHO, A. M. M., Avaliação da eficiência dos procedimentos para o cálculo da rigidez lateral de paredes de alvenaria com aberturas. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto, 2005, Recife-PE. 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Recife, Pernambuco: Ana E. P. G. A. Jacinto, Eliana Monteiro e Túlio N. Bittencourt, 2005, v. VIII. P. 116-131.

SILVA, F. A. N. ; OLIVEIRA, R. A. ; LOURENÇO, P. B. Distribuição das ações laterais entre os membros verticais de paredes de contraventamento de alvenaria estrutural não armadas dotadas de aberturas. Revista Symposium, Recife, v. 7, n. 2, p. 44-61, 2004.

SILVA, F. A. N. ; OLIVEIRA, R. A. ; LOURENÇO, P. B. Considerações sobre a distribuição de forças cortantes em paredes de contraventamento de alvenaria estrutural dotadas de aberturas. In XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingenieria Estructural, 2004, Mendoza. XXXI Jornadas Sud-Americanas de Ingenieria Estructural, Argentina, 2004.

SILVA, F. A. N. ; OLIVEIRA, R. A. ; LOURENÇO, P. B. Behavior of Unreinforced Masonry Walls With Openings. Revista Symposium, Recife, v. 9, n. 1, p. 82-92, 2005.

SILVA, F. A. N. ; OLIVEIRA, R. A. Numerical Analysis os Structural Masonry. In: 2nd International Conference on Mechanics of Structures, Materials and Systemns, 2001, Wollongong, 2nd International Conference on Mechanics of Structures, Materials and Systemns, 2001, p. 103-108.

SILVA, F. A. N. ; OLIVEIRA, R. A. ; LOURENÇO, P. B. Paredes de alvenaria estrutural não armada dotadas de aberturas e submetidas a carregamento lateral, 2003. <http://www.civil.uminho.pt/masonry/Publications>, 2003 (Relatório de Pesquisa)

SINHA, B. P., The influence of numbers of course and the effect of brick strength on brickwork, Technical notes no. 131. The British Ceramic Research Association, 1968

TURNSEK, V.; CACOVIC F., Some experimental results on the strength of brick masonry wall, Proc. of the 3th Int. Brick Masonry Conference, London, 149-156, 1971

TURNSEK, V. , SHEPPARD, P. , The shear and flexural resistance of masonry wall, Proc. Of the Intern. Research Conference on Earthquake Engineering, Skopje, 1980, pp. 517-573

YOKEL, F. Y.; FATTAL, S. G. , Failure hypothesis for masonry shear walls, J. of Struc. Division ASCE, 102, 515-532, 1976

YAMAZAKI, Y.; SEIBLE, F.; MIZUNO, H.; KAMINOSONO T.; TESHIGAWARA, M. , The Japanese 5-Story Full Scale Reinforced Concrete Masonry Test-Forced Vibration and Cyclic Load Test Results, The Masonry Society Journal, January-June 1988, pp. T1-T17

YAMAZAKI, Y.; KAMINOSONO T.; TESHIGAWARA, M.; SEIBLE, F., The Japanese 5-Story Full Scale Reinforced Concrete Masonry Test-Pseudo Dynamics and Ultimate Load Test Results, The Masonry Society Journal, July-December 1988, pp. T1-T18

ZUCCHINI, A. , LOURENÇO, P. B., A micromechanical model for the homogenisation of masonry, Int. J. Solids and Structures, 39(12), p. 3233-3255, 2002

7. Anexo A – Exemplos de arquivos do DIANA

A seguir são apresentados os procedimentos utilizados para geração dos arquivos de entrada de dados e definição dos parâmetros das análises numéricas realizadas com o DIANA – DIsplacement ANALysis. Os arquivos mostrados correspondem ao modelo da edificação de oito pavimentos.

A geometria, condições de contorno de contorno e carregamentos são geradas num programa independente chamado FEMGV, que também é utilizado para o pós-processamento dos resultados. A fase de análise é realizada no próprio DIANA.

As análises são conduzidas mediante recurso a dois arquivos: um com extensão .DAT, que contem as informações do modelo de elementos finitos e outro(s) com extensão .COM, contendo os parâmetros necessários às análises lineares e não lineares. Na parte do arquivo relativa à caracterização dos materiais são informadas as propriedades elásticas e o critério de plastificação utilizado, RANVMI (Rankine-von Mises), seguido dos parâmetros que caracterizam a superfície de plastificação deste modelo: resistência à tração, resistência à compressão, formato do amolecimento em tração (exponencial) e em compressão (parabólico) com as respectivas energias de fratura.

```
KEYWORDS: PRE:FEMGEN
FEMGEN MODEL   : NMODL
ANALYSIS TYPE  : Structural 2D
'COORDINATES' DI=2
1 1000.00000000 0.00000000000
2 1222.22200000 0.00000000000
3 1444.44400000 0.00000000000
4 1666.66700000 0.00000000000
5 1888.88900000 0.00000000000
6 2111.11100000 0.00000000000
7 2333.33300000 0.00000000000
8 2555.55600000 0.00000000000
9 2777.77800000 0.00000000000
10 3000.00000000 0.00000000000
.....
..... 6.619 linhas omitidas intencionalmente
.....
'ELEMENTS'
CONNECTIVITY
```

```

1 Q8MEM  1  2  12  11
2 Q8MEM  2  3  13  12
3 Q8MEM  3  4  14  13
4 Q8MEM  4  5  15  14
5 Q8MEM  5  6  16  15

```

.....

..... 6.139 linhas omitidas intencionalmente

.....

'MATERIALS'

: Concreto (Laje e vergas)

```

1 YOUNG  2.000000E+04
  POISON  1.500000E-01
  DENSIT  0.000025

```

: Plasticidade

```

  YIELD  RANVMI
  YLDVAL  8e3 6.5e3
  HARDEN  STRAIN
  HARNAM  EXPONE
  HARVAL  8.e6
  CMPNAM  PARABO
  CMPVAL  16.e6

```

: Alvenaria

```

2 YOUNG  6.500000E+03
  POISON  1.500000E-01
  DENSIT  0.000019
  YIELD  RANVMI
  YLDVAL  0.08 6.5
  HARDEN  STRAIN
  HARNAM  EXPONE
  HARVAL  8.33333
  CMPNAM  PARABO
  CMPVAL  16.66666

```

'GEOMETRY'

```

1 THICK  3.500000E+03
2 THICK  1.400000E+02

```

'SUPPORTS'

: NÓS DA BASE (Y=0)

/ 1-10 91-96 145-153 345-356 / TR 1 TR 2

: NO DE APLICAÇÃO DE DESLOCAMENTO PRESCRITO EM CADA ANDAR

/ 778 / TR 1

/ 1639 / TR 1

/ 2500 / TR 1

/ 3361 / TR 1

/ 4222 / TR 1

/ 5083 / TR 1

/ 5944 / TR 1

/ 6805 / TR 1

'LOADS'

CASE 1

:CASE1 = G (PESO PRÓPRIO DA LAJE DE CADA ANDAR)

ELEMEN

/ 728-768 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -2.78

/ 1496-1536 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -2.78

/ 2264-2304 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -2.78

/ 3032-3072 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -2.78

/ 3800-3840 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -2.78

/ 4568-4608 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -2.78

/ 5336-5376 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -2.78

/ 6104-6144 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -1.03

CASE 2

:CASE2 = Q (CARGA ACIDENTAL EM CADA LAJE DE PISO)

ELEMEN

/ 728-768 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -3.50

/ 1496-1536 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -3.50

/ 2264-2304 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -3.50

/ 3032-3072 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -3.50

/ 3800-3840 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -3.50

/ 4568-4608 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -3.50

/ 5336-5376 /

EDGE ETA2

DIRELM NORMAL

DIRECT 2

FORCE -3.50

```

/ 6104-6144 /
EDGE    ETA2
DIRELM  NORMAL
DIRECT  2
FORCE   -2.625

CASE 3
: CASE3 = PESO PROPRIO DA PAREDE E DAS LAJES
WEIGHT
2 -1

CASE 4
: CASE4 = DESLOCAMENTOS PRESCRITOS
DEFORM
/ 778 / TR 1 4.433062463E-02
/ 1639 / TR 1 1.303439006E-01
/ 2500 / TR 1 2.457302932E-01
/ 3361 / TR 1 3.822429989E-01
/ 4222 / TR 1 5.321187123E-01
/ 5083 / TR 1 6.882639851E-01
/ 5944 / TR 1 8.446244291E-01
/ 6805 / TR 1 9.969131558E-01
'DIRECTIONS'
1 1.000000E+00 0.000000E+00 0.000000E+00
2 0.000000E+00 1.000000E+00 0.000000E+00
3 0.000000E+00 0.000000E+00 1.000000E+00
'END'

```

Os arquivos de comando das análises não lineares foram divididos em dois grupos. O primeiro corresponde ao arquivo utilizado para a aplicação não linear dos carregamentos permanentes e variáveis. Neste arquivo já são estabelecidos todos os parâmetros necessários à realização das análises não lineares. Primeiro se informa ao DIANA que deve ser iniciado o módulo de análise não linear (*NONLIN) com as seguintes características: não linearidade física com uso da matriz tangente consistente de segunda ordem. Na sequência, se procede à aplicação dos carregamentos em dois passos de carga para cada um deles (SIZES 0.5(2)). É utilizado o processo de Newton-Raphson convencional (REGULA) com a técnica da busca linear (LINE SEARCH) com um máximo de 20 iterações para cada incremento de carga, sendo o critério de convergência, em termos de energia, ajustado para uma tolerância de 1×10^{-4} . É também gerado um arquivo em forma tabular (despl) para armazenamento das forças e deslocamento nos nós de interesse para posterior pós-processamento e geração de curvas $Fx\delta$.

Arquivo de Comando (típico): Aplicação de G, Q e Peso Próprio

*NONLIN

: inicia o mode de análise não linear

BEGIN TYPE

PHYSIC PLASTI SECOND

END TYPE

: plasticidade com uso da matriz tangente consistente de segunda ordem

BEGIN OUTPUT TABULA

FILE="despl"

TEXT="FORCAS"

LAYOUT LINPAG 20

BEGIN SELECT

NODES 778 1639 2500 3361 4222 5083 5944 6805

ELEMEN NONE

END SELECT

FORCE REACTI GLOBAL

END OUTPUT

BEGIN EXECUT

BEGIN LOAD

LOADNR=1

BEGIN STEPS

BEGIN EXPLIC

SIZES 0.5(2)

END EXPLIC

END STEPS

END LOAD

BEGIN ITERAT

METHOD NEWTON REGULA

MAXITE=20

LINESE

BEGIN CONVER

ENERGY NEWREF CONTIN TOLCON=1.d-4 TOLABT=1.d+4

FORCE OFF

DISPLA OFF

END CONVER

END ITERAT

END EXECUT

BEGIN EXECUT

BEGIN LOAD

LOADNR=2

BEGIN STEPS

BEGIN EXPLIC

```
SIZES 0.5(2)
END EXPLIC
END STEPS
END LOAD
BEGIN ITERAT
  METHOD NEWTON REGULA
  MAXITE=20
  LINESE
BEGIN CONVER
  ENERGY NEWREF CONTIN TOLCON=1.d-4 TOLABT=1.d+4
  FORCE OFF
  DISPLA OFF
END CONVER
END ITERAT
END EXECUT
BEGIN EXECUT
  BEGIN LOAD
    LOADNR=1
    BEGIN STEPS
      BEGIN EXPLIC
        SIZES 0.5(2)
      END EXPLIC
    END STEPS
  END LOAD
  BEGIN ITERAT
    METHOD NEWTON REGULA
    MAXITE=20
    LINESE
  BEGIN CONVER
    ENERGY NEWREF CONTIN TOLCON=1.d-4 TOLABT=1.d+4
    FORCE OFF
    DISPLA OFF
  END CONVER
  END ITERAT
END EXECUT

BEGIN EXECUT
  BEGIN LOAD
    LOADNR=3
    BEGIN STEPS
      BEGIN EXPLIC
        SIZES 0.5(2)
      END EXPLIC
```

```

      END STEPS
    END LOAD
  BEGIN ITERAT
    METHOD NEWTON REGULA
    MAXITE=20
    LINESE
  BEGIN CONVER
    ENERGY NEWREF CONTIN TOLCON=1.d-4 TOLABT=1.d+4
    FORCE OFF
    DISPLA OFF
  END CONVER
END ITERAT
END EXECUT

BEGIN OUTPUT
  FILOS
  FILE "Carga_G+Q"
  TEXT "Back_G+Q"
END OUTPUT
*END

```

O segundo arquivo corresponde àquele utilizado para a aplicação não linear do carregamento lateral, que é similar ao arquivo anteriormente descrito. As únicas diferenças que devem ser observadas dizem respeito à geração incremental de arquivo contendo informações acerca das tensões e deformações dos modelos com vistas ao pós-processamento pelo FEMGV (FILE "fin+vx"), a utilização de um solver para solução do sistema não linear de equações baseado no gradiente conjugado (SOLVE ITERAT METHOD CG) e a atualização a cada passo de carga do arquivo tabular contendo as informações das forças e deslocamento nos nós de interesse.

```

*FILOS
INITIA
*NONLIN
  BEGIN EXECUT
    BEGIN ITERAT
      BEGIN CONVER
        DISPLA OFF
        ENERGY CONTIN
        FORCE OFF
      END CONVER
    LINESE

```

```
MAXITE 60
END ITERAT
BEGIN LOAD
LOADNR 4
  STEPS EXPLIC SIZES 0.02(70) 0.01(150) 0.02(5) 0.01(60) 0.02(5) 0.01(144)
END LOAD
  SOLVE ITERAT METHOD CG
END EXECUT
MODEL OFF
BEGIN OUTPUT
  FILE "fin+vx"
  BEGIN SELECT
    BEGIN ELEMEN ALL
      NODES ALL
    END ELEMEN
  END SELECT
  TEXT "New block"
  DISPLA
  DISPLA INCREM
  FORCE
  STRAIN TOTAL GREEN GLOBAL SMOOTH
  STRAIN CRACK
  STRAIN ELASTI
  STRAIN ELASTI GREEN VONMIS
  STRAIN ELASTI GREEN PRINCI
  STRAIN PLASTI GREEN GLOBAL INTPNT
  STRESS TOTAL CAUCHY GLOBAL SMOOTH
  STRESS TOTAL CAUCHY GLOBAL INTPNT
  STRESS CRACK
  STRESS TOTAL CAUCHY PRINCI
END OUTPUT
  BEGIN OUTPUT
    TABULA
    APPEND
    FILE "despl"
    BEGIN LAYOUT
      DIGITS RESULT 10
      LINPAG 20
    END LAYOUT
    BEGIN SELECT
      NODES 778 1639 2500 3361 4222 5083 5944 6805
      ELEMEN NONE
    END SELECT
```

TEXT FORCAS
FORCE REACTI GLOBAL
END OUTPUT
TYPE OFF
*END

8. Anexo B – Resultados dos outros modelos

8.1 Modelo I : Caso II – Fase Elástica – F+X

A Tabela 8:1 apresenta os resultados da aplicação do procedimento clássico de apropriação da força cortante que atua em cada membro da parede de contraventamento, conforme expressões apresentadas no Capítulo 3.

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	1.000	1,200	108.333,33	37,041	20.603,69
B	1.200	1.000	1,200	108.333,33	37,041	20.603,69
C	2.200	1.500	1,467	75.802,14	25,918	14.416,62

Tabela 8:1 - Distribuição de força cortante – Modelo I – Caso II : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico

A Tabela 8:2 apresenta uma comparação da distribuição da força cortante considerando o cálculo pelo procedimento clássico e pelo método dos elementos finitos em regime elástico.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	20.603,69	15.956,39	29,125	28,686
B	20.603,69	18.246,79	12,917	32,804
C	14.416,62	21.678,28	-33,497	38,973

Tabela 8:2 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I – Caso II : Fase Elástica – F+X

Os valores apresentados na Tabela 8:2 permitem concluir que a utilização do procedimento clássico de apropriação da força cortante, quando comparado com os resultados obtidos pelo método dos elementos finitos em regime elástico, conduz a forças cortantes conservadoras para os membros A e B ao passo que o membro C apresenta uma força cortante subestimada, aspecto que concorre para o seu sub-dimensionamento. Ademais, um pequeno erro na rigidez dos elementos mais rígidos pode causar importante e inaceitável erro nos elementos menos rígidos, aspecto que se constitui numa insuperável desvantagem da utilização do procedimento clássico.

Quando se considera a ação simultânea do carregamento compressivo vertical e da força horizontal, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 8:3.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	20.603,69	17.848,93	15,434	32,089
B	20.603,69	11.802,15	74,576	21,218
C	14.416,62	26.170,43	-44,913	47,049

Tabela 8:3 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I – Caso II: Fase Elástica – F+X₊+G+Q

Comparando os resultados apresentados na Tabela 8:3 com aqueles da Tabela 8:2 é possível observar que a atuação simultânea do carregamento vertical e horizontal introduz importante alteração no perfil de distribuição da força horizontal, muito embora permaneça ainda uma superestimação das forças cortantes nos membros A e B e subestimação no membro C, a exemplo do que foi observado quando atua a força horizontal isoladamente. Complementarmente é possível observar que a atuação concomitante dos dois carregamentos gera aumentos expressivos na superestimação e subestimação das forças cortantes nos três membros da parede.

8.1.1 Modelo I : Caso II – Fase de Pico – F+X

A Figura 8:1 a seguir apresenta o perfil de distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico, correspondente a uma força horizontal máxima de 193,85 kN o que perfaz um fator de carga de 3,5. Nela é possível se observar claramente o mecanismo de sustentação da força horizontal aplicada através dos três membros verticais da parede assim como a expressiva concentração das tensões de cisalhamento no membro C. Esta concentração de tensões concorrerá para uma maior magnitude da força cortante que solicita o membro C, conforme se constata na Tabela 8:4 a seguir, onde se observa que aproximadamente 50% da força máxima aplicada é suportada por este membro, ficando o restante da força distribuída entre os membros A (29%) e B (21%).

Figura 8:1 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo I – Caso II - F+X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	56.658,96	29,228
B	42.064,63	21,699
C	97.571,90	50,333

Tabela 8:4 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso II - Fase de Pico - F+X

8.1.2 Modelo I : Caso II - Fase $F_{max}/2$ - F+X

A Figura 8:2 e a Tabela 8:5 a seguir apresentam, respectivamente, a distribuição das tensões de cisalhamento para uma força equivalente à metade da força horizontal máxima e a distribuição desta força para os três membros da parede de contraventamento.

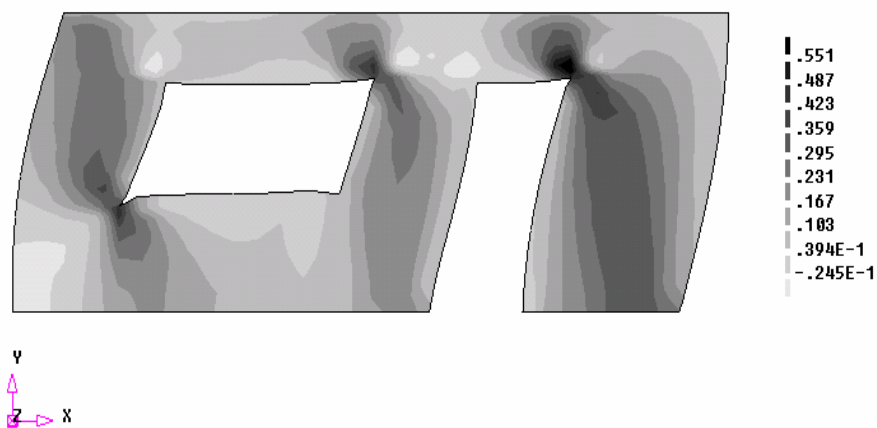


Figura 8:2 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo I - Caso II - F+X - N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	29.064,68	29,292
B	23.346,97	23,530
C	47.208,10	47,577

Tabela 8:5 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso II : Fase de $F_{max}/2$ - F+X

As mesmas considerações apresentadas anteriormente para a fase de pico são aplicáveis à fase de aplicação de metade da força horizontal máxima.

8.1.3 Modelo I : Caso II - Fase Pós Pico - F+X

O perfil das tensões de cisalhamento e a distribuição da força horizontal na fase pós pico acham-se representadas na Figura 8:3 e Tabela 8:6, onde se pode observar um comportamento semelhante àquele observado na fase de pico, sendo aplicáveis, portanto, todas as considerações lá formuladas.



Figura 8:3 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo I - Caso II - F+X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	55.395,34	30,015
B	42.853,31	23,220
C	89.814,57	48,665

Tabela 8:6 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso II : Fase Pós Pico - F+X

8.2 Modelo I : Caso II - Fase Elástica - F-X

A seguir apresentam-se resultados da análise do mesmo modelo e mesmo caso de carga mas com o vento atuando segundo -X.

A Tabela 8:1 apresentada anteriormente permanece válida, uma vez que o procedimento clássico de apropriação da força cortante nos membros da parede de contraventamento não se altera com relação à direção de atuação da força horizontal. Sendo assim a mesma proporção da força cortante em cada membro vertical do modelo contemplada nesta tabela para o procedimento clássico é válida para o vento atuando na direção -X.

A Tabela 8:7 a seguir apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelo procedimento clássico e aqueles decorrentes da análise de elementos finitos em regime elástico.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	20.603,69	15.493,28	32,985	27,854
B	20.603,69	18.248,42	12,907	32,807
C	14.416,62	22.136,04	-34,873	39,796

Tabela 8:7 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I - Caso II : Fase Elástica - F-X

Os resultados apresentados na Tabela 8:7, quando comparados com aqueles da Tabela 8:2, mostram que a mudança na direção de atuação da força horizontal, no regime elástico e para ação isolada da força horizontal, introduziu pequena perturbação no perfil de distribuição da mesma para os membros da parede, permanecendo uma superestimação da força cortante nos membros A e B e subestimação no membro C, a exemplo do que ocorre para a força horizontal atuando segundo +X.

Quando se considera a ação simultânea do carregamento compressivo vertical e da força horizontal, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 8:8.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	20.603,69	13.600,75	51,489	24,451
B	20.603,69	24.693,06	-16,561	44,393
C	14.416,62	17.643,89	-18,291	31,720

Tabela 8:8 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I - Caso II: Fase Elástica - F-X₊G+Q

Comparando os resultados apresentados na Tabela 8:7 com aqueles da Tabela 8:8 é possível observar que a atuação simultânea do carregamento vertical e horizontal (direção -X) introduz importante alteração no perfil de distribuição da força horizontal podendo ser observada agora uma subestimação das forças cortantes que atuam nos membros B e C, comportamento diverso daquele que foi observado para a ação simultânea dos dois carregamentos com a força horizontal agindo segundo a direção +X (Tabela 8:3).

8.2.1 Modelo I : Caso II - Fase de Pico - F-X

A Figura 8:4 a seguir apresenta o perfil de distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico, correspondente a uma força horizontal máxima de 201,26 kN o que perfaz um fator de carga de 3,6. Nela é possível se observar a expressiva concentração das tensões de cisalhamento no membro B. Esta concentração de tensões concorrerá para uma maior magnitude da força cortante que solicita o membro B, conforme se constata na Tabela 8:9 a seguir, onde se observa que aproximadamente 45% da força máxima aplicada é suportada por este membro, ficando o restante da força distribuída entre os membros A (21%) e C (34%).

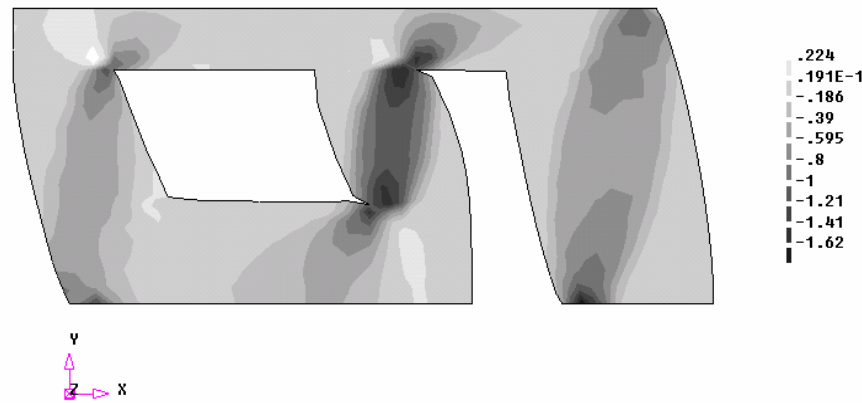


Figura 8:4 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo I - Caso II - F-X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	42.878,74	21,305
B	90.421,50	44,927
C	69.107,88	34,337

Tabela 8:9 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso II - Fase de Pico - F-X

8.2.2 Modelo I : Caso II - Fase de Fmax/2 - F-X

A Figura 8:5 e a Tabela 8:10 a seguir apresentam, respectivamente, a distribuição das tensões de cisalhamento para uma força equivalente à metade da força horizontal máxima e a distribuição desta força para os três membros da parede de contraventamento.

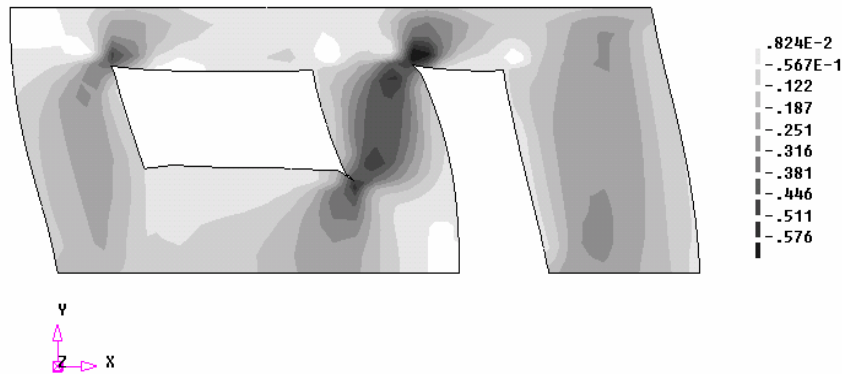


Figura 8:5 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 - Modelo I - Caso II - F-X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	23.018,96	22,891
B	41.763,86	41,532
C	36.313,99	36,112

Tabela 8:10 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso II : Fase de Fmax/2 - F-X

8.2.3 Modelo I : Caso II – Fase Pós Pico – F-X

O perfil das tensões de cisalhamento e a distribuição da força horizontal na fase pós pico acham-se representadas na Figura 8:6 e Tabela 8:11, onde se pode observar um comportamento semelhante àquele observado na fase de piso, sendo pertinentes, portanto, todas as considerações lá formuladas.

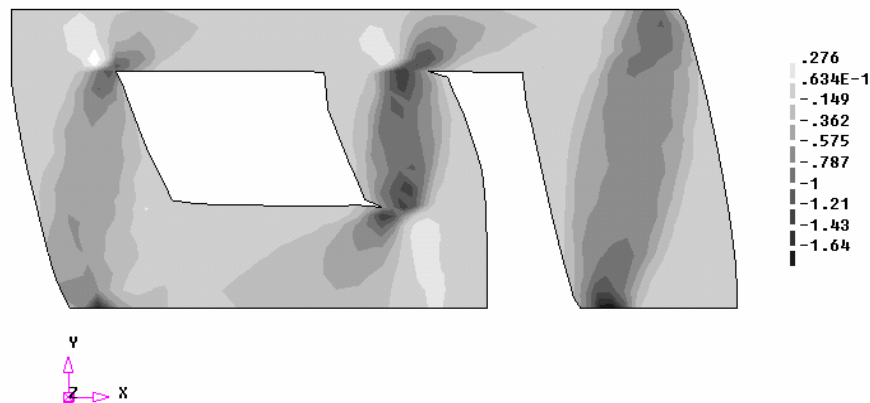


Figura 8:6 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo I – Caso II – F-X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	44.379,77	23,832
B	70.557,49	37,889
C	73.295,65	39,359

Tabela 8:11 - Distribuição da força horizontal – Modelo I – Caso II : Fase Pós Pico – F-X

A observação destes gráficos mostra que o procedimento clássico de distribuição da força horizontal aplicada sempre superestimou a magnitude da força cortante nos membros A e B e a subestimou no membro C, para a parede de contraventamento analisada e em todos os estágios de carga considerados, a exemplo do que foi observado para ação da força horizontal segundo +X. Comportamento com tendência similar foi observada no método proposto por Qamaruddin et al.

8.3 Modelo I-A : Caso II – Fase Elástica – F+X

A Tabela 8:12 a seguir apresenta a distribuição da força horizontal aplicada para os membros da parede de contraventamento calculada pelo procedimento clássico. Os valores aí constantes são idênticos aos da Tabela 8:1, haja vista que o desnível existente entre a abertura da janela e da porta não introduz alteração nas alturas dos três membros

verticais da parede, já que a prática da utilização do procedimento clássico consiste em adotar a menor altura como altura efetiva do membro vertical.

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	1.000	1,200	108.333,33	37,041	20.603,69
B	1.200	1.000	1,200	108.333,33	37,041	20.603,69
C	2.200	1.500	1,467	75.802,14	25,918	14.416,62

Tabela 8:12 - Distribuição de força cortante - Modelo I-A - Caso II : Fase Elástica - F+X - Proc. Clássico

A Tabela 8:13 apresenta uma comparação da distribuição da força cortante considerando o cálculo pelo procedimento clássico e pelo método dos elementos finitos em regime elástico.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	20.603,69	16.154,60	27,541	29,042
B	20.603,69	17.582,21	17,185	31,609
C	14.416,62	22.161,81	-34,948	39,842

Tabela 8:13 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I-A - Caso II : Fase Elástica - F+X

Os valores apresentados na Tabela 8:13 mostram que o desnivelamento de 20 cm para baixo da abertura da janela em relação à abertura da porta causou alteração na parcela da força cortante que solicita cada membro da parede, quando comparado com o modelo com aberturas niveladas (Modelo I), devendo-se destacar que houve discreto incremento na subestimação do membro C (Tabela 8:2 e Tabela 8:13).

Quando se considera a ação simultânea do carregamento compressivo vertical e da força horizontal, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 8:14, que configuram uma alteração de comportamento quando comparada com a resposta obtida para ação isolada da força horizontal (Tabela 8:13), a exemplo do que fora observado para o modelo I (Tabela 8:2 e Tabela 8:3), devendo também ser ressaltado o importante acréscimo na subestimação do membro C.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	20.603,69	15.375,59	34,003	27,642
B	20.603,69	14.204,89	45,047	25,537
C	14.416,62	26.217,47	-45,011	47,133

Tabela 8:14 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I-A - Caso II: Fase Elástica - F+X+G+Q

Comparando os resultados da Tabela 8:14 com os Tabela 8:3 nota-se que o desnivelamento entre as aberturas não interferiu na magnitude da subestimação do membro C (passou de 44,9% no modelo I para 45% no modelo I-A) mas alterou significativamente as superestimações dos demais membros (mais do que duplicada no membro A e reduzida em ~40% no membro B), que são os membros contíguos às aberturas e que sofrem interferência do desnivelamento entre as mesmas.

8.3.1 Modelo I-A : Caso II – Fase de Pico – F+X

A Figura 8:7 a seguir apresenta o perfil de distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico, correspondente a uma força horizontal máxima de 193,80 kN o que perfaz um fator de carga de 3,48. Nela é possível se observar claramente o mecanismo de sustentação da força horizontal aplicada através dos três membros verticais da parede assim como a expressiva concentração das tensões de cisalhamento no membro C. Esta concentração de tensões concorrerá para uma maior magnitude da força cortante que solicita o membro C, conforme se constata na Tabela 8:15 a seguir, onde se observa que aproximadamente 50% da força máxima aplicada é suportada por este membro, ficando o restante da força distribuída de maneira equivalente entre os demais membros.



Figura 8:7 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo I-A - Caso II - F+X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	49.995,32	25,798
B	49.104,03	25,338
C	97.740,87	50,435

Tabela 8:15 - Distribuição da força horizontal - Modelo I-A - Caso II - Fase de Pico - F+X

Quando se comparam as distribuições da força horizontal na fase pico para os Modelo I e I-A (Tabela 8:4 e Tabela 8:15) observa-se que o desnivelamento entre as aberturas não alterou a magnitude da força cortante no membro mais solicitado (membro C) mas reduziu a parcela do membro A e aumentou a parcela do membro B, que são exatamente os membros que sofrem influência do desnivelamento entre as aberturas.

8.3.2 Modelo I-A : Caso II – Fase $F_{max}/2 - F+X$

A Figura 8:8 e a Tabela 8:16 a seguir apresentam, respectivamente, a distribuição das tensões de cisalhamento para uma força equivalente à metade da força horizontal máxima e a distribuição desta força para os três membros da parede de contraventamento.



Figura 8:8 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo I-A - Caso II - $F+X$ - N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	25.297,48	26,101
B	25.533,55	26,345
C	46.479,95	47,957

Tabela 8:16 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A - Caso II : Fase de $F_{max}/2 - F+X$

Quando se comparam as distribuições da força horizontal na fase correspondente à metade da força máxima para os Modelo I e I-A (Tabela 8:5 e Tabela 8:16) para ação da força horizontal segundo $+X$ observa-se comportamento com mesma tendência daquele verificado na fase de pico, já referido anteriormente.

8.3.3 Modelo I-A : Caso II – Fase Pós Pico – F+

O perfil das tensões de cisalhamento e a distribuição da força horizontal na fase pós pico acham-se representadas na Figura 8:9 e Tabela 8:17.



Figura 8:9 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo I-A – Caso II – F+X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	50.807,18	27,117
B	49.375,22	26,353
C	90.862,60	48,496

Tabela 8:17 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A – Caso II : Fase Pós Pico – F+X

Quando se comparam as distribuições da força horizontal na fase pós-pico para os Modelo I e I-A (Tabela 8:6 e Tabela 8:17) observa-se comportamento com mesma tendência daquele verificado na fase de pico, já referido anteriormente.

8.4 Modelo I-A : Caso II – Fase Elástica – F-X

A seguir apresentam-se resultados da análise do mesmo modelo e mesmo caso de carga mas com força horizontal atuando segundo -X.

A Tabela 8:1 apresentada anteriormente permanece válida, uma vez que o procedimento clássico de apropriação da força cortante nos membros da parede de contraventamento não se altera com relação à direção de atuação da força horizontal. Sendo assim a mesma proporção contemplada nesta tabela para o procedimento clássico é válida para o vento atuando na direção -X.

A Tabela 8:18 a seguir apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelo procedimento clássico e aqueles decorrentes da análise de elementos finitos em regime elástico.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	20.603,69	15.790,70	30,480	28,388
B	20.603,69	17.472,06	17,924	31,411
C	14.416,62	22.631,52	-36,300	40,686

Tabela 8:18 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I-A - Caso II : Fase Elástica - F-X

Os resultados apresentados na Tabela 8:18, quando comparados com aqueles da Tabela 8:13, mostram que a mudança na direção de atuação da força horizontal, no regime elástico e para ação isolada da força horizontal, introduziu pequena perturbação no perfil de distribuição da mesma para os membros da parede, permanecendo uma superestimação da força cortante nos membros A e B e subestimação no membro C, a exemplo do que ocorre para a força horizontal atuando segundo +X.

Se se comparam os valores da Tabela 8:7 e da Tabela 8:18, observa-se que, a exemplo do que já ocorrera para ação da força horizontal segundo +X (Tabela 8:2 e Tabela 8:13), o desnivelamento de 20 cm para baixo da abertura da janela em relação à abertura da porta causou alteração na parcela da força cortante que solicita cada membro da parede, devendo-se destacar que houve incremento na subestimação do membro C.

Quando se considera a ação simultânea do carregamento compressivo vertical e da força horizontal, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 8:19.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	20.603,69	16.569,70	24,346	29,789
B	20.603,69	20.849,38	-1,178	37,483
C	14.416,62	18.575,85	-22,391	33,395

Tabela 8:19 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I-A - Caso II: Fase Elástica - F-X₋G+Q

Comparando os resultados apresentados na Tabela 8:18 com aqueles da Tabela 8:19 é possível observar que a atuação simultânea do carregamento vertical e horizontal (segundo -X) introduz importante alteração no perfil de distribuição da força horizontal podendo ser observada agora uma subestimação das forças cortantes que atuam nos membros B e C, comportamento diverso daquele que foi observado para a ação simultânea dos dois carregamentos com a força horizontal agindo segundo a direção +X

(Tabela 8:13 e Tabela 8:14), a exemplo do que já ocorrera para o Modelo I (vê Tabela 8:2 e Tabela 8:3; Tabela 8:7 e Tabela 8:8).

8.4.1 Modelo I-A : Caso II – Fase de Pico – F-X

A Figura 8:10 a seguir apresenta o perfil de distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico, correspondente a uma força horizontal máxima de 191,50 kN o que perfaz um fator de carga de 3,44. Nela é possível se observar claramente o mecanismo de sustentação da força horizontal aplicada através dos três membros verticais da parede assim como a expressiva concentração das tensões de cisalhamento nos membros B e C. Esta concentração de tensões concorrerá para uma maior magnitude da força cortante que solicita estes membros, conforme se constata na Tabela 8:20 a seguir, onde se observa que aproximadamente 75% da força máxima aplicada é suportada pelos membros B e C.

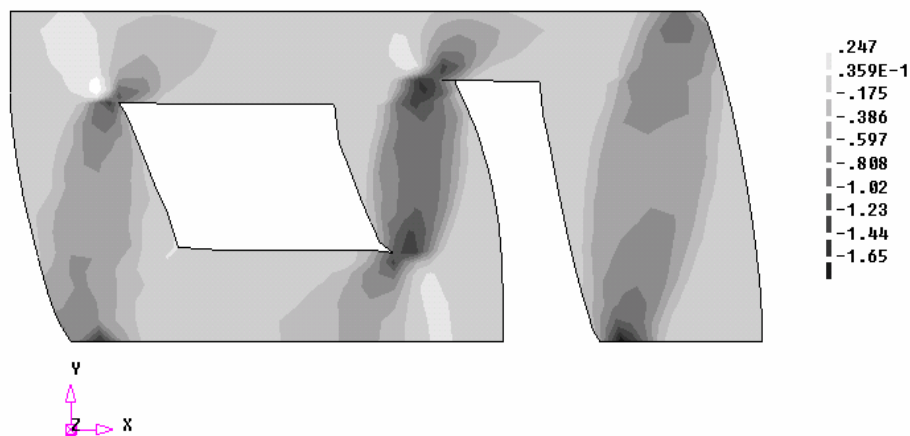


Figura 8:10 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo I-A – Caso II – F-X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	49.996,65	26,102
B	72.652,25	37,930
C	70.336,42	36,721

Tabela 8:20 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A – Caso II - Fase de Pico – F-X

Quando se comparam as distribuições da força horizontal na fase pico para os Modelo I e I-A, para ação da força horizontal segundo -X, (Tabela 8:9 e Tabela 8:20) observa-se que o desnivelamento entre as aberturas aumentou a magnitude das forças cortantes nos membros A e C, com variação mais expressiva no membro A, e reduziu de maneira importante a parcela da força cortante que solicita o membro B. Este

comportamento é diverso daquele que foi observado para os mesmos modelos na fase de pico para ação da força horizontal segundo +X (Tabela 8:4 e Tabela 8:15), aspecto que realça a influência do sentido de aplicação da força horizontal na resposta das paredes analisadas.

8.4.2 Modelo I-A : Caso II – Fase de $F_{max}/2$ – F-X

A Figura 8:11 e a Tabela 8:21 a seguir apresentam, respectivamente, a distribuição das tensões de cisalhamento para uma força equivalente à metade da força horizontal máxima e a distribuição desta força para os três membros da parede de contraventamento.

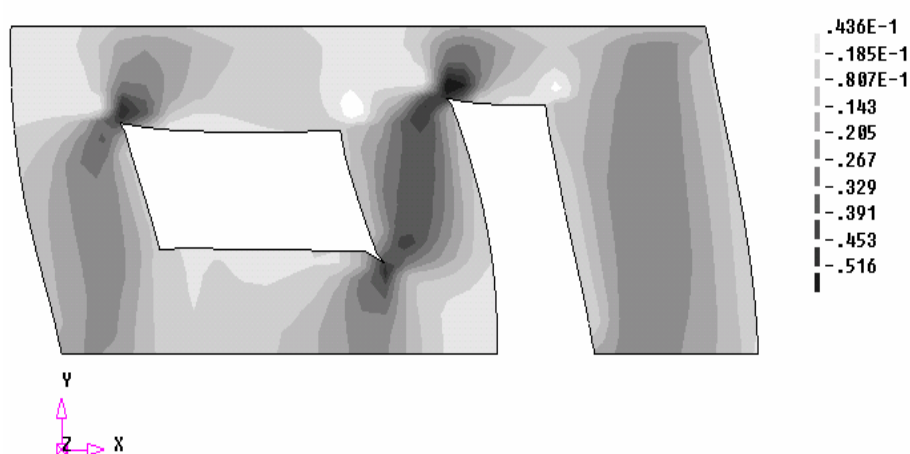


Figura 8:11 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo I-A – Caso II – F-X – N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	25.510,25	26,640
B	34.914,67	36,461
C	35.918,80	37,510

Tabela 8:21 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A – Caso II : Fase de $F_{max}/2$ – F-X

Quando se comparam as distribuições da força horizontal na fase correspondente à metade da força máxima para os Modelo I e I-A com força horizontal segundo -X (Tabela 8:10 e Tabela 8:21) observa-se comportamento com mesma tendência daquele verificado na fase de pico, já referido anteriormente, inclusive no que respeita à divergência do comportamento dos mesmos modelos no mesmo estágio de carga mas com força horizontal segundo +X (Tabela 8:5 e Tabela 8:16).

8.4.3 Modelo I-A : Caso II – Fase Pós Pico – F-X

O perfil das tensões de cisalhamento e a distribuição da força horizontal na fase pós pico acham-se representadas na Figura 8:12 e Tabela 8:22, onde se pode observar um comportamento semelhante àquele observado na fase de pico, quando se comparam as distribuições da força horizontal na fase de pós pico para os Modelos I e I-A (Tabela 8:11 e Tabela 8:22). Também foi observada a mesma divergência de comportamento verificada para estes mesmos modelos e neste mesmo estágio de carga (pós pico) quando da atuação da força horizontal segundo +X (Tabela 8:6 e Tabela 8:17)



Figura 8:12 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo I-A – Caso II – F-X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	50.741,94	28,389
B	56.126,32	31,401
C	74.015,39	41,409

Tabela 8:22 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A – Caso II : Fase Pós Pico – F-X

8.5 Modelo I-B : Caso II – Fase Elástica – F+X

A Tabela 8:23 a seguir apresenta a distribuição da força horizontal aplicada para os membros da parede de contraventamento, calculada pelo procedimento clássico.

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	1.000	1,200	108.333,33	32,893	18.296,40
B	1.000	1.000	1,000	145.212,77	44,091	24.525,18
C	2.200	1.500	1,467	75.802,14	23,016	12.802,42

Tabela 8:23 - Distribuição de força cortante – Modelo I-B – Caso II : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico

A Tabela 8:24 apresenta uma comparação da distribuição da força cortante considerando o cálculo pelo procedimento clássico e pelo método dos elementos finitos em regime elástico.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	18.296,40	15.907,59	15,017	28,598
B	24.525,18	19.273,92	27,245	34,650
C	12.802,42	20.666,77	-38,053	37,154

Tabela 8:24 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-B – Caso II : Fase Elástica – F+X

Os valores apresentados na Tabela 8:24 mostram que o desnivelamento de 20 cm para cima da abertura da janela em relação à abertura da porta causou alteração na parcela da força cortante que solicita cada membro da parede, quando comparado com o modelo com aberturas niveladas (Modelo I), devendo-se destacar o incremento na subestimação do membro C (Tabela 8:2 e Tabela 8:24). Comparando as alterações verificadas em relação ao Modelo I, o Modelo I-B causou mais impacto na alteração das forças cortantes nos membros, notadamente o A e B, do que o Modelo I-A (vê Tabela 8:2 e Tabela 8:13).

Quando se considera a ação simultânea do carregamento compressivo vertical e da força horizontal, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 8:25, que configuram uma alteração de comportamento quando comparada com a resposta obtida para ação isolada da força horizontal (Tabela 8:24), a exemplo do que fora observado para o modelo I, devendo também ser ressaltado o importante acréscimo na subestimação do membro C.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	18.296,40	20.502,51	-10,760	36,859
B	24.525,18	9.781,09	150,741	17,584
C	12.802,42	25.538,50	-49,870	45,913

Tabela 8:25 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-B – Caso II: Fase Elástica – F+X_+G+Q

Comparando os resultados da Tabela 8:25 com os Tabela 8:3 nota-se que no Modelo I-B a resposta da parede analisada é bem diferente daquela observada no Modelo I-A (vê Tabela 8:3 e Tabela 8:14), quando se comparam ambos tendo como paradigma o Modelo I. Com efeito, os membros A (que não era subestimado no Modelo I-A) e C

passam a ser subestimados no Modelo I-B e a magnitude da subestimação do membro C sofre incremento (passou de 44,9% no Modelo I para 49,8% no Modelo I-B). Notável no Modelo I-B é a superestimação da força cortante no membro B que é maior do que o dobro daquela observada no Modelo I. Comparando as alterações verificadas em relação ao Modelo I, o Modelo I-B causou mais impacto na alteração das forças cortantes nos membros verticais do que o Modelo I-A.

8.5.1 Modelo I-B : Caso II – Fase de Pico – F+X

A Figura 8:13 a seguir apresenta o perfil de distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico, correspondente a uma força horizontal máxima de 193,40 kN o que perfaz um fator de carga de 3,48. Nela é possível se observar claramente o mecanismo de sustentação da força horizontal aplicada através dos três membros verticais da parede assim como a expressiva concentração das tensões de cisalhamento no membro C. Esta concentração de tensões concorrerá para uma maior magnitude da força cortante que solicita o membro C, conforme se constata na Tabela 8:26 a seguir, onde se observa que aproximadamente 50% da força máxima aplicada é suportada por este membro, ficando o restante da força distribuída entre os demais membros – 31% para o membro A e 19% para o membro B.



Figura 8:13 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo I-B - Caso II - F+X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	61.640,84	31,880
B	36.336,59	18,793
C	97.256,13	50,300

Tabela 8:26 - Distribuição da força horizontal - Modelo I-B - Caso II - Fase de Pico - F+X

Quando se comparam as distribuições da força horizontal na fase pico para os Modelo I e I-B (Tabela 8:4 e Tabela 8:26) observa-se que o desnivelamento da janela de 20 cm acima da porta não alterou a magnitude da força cortante no membro mais solicitado (membro C) mas aumentou a parcela do membro A e diminui a parcela do membro B, comportamento contrário ao que foi observado no Modelo I-A, no qual a janela se situa 20 cm abaixo da porta (vê Tabela 8:4 e Tabela 8:15).

Se se comparam os comportamentos dos Modelo I, I-A e I-B na fase de pico para ação da força horizontal segundo +X e tendo como referência o Modelo I (Tabela 8:4 e Tabela 8:15; Tabela 8:4 e Tabela 8:26), nota-se comportamentos com tendência nitidamente diferentes. Com efeito, enquanto no Modelo I-A o membro A experimenta um decréscimo na parcela da força cortante que o solicita (de 29,23% no Modelo I para 25,80% no Modelo I-A), no Modelo I-B há um acréscimo na parcela da força cortante neste membro (de 29,23% no Modelo I para 31,80% no Modelo I-B). O membro B experimenta um acréscimo na parcela da força cortante que o solicita no Modelo I-A (de 21,67% no Modelo I para 25,34% no Modelo I-A) ao passo que no Modelo I-B há um decréscimo deste valor (de 21,67% no Modelo I para 18,79% no Modelo I-B). O membro C quase não sofre alteração na força cortante que o solicita nos três modelos analisados (50,33% no Modelo I, 50,43% no Modelo I-A e 50,30% no Modelo I-B).

8.5.2 Modelo I-B : Caso II – Fase $F_{max}/2$ – F+X

A Figura 8:14 e a Tabela 8:27 a seguir apresentam, respectivamente, a distribuição das tensões de cisalhamento para uma força equivalente à metade da força horizontal máxima e a distribuição desta força para os três membros da parede de contraventamento.

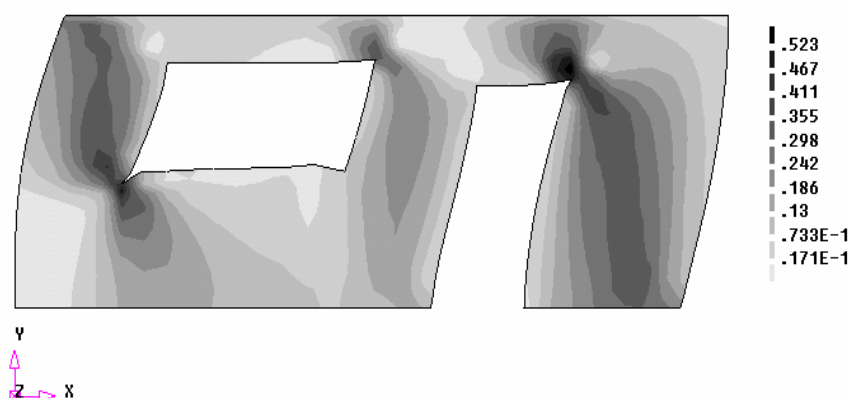


Figura 8:14 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo I-B - Caso II - F+X - N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	32.002,96	33,104
B	20.401,37	21,103
C	44.618,93	46,153

Tabela 8:27 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B – Caso II : Fase de $F_{max}/2$ – F+X

Quando se comparam as distribuições da força horizontal na fase correspondente à metade da força máxima para os Modelo I e I-B (Tabela 8:5 e Tabela 8:27) para ação da força horizontal segundo +X observa-se comportamento com mesma tendência daquele verificado na fase de pico, inclusive no que diz respeito à divergência de comportamento relativa ao Modelo I-A para o mesmo estágio de carga e mesmo sentido de atuação da força horizontal (+X).

Se se comparam os comportamentos dos Modelo I, I-A e I-B na fase de $F_{max}/2$ para ação da força horizontal segundo +X e tendo como referência o Modelo I (Tabela 8:5 e Tabela 8:16; Tabela 8:5 e Tabela 8:27), nota-se comportamentos com tendência nitidamente diferentes. Com efeito, enquanto no Modelo I-A o membro A experimenta um decréscimo na parcela da força cortante que o solicita (de 29,29% no Modelo I para 26,10% no Modelo I-A), no Modelo I-B há um acréscimo na parcela da força cortante neste membro (de 29,29% no Modelo I para 33,10% no Modelo I-B). O membro B experimenta um acréscimo na parcela da força cortante que o solicita no Modelo I-A (de 23,53% no Modelo I para 26,34% no Modelo I-A) ao passo que no Modelo I-B há um decréscimo deste valor (de 23,53% no Modelo I para 21,10% no Modelo I-B). No membro C as alterações são mais discretas sendo que, no modelo I-A, há um ligeiro acréscimo na força cortante que o solicita (de 47,58% no Modelo I para 47,96% no Modelo I-A) e no Modelo I-B é observado uma diminuição (de 47,58% no Modelo I para 46,15% no Modelo I-B).

8.5.3 Modelo I-B : Caso II – Fase Pós Pico – F+X

O perfil das tensões de cisalhamento e a distribuição da força horizontal na fase pós pico acham-se representadas na Figura 8:15 e Tabela 8:28.



Figura 8:15 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo I-B – Caso II – F+X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	51.442,16	27,897
B	37.143,33	20,143
C	98.865,11	53,614

Tabela 8:28 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B – Caso II : Fase Pós Pico – F+X

Quando se comparam as distribuições da força horizontal na fase pós-pico para os Modelo I e I-B (Tabela 8:6 e Tabela 8:28) observou-se um pequeno acréscimo na parcela da força cortante que solicita o membro C e A e a mesma tendência de redução na força cortante que solicita o membro B, comportamento divergente daquele exibido pelo Modelo I-A (vê Tabela 8:6 e Tabela 8:17)

Se se comparam os comportamentos dos Modelo I, I-A e I-B na fase de pos pico para ação da força horizontal segundo +X e tendo como referência o Modelo I (Tabela 8:6 e Tabela 8:17; Tabela 8:6 e Tabela 8:28), nota-se comportamentos com tendência diferentes. Com efeito, no Modelo I-A o membro A experimenta um decréscimo na parcela da força cortante que o solicita (de 30,01% no Modelo I para 27,12% no Modelo I-A), comportamento também observado no Modelo I-B (de 30,01% no Modelo I para 27,90% no Modelo I-B). Já o membro B experimenta um acréscimo na parcela da força cortante que o solicita no Modelo I-A (de 23,22% no Modelo I para 26,35% no Modelo I-A) ao passo que no Modelo I-B há um decréscimo deste valor (de 23,22% no Modelo I para 20,14% no Modelo I-B). No membro C as alterações são mais discretas no Modelo I-A, sendo observada uma variação muito pequena para baixo no valor da força cortante que o solicita (de 48,66% no Modelo I para 48,50% no Modelo I-A). Já no Modelo I-B a alteração

observada neste membro foi para cima, passando de 48,66% no Modelo I para 53,61% no Modelo I-B.

8.6 Modelo I-B : Caso II – Fase Elástica – F-X

A seguir apresentam-se resultados da análise do mesmo modelo e mesmo caso de carga, mas com força horizontal segundo -X.

A Tabela 8:29 a seguir apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelo procedimento clássico e aqueles decorrentes da análise de elementos finitos em regime elástico.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	18.296,40	15.307,80	19,523	27,520
B	24.525,18	19.411,68	26,342	34,898
C	12.802,42	21.127,91	-39,405	37,983

Tabela 8:29 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-B – Caso II : Fase Elástica – F-X

Os resultados apresentados na Tabela 8:29, quando comparados com aqueles da Tabela 8:24, mostram que a mudança na direção de atuação da força horizontal, no regime elástico e para ação isolada da força horizontal, introduziu pequena perturbação no perfil de distribuição da mesma para os membros da parede, permanecendo uma superestimação da força cortante nos membros A e B e subestimação no membro C.

Se se comparam os valores da Tabela 8:7 e da Tabela 8:29, observa-se que, a exemplo do que já ocorrera para ação da força horizontal segundo +X, o desnivelamento de 20 cm para cima da abertura da janela em relação à abertura da porta causou alteração na parcela da força cortante que solicita cada membro da parede, devendo-se destacar o incremento na subestimação do membro C. Comparando com as alterações ocorridas no Modelo I-A em relação ao Modelo I (Tabela 8:7 e Tabela 8:18) nota-se que aquelas exibidas pelo Modelo I-B são mais expressivas.

Quando se considera a ação simultânea do carregamento compressivo vertical e da força horizontal, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 8:30.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	18.296,40	10.712,88	70,789	19,259
B	24.525,18	28.904,51	-15,151	51,964
C	12.802,42	16.256,18	-21,246	29,225

Tabela 8:30 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I-B - Caso II: Fase Elástica - F-X₊G+Q

Comparando os resultados apresentados na Tabela 8:29 com aqueles da Tabela 8:30 é possível observar que a atuação simultânea do carregamento vertical e horizontal (direção -X) introduz importante alteração no perfil de distribuição da força horizontal podendo ser observada agora uma subestimação das forças cortantes que atuam nos membros B e C, comportamento com importantes diferenças daquele que foi observado para a ação simultânea dos dois carregamentos com a força horizontal agindo segundo a direção +X (Tabela 8:24 e Tabela 8:25).

8.6.1 Modelo I-B : Caso II – Fase de Pico – F-X

A Figura 8:16 a seguir apresenta o perfil de distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico, correspondente a uma força horizontal máxima de 211,4 kN o que perfaz um fator de carga de 3,80. Nela é possível se observar claramente o mecanismo de sustentação da força horizontal aplicada através dos três membros verticais da parede assim como a expressiva concentração das tensões de cisalhamento no membro B. Esta concentração de tensões concorrerá para uma maior magnitude da força cortante que solicita este membro, conforme se constata na Tabela 8:31 a seguir, onde se observa que aproximadamente 50% da força máxima aplicada é suportada por este membro.

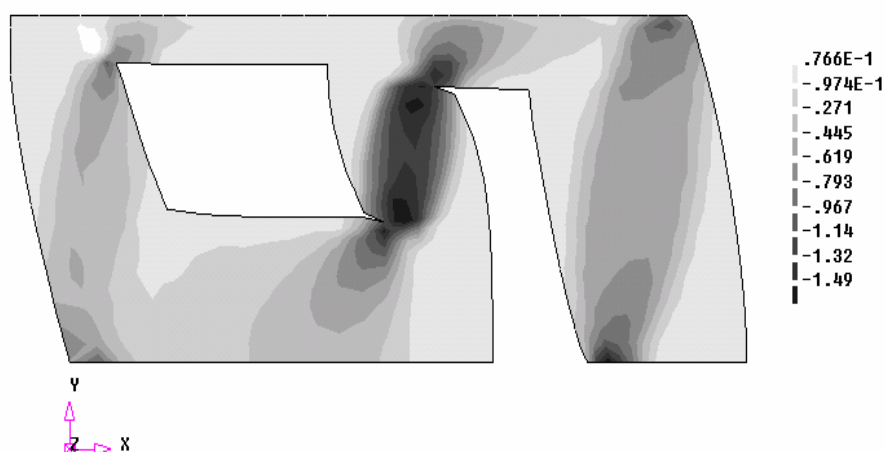


Figura 8:16 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo I-B - Caso II - F-X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	37.609,72	17,794
B	107.907,49	51,054
C	66.865,01	31,636

Tabela 8:31 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B – Caso II - Fase de Pico – F-X

Quando se comparam as distribuições da força horizontal na fase pico para os Modelo I e I-B, para ação da força horizontal segundo -X, (Tabela 8:9 e Tabela 8:31) observa-se que o desnivelamento entre as aberturas diminuiu a magnitude das forças cortantes nos membros A e C, com variação mais expressiva no membro A, e aumentou de maneira importante a parcela da força cortante que solicita o membro B. Este comportamento é diverso daquele que foi observado para os mesmos modelos na fase de pico para ação da força horizontal segundo +X (Tabela 8:4 e Tabela 8:26), aspecto que realça a influência do sentido de aplicação da força horizontal na resposta das paredes analisadas.

Se se comparam os comportamentos dos Modelo I, I-A e I-B na fase de pico para ação da força horizontal segundo -X e tendo como referência o Modelo I (Tabela 8:9 e Tabela 8:20; Tabela 8:9 e Tabela 8:31), nota-se comportamentos com tendência nitidamente diferentes. Com efeito, enquanto no Modelo I-A o membro A experimenta um acréscimo na parcela da força cortante que o solicita (de 21,3% no Modelo I para 26,10% no Modelo I-A), no Modelo I-B há uma redução na parcela da força cortante neste membro (de 21,3% no Modelo I para 17,79% no Modelo I-B). O membro B experimenta uma redução na parcela da força cortante que o solicita no Modelo I-A (de 44,93% no Modelo I para 37,93% no Modelo I-A) ao passo que no Modelo I-B há um acréscimo deste valor (de 44,93% no Modelo I para 51,05% no Modelo I-B). No membro C as alterações são mais discretas sendo que, no modelo I-A, há um acréscimo na força cortante que o solicita (de 34,34% no Modelo I para 36,72% no Modelo I-A) e no Modelo I-B é observado uma diminuição (de 34,34% no Modelo I para 31,64% no Modelo I-B).

8.6.2 Modelo I-B : Caso II – Fase de $F_{max}/2$ – F-X

A Figura 8:17 e a Tabela 8:32 a seguir apresentam, respectivamente, a distribuição das tensões de cisalhamento para uma força equivalente à metade da força horizontal máxima e a distribuição desta força para os três membros da parede de contraventamento.

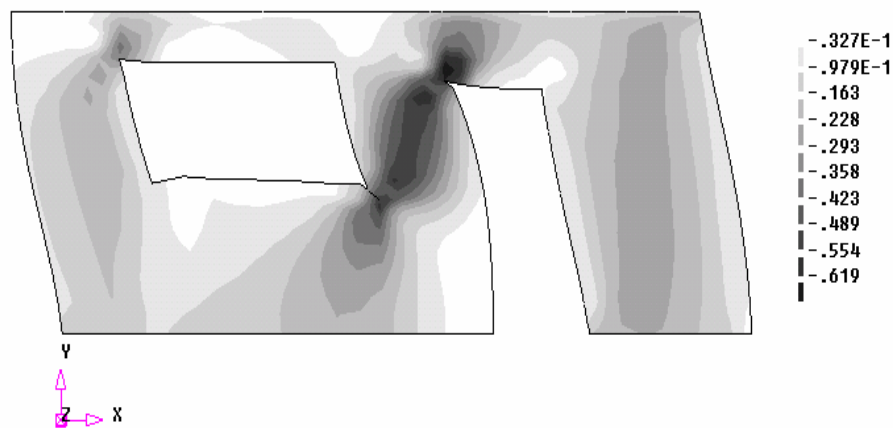


Figura 8:17 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo I-B - Caso II - F-X - N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	20.772,91	19,645
B	49.416,34	46,732
C	36.006,37	34,051

Tabela 8:32 - Distribuição da força horizontal - Modelo I-B - Caso II : Fase de $F_{max}/2$ - F-X

Quando se comparam as distribuições da força horizontal na fase correspondente à metade da força máxima para os Modelo I e I-B com força horizontal segundo $-X$ (Tabela 8:10 e Tabela 8:32) observa-se comportamento com mesma tendência daquele verificado na fase de pico, já referido anteriormente, inclusive no que respeita à divergência do comportamento dos mesmos modelos no mesmo estágio de carga mas com força horizontal segundo $+X$ (Tabela 8:5 e Tabela 8:27).

Se se comparam os comportamentos dos Modelo I, I-A e I-B na fase de $F_{max}/2$ para ação da força horizontal segundo $-X$ e tendo como referência o Modelo I (Tabela 8:10 e Tabela 8:21; Tabela 8:10 e Tabela 8:32), nota-se comportamentos com tendência nitidamente diferentes. Com efeito, enquanto no Modelo I-A o membro A experimenta um acréscimo na parcela da força cortante que o solicita (de 22,89% no Modelo I para 26,640% no Modelo I-A), no Modelo I-B há uma redução na parcela da força cortante neste membro (de 22,89% no Modelo I para 19,64% no Modelo I-B). O membro B experimenta uma redução na parcela da força cortante que o solicita no Modelo I-A (de 41,53% no Modelo I para 36,46% no Modelo I-A) ao passo que no Modelo I-B há um acréscimo deste valor (de 41,53% no Modelo I para 46,73% no Modelo I-B). No membro C

as alterações são mais discretas sendo que, no modelo I-A, há um acréscimo na força cortante que o solicita (de 36,11% no Modelo I para 37,51% no Modelo I-A) e no Modelo I-B é observado uma diminuição (de 36,11% no Modelo I para 34,05% no Modelo I-B).

8.6.3 Modelo I-B : Caso II – Fase Pós Pico – F-X

O perfil das tensões de cisalhamento e a distribuição da força horizontal na fase pós pico acham-se representadas na Figura 8:18 e Tabela 8:33, onde se pode observar um comportamento semelhante àquele observado na fase de pico, quando se comparam as distribuições da força horizontal na fase de pós pico para os Modelos I e I-B (Tabela 8:11 e Tabela 8:33). Também foi observada a mesma divergência de comportamento verificada para estes mesmos modelos e neste mesmo estágio de carga (pós pico) quando da atuação da força horizontal segundo +X (Tabela 8:6 e Tabela 8:28)

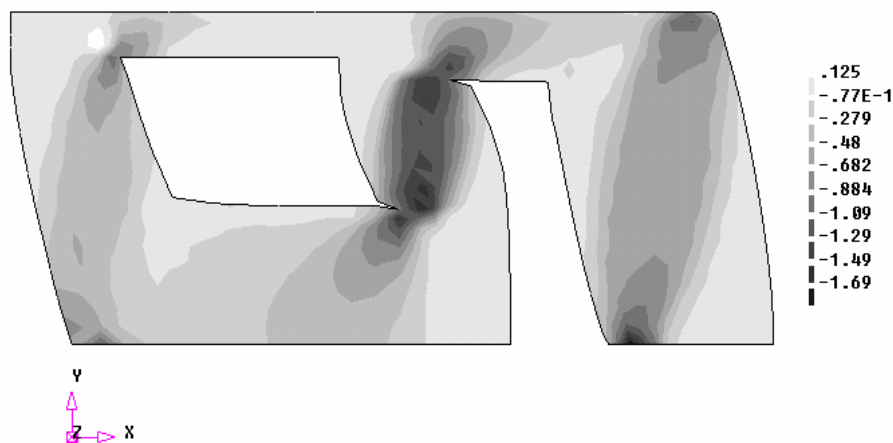


Figura 8:18 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo I-B - Caso II - F-X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	37.873,15	18,275
B	101.906,03	49,174
C	68.663,99	33,133

Tabela 8:33 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B – Caso II : Fase Pós Pico – F-X

Se se comparam os comportamentos dos Modelo I, I-A e I-B na fase de pos pico para ação da força horizontal segundo -X e tendo como referência o Modelo I (Tabela 8:11 e Tabela 8:22; Tabela 8:11 e Tabela 8:33), nota-se comportamentos com tendência nitidamente diferentes. Com efeito, enquanto no Modelo I-A o membro A experimenta um acréscimo na parcela da força cortante que o solicita (de 23,83% no Modelo I para 28,39%

no Modelo I-A), no Modelo I-B há uma redução na parcela da força cortante neste membro (de 23,83% no Modelo I para 18,27% no Modelo I-B). O membro B experimenta uma redução na parcela da força cortante que o solicita no Modelo I-A (de 37,89% no Modelo I para 31,41% no Modelo I-A) ao passo que no Modelo I-B há um acréscimo deste valor (de 37,89% no Modelo I para 49,17% no Modelo I-B). No membro C as alterações são mais discretas sendo que, no modelo I-A, há um acréscimo na força cortante que o solicita (de 39,36% no Modelo I para 41,41% no Modelo I-A) e no Modelo I-B é observado uma diminuição (de 39,36% no Modelo I para 33,13% no Modelo I-B).

8.7 Modelo II : Caso II – Fase Elástica – F+X

O Modelo II é uma variante do Modelo I-B, no qual os comprimentos dos membros verticais foram duplicados em relação àquele modelo, alterando assim a relação de forma (altura/comprimento) dos membros verticais.

A Tabela 8:34 a seguir apresenta a distribuição da força horizontal aplicada para os membros da parede de contraventamento, calculada pelo procedimento clássico.

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	2.000	0,600	291.666,67	33,135	18.431,01
B	1.000	2.000	0,500	362.790,70	41,215	22.925,43
C	2.200	3.000	0,733	225.771,87	25,649	14.267,56

Tabela 8:34 - Distribuição de força cortante – Modelo II – Caso II : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico

Comparando a distribuição da força cortante pelo procedimento clássico para o Modelo II e I-B (Tabela 8:34 e Tabela 8:23) nota-se um acréscimo no percentual desta força nos membros A e C, com mais expressão em C, e um decréscimo no membro B.

Quando se faz a mesma comparação da distribuição da força cortante para os Modelo II e I-B na fase elástica linear para ação exclusiva da força horizontal segundo +X pelo MEF (Tabela 8:35 e Tabela 8:24), a mesma tendência foi observada, ou seja, houve acréscimo da força cortante nos membros A e C e decréscimo no membro B. Também deve ser notado que o máximo erro relativo no membro C caiu de 38% no Modelo I-B (Tabela 8:24) para 33% no Modelo II (Tabela 8:35), ao passo que no membro A caiu de 15% no Modelo I-B (Tabela 8:24) para 7% no Modelo II (Tabela 8:35), mais do que a metade. No

membro B foi verificado um acréscimo no erro relativo de 27,24% no Modelo I-B para 34,74% no Modelo II.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	18.431,01	17.209,63	7,100	30,939
B	22.925,43	17.014,65	34,739	30,587
C	14.267,56	21.431,31	-33,427	38,529

Tabela 8:35 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo II - Caso II : Fase Elástica - F+X

Promovendo-se comparação similar da distribuição da força cortante para os Modelo II e I-B na fase elástica linear pelo MEF, mas agora para ação simultânea da força horizontal segundo +X e carregamento vertical (Tabela 8:25 e Tabela 8:36), nota-se também acréscimo na força cortante nos membros A e C e decréscimo no membro B. Também deve ser notado que o erro relativo no membro C caiu de 49,8% no Modelo I-B (Tabela 8:25) para 46,4% no Modelo II (Tabela 8:36), ao passo que no membro A houve incremento de 10,7% no Modelo I-B (Tabela 8:25) para 18% no Modelo II (Tabela 8:36), mais do que 70%. No membro B foi verificado um importante acréscimo no erro relativo de 150,74% no Modelo I-B para 253,81% no Modelo II. À exceção do incremento observado no erro relativo do membro A, os outros membros exibiram a mesma tendência observada para estes modelos quando da ação exclusiva da força horizontal, exposto no parágrafo anterior.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	18.431,01	22.551,73	-18,272	40,543
B	22.925,43	6.479,56	253,811	11,649
C	14.267,56	26.616,28	-46,395	47,850

Tabela 8:36 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo II - Caso II: Fase Elástica - F+X+G+Q

8.7.1 Modelo II : Caso II - Fase de Pico - F+X

A Figura 8:19 a seguir apresenta o perfil de distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico, correspondente a uma força horizontal máxima de 547,10 kN o que perfaz um fator de carga de 9,84. Nela é possível se observar claramente o mecanismo de sustentação da força horizontal aplicada através dos três membros verticais

da parede assim como a expressiva concentração das tensões de cisalhamento nos membros A e C, com maior intensidade no membro C. Esta concentração de tensões concorrerá para uma maior magnitude da força cortante que solicita estes membros, conforme se constata na Tabela 8:37 a seguir, onde se observa que mais de 80% da força máxima aplicada é suportada por estes membros, sendo que o membro C responde por aproximadamente 50% deste valor.

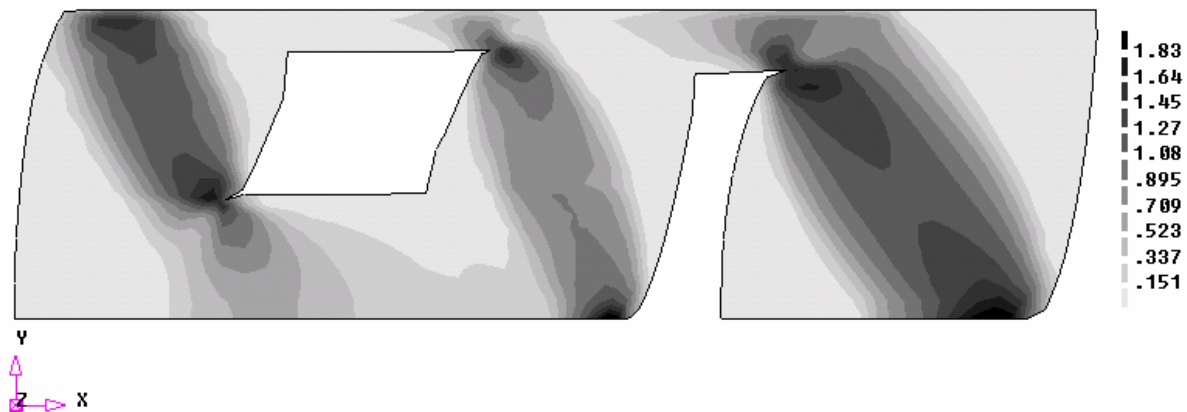


Figura 8:19 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo II - Caso II - F+X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	173.377,55	31,690
B	105.059,98	19,203
C	269.881,37	49,329

Tabela 8:37 - Distribuição da força horizontal - Modelo II - Caso II - Fase de Pico - F+X

Comparando a distribuição da força cortante para os Modelo II e I-B na fase de pico para ação da força horizontal segundo +X (Tabela 8:37 e Tabela 8:26), nota-se um comportamento virtualmente similar, com inexpressivas alterações, aspecto que aponta a pouca influência gerada pela mudança na razão de forma dos membros verticais, introduzida pelo Modelo II, na resposta dos membros verticais que integram os modelos estes dois modelos. Esta similitude de comportamento também se estende à resposta global dos Modelos I-B e II exibidos na Figura 4:29e Figura 4:31.

8.7.2 Modelo II : Caso II - Fase Fmax/2 - F+X

A Figura 8:20 e a Tabela 8:38 a seguir apresentam, respectivamente, a distribuição das tensões de cisalhamento para uma força equivalente à metade da força horizontal máxima e a distribuição desta força para os três membros da parede de contraventamento.

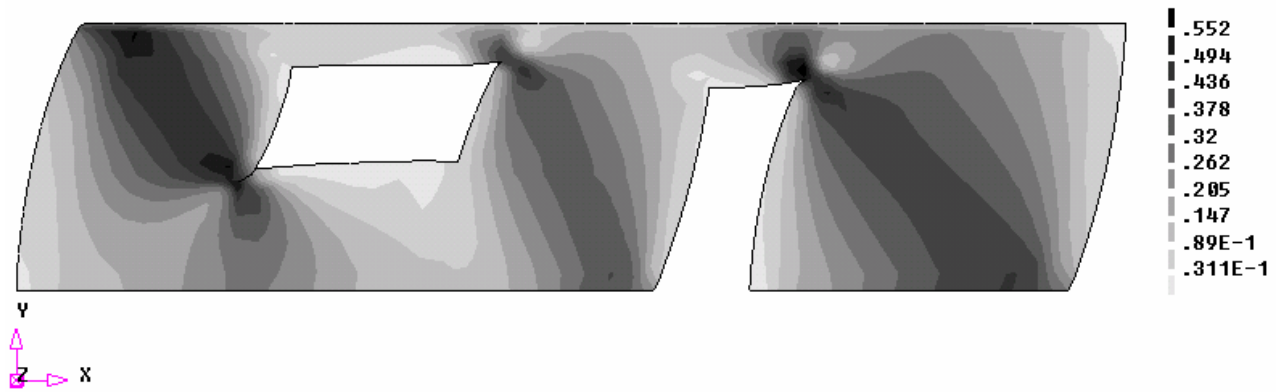


Figura 8:20 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo II - Caso II - F+X - N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	90.181,13	32,969
B	63.791,89	23,321
C	119.778,54	43,789

Tabela 8:38 - Distribuição da força horizontal - Modelo II - Caso II : Fase de $F_{max}/2$ - F+X

Comparando a distribuição da força cortante para os Modelo II e I-B na fase de $F_{max}/2$ para ação da força horizontal segundo +X (Tabela 8:38 e Tabela 8:27), nota-se um comportamento também similar, conforme já fora observado na fase de pico.

8.7.3 Modelo II : Caso II - Fase Pós Pico - F+X

O perfil das tensões de cisalhamento e a distribuição da força horizontal na fase pós pico acham-se representadas na Figura 8:21 e Tabela 8:39.

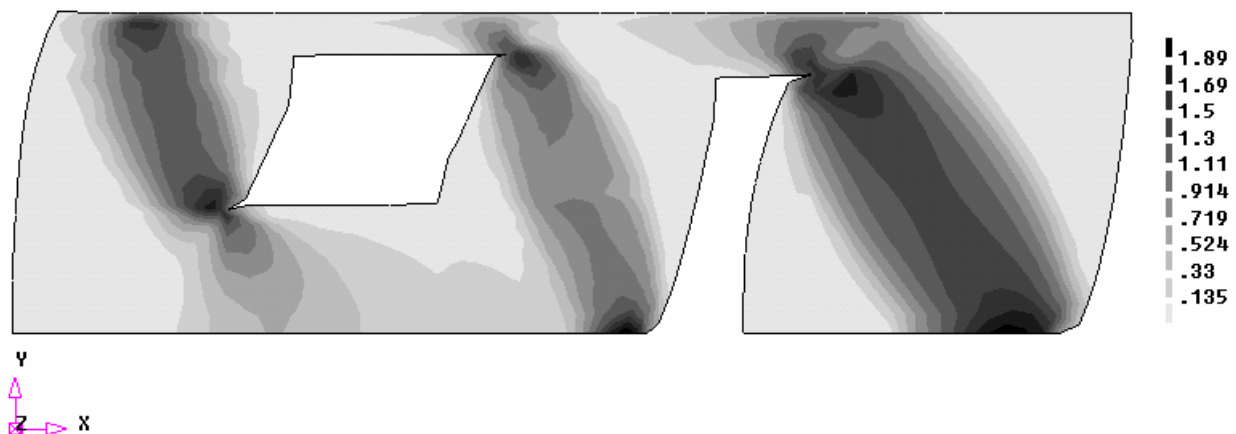


Figura 8:21 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo II - Caso II - F+X N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	149.723,48	28,061
B	106.910,65	20,037
C	278.189,33	52,137

Tabela 8:39 - Distribuição da força horizontal - Modelo II - Caso II : Fase Pós Pico - F+X

Comparando a distribuição da força cortante para os Modelo II e I-B na fase de pós-pico para ação da força horizontal segundo +X (Tabela 8:39 e Tabela 8:28), nota-se um comportamento também similar, conforme já fora observado na fase de pico.

8.8 Modelo II : Caso II – Fase Elástica – F-X

A Tabela 8:40 a seguir apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelo procedimento clássico e aqueles decorrentes da análise de elementos finitos em regime elástico.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	18.431,01	14.405,69	27,943	25,898
B	22.925,43	17.001,30	34,845	30,565
C	14.267,56	24.244,12	-41,150	43,586

Tabela 8:40 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo II - Caso II : Fase Elástica – F-X

Comparando a distribuição da força cortante para os Modelo II e I-B na fase elástica linear para ação exclusiva da força horizontal segundo -X pelo MEF (Tabela 8:40 e Tabela 8:29), nota-se um decréscimo na força cortante nos membros A e B e acréscimo em C, que à exceção do decréscimo observado no membro A, caracteriza um comportamento com tendência similar ao que fora exibido por estes mesmos modelos no mesmo estágio de carga, mas com força horizontal segundo +X (Tabela 8:35 e Tabela 8:24). Também deve ser notado que houve incremento no erro relativo de todos os membros verticais. Com efeito, no membro C houve incremento de 39,4% no Modelo I-B (Tabela 8:29) para 41,15% no Modelo II (Tabela 8:40), no membro A de 19,5% no Modelo I-B (Tabela 8:29) para 27,9% no Modelo II (Tabela 8:40) e no membro B de 26,34% no Modelo I-B para 34,84% no Modelo II, comportamento com tendência divergente daquele observado para os mesmos modelos no mesmo estágio de carga mas com força horizontal segundo +X (Tabela 8:35 e Tabela 8:24).

Promovendo-se comparação similar da distribuição da força cortante para os Modelo II e I-B na fase elástica linear pelo MEF, mas agora para ação simultânea da força horizontal segundo -X e carregamento vertical (Tabela 8:30 e Tabela 8:41), nota-se também decréscimo na força cortante nos membros A e B e acréscimo no membro C. Também deve ser notado que houve incremento do erro relativo no três membros verticais, sendo mais expressivo este aumento no membro A, mais de 45%.

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	18.431,01	9.063,58	103,352	16,294
B	22.925,43	27.536,40	-16,745	49,505
C	14.267,56	19.059,15	-25,141	34,264

Tabela 8:41 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo II - Caso II: Fase Elástica - F-X₋G+Q

8.8.1 Modelo II : Caso II - Fase de Pico - F-X

A Figura 8:22 a seguir apresenta o perfil de distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico, correspondente a uma força horizontal máxima de 579,10 kN o que perfaz um fator de carga de 10,41. Nela é possível se observar claramente o mecanismo de sustentação da força horizontal aplicada através dos três membros verticais da parede assim como a expressiva concentração das tensões de cisalhamento no membro B. Esta concentração de tensões concorrerá para uma maior magnitude da força cortante que solicita este membro, conforme se constata na Tabela 8:42 a seguir, onde se observa que aproximadamente 47% da força máxima aplicada é suportada por este membro.

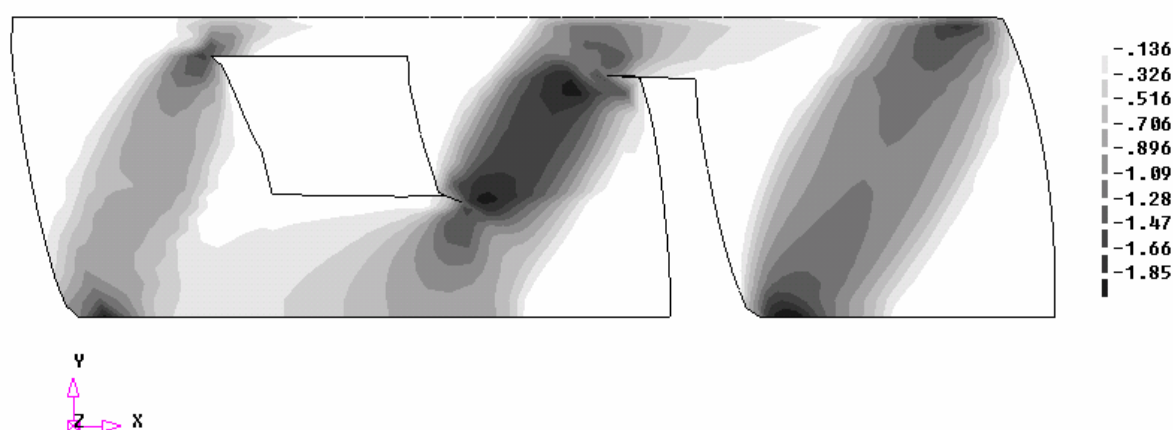


Figura 8:22 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo II - Caso II - F-X - N/mm²

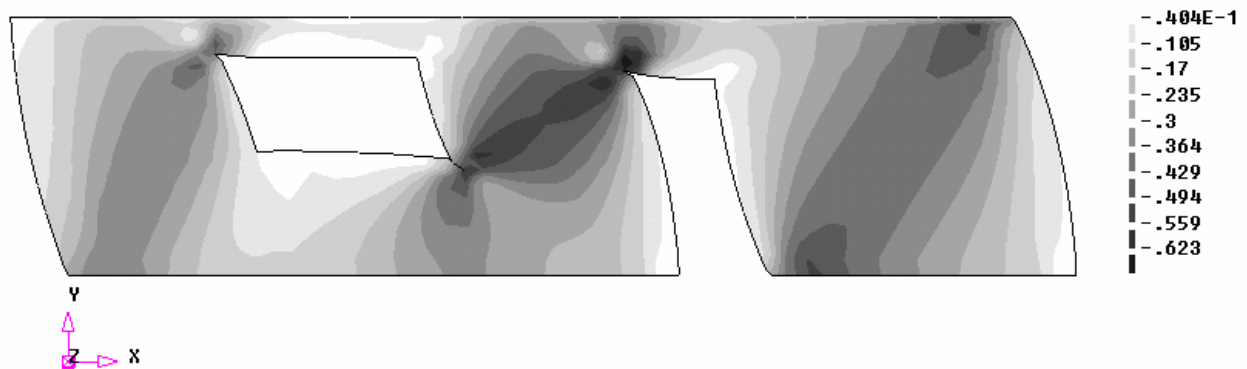
Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	107.134,75	18,508
B	270.260,04	46,690
C	202.222,04	34,936

Tabela 8:42 - Distribuição da força horizontal – Modelo II – Caso II - Fase de Pico – F-X

Comparando a distribuição da força cortante para os Modelo II e I-B na fase de pico para ação da força horizontal segundo -X (Tabela 8:42 e Tabela 8:31), nota-se um comportamento virtualmente similar, com alterações não maiores do que 10%, aspecto que aponta a suave influência gerada pela mudança na razão de forma dos membros verticais, introduzida pelo Modelo II, na resposta dos membros verticais que integram os modelos estes dois modelos. Esta similitude de comportamento também se estende à resposta global dos Modelos I-B e II exibidos na Figura 4:30 e Figura 4:32.

8.8.2 Modelo II : Caso II – Fase $F_{max}/2$ – F-X

A Figura 8:23e a Tabela 8:43 a seguir apresentam, respectivamente, a distribuição das tensões de cisalhamento para uma força equivalente à metade da força horizontal máxima e a distribuição desta força para os três membros da parede de contraventamento.

Figura 8:23 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ – Modelo II – Caso II – F-X – N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	64.108,59	22,141
B	110.992,23	38,333
C	114.611,50	39,583

Tabela 8:43 - Distribuição da força horizontal – Modelo II – Caso II : Fase de $F_{max}/2$ – F-X

Comparando a distribuição da força cortante para os Modelo II e I-B na fase de $F_{max}/2$ para ação da força horizontal segundo -X (Tabela 8:43 e Tabela 8:32), nota-se um comportamento também similar, conforme já fora observado na fase de pico.

8.8.3 Modelo II : Caso II – Fase Pós Pico – F-X

O perfil das tensões de cisalhamento e a distribuição da força horizontal na fase pós pico acham-se representados na Figura 8:24 e Tabela 8:44.

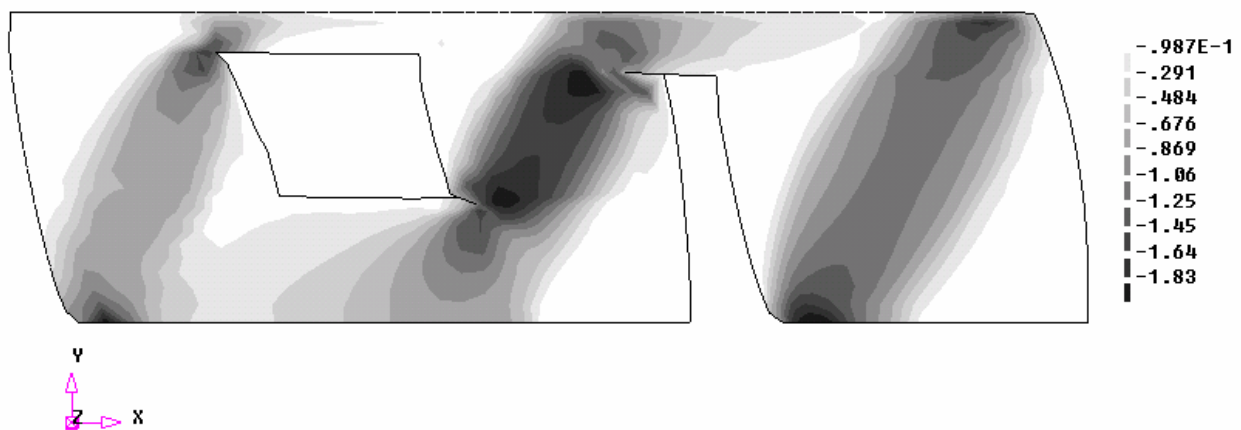


Figura 8:24 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo II – Caso II – F-X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	107.179,00	18,651
B	265.996,00	46,288
C	202.323,97	35,208

Tabela 8:44 - Distribuição da força horizontal – Modelo II – Caso II : Fase Pós Pico – F-X

Comparando a distribuição da força cortante para os Modelo II e I-B na fase de pós-pico para ação da força horizontal segundo -X (Tabela 8:44 e Tabela 8:33), nota-se um comportamento também similar, conforme já fora observado na fase de pico.

8.9 Modelo III – Caso II – F+X

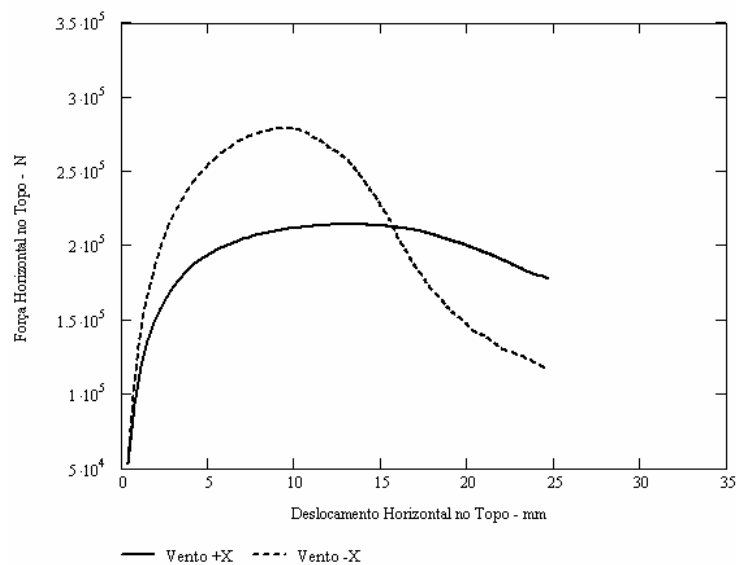


Figura 8:25 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo III: Caso II – F+X

Os deslocamentos horizontais máximos obtidos foram de 13,667 mm e 9,548 mm, correspondentes, respectivamente, aos valores máximos das forças horizontais agindo segundo as direções +X e -X. As forças máximas alcançadas para estas duas situações, 214,2 kN e 279,20 kN, o que conduziu a fatores de carga de 3,85 e 5,02 respectivamente.

8.9.1 Distribuição da Força Horizontal

8.9.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	1.000	1,200	108.333,33	28,274	15.727,13
B	1.200	1.800	0,667	255.582,52	66,706	37.104,54
C	2.200	800	2,750	19.234,24	5,020	2.792,33

Tabela 8:45 - Distribuição de força cortante – Modelo III – Caso II : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	15.727,13	13.357,04	17,744	24,013
B	37.104,54	37.601,40	-1,321	67,599
C	2.792,33	4.665,56	-40,150	8,388

Tabela 8:46 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III – Caso II : Fase Elástica – F+X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	15.727,13	16.057,23	-2,056	28,867
B	37.104,54	32.398,40	14,528	58,246
C	2.792,33	7.168,03	-61,045	12,887

Tabela 8:47 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo III - Caso II: Fase Elástica - F+X₁+G+Q

8.9.1.2 Fase de Pico

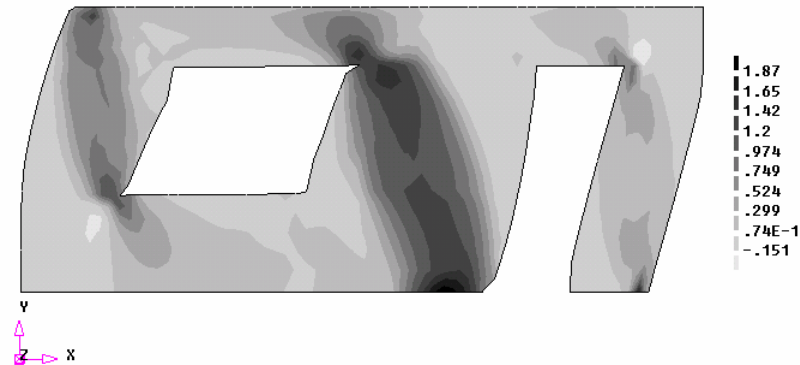


Figura 8:26 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo III - Caso II - F+X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	51.643,39	24,115
B	139.918,45	65,334
C	22.595,09	10,551

Tabela 8:48 - Distribuição da força horizontal - Modelo III - Caso II - Fase de Pico - F+X

8.9.1.3 Fase de Fmax/2

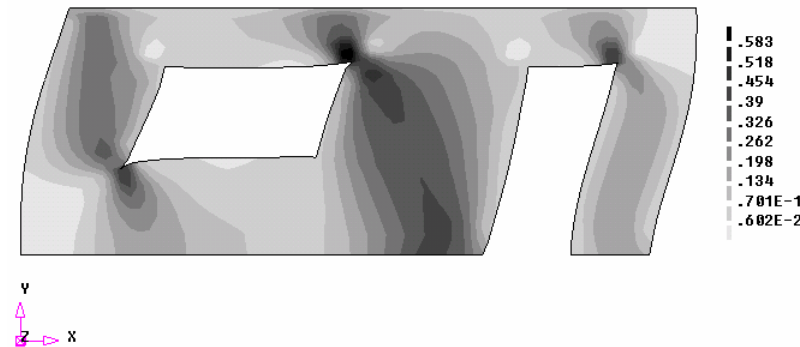


Figura 8:27 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 - Modelo III - Caso II - F+X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	28.234,58	26,364
B	64.907,55	60,608
C	13.952,60	13,028

Tabela 8:49 - Distribuição da força horizontal - Modelo III - Caso II : Fase de Fmax/2 - F+X

8.9.1.4 Fase de Pós Pico



Figura 8:28 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo III - Caso II - F+X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	51.544,54	24,412
B	137.427,23	65,086
C	22.176,63	10,503

Tabela 8:50 - Distribuição da força horizontal - Modelo III - Caso II : Fase Pós Pico - F+X

8.9.2 Modelo III - Caso II - F+X - Gráficos

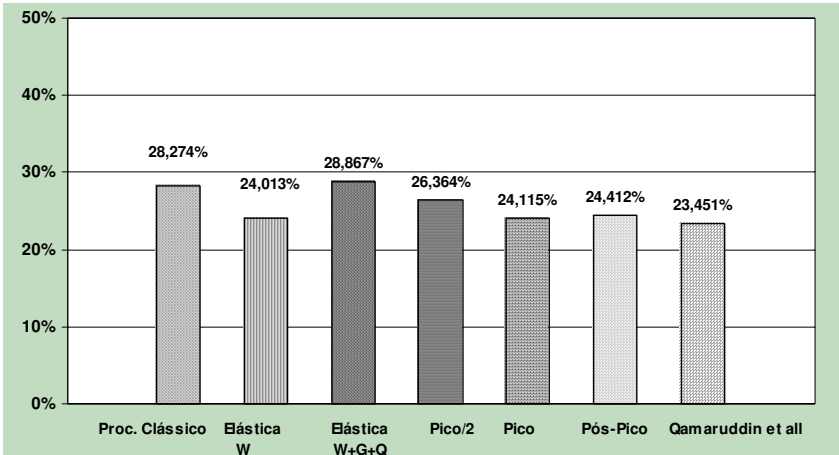


Gráfico 8:1 - Distribuição da força horizontal: Modelo III - Caso II: F+X: Membro A

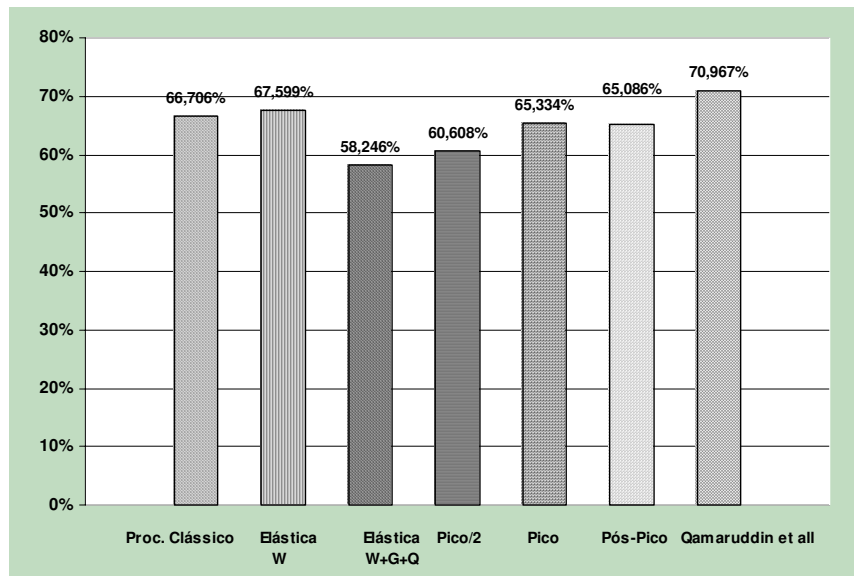


Gráfico 8:2 - Distribuição da força horizontal: Modelo III - Caso II: F+X: Membro B

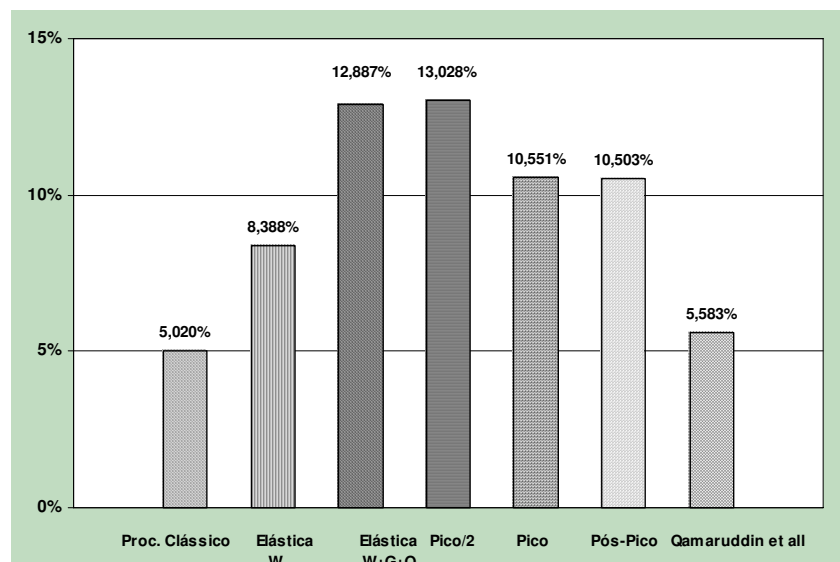


Gráfico 8:3 - Distribuição da força horizontal: Modelo III - Caso II: F+X: Membro C

8.10 Modelo III - Caso II - F-X

8.10.1 Distribuição da Força Horizontal

8.10.1.1 Fase Elástica

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	15.727,13	12.933,97	21,595	23,252
B	37.104,54	37.905,24	-2,112	68,145
C	2.792,33	4.784,79	-41,641	8,602

Tabela 8:51 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo III - Caso II : Fase Elástica - F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	15.727,13	10.233,78	53,677	18,398
B	37.104,54	43.107,89	-13,926	77,499
C	2.792,33	2.282,32	22,346	4,103

Tabela 8:52 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III – Caso II: Fase Elástica – F-X₊G+Q

8.10.1.2 Fase de Pico

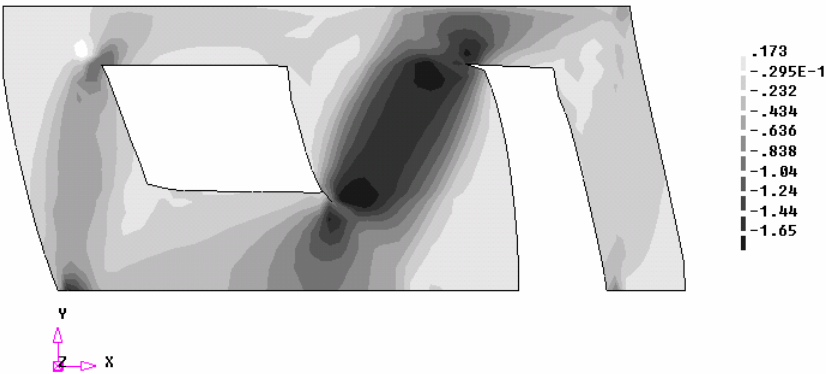


Figura 8:29 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III – Caso II – F-X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	37.913,91	13,582
B	229.193,92	82,102
C	12.051,39	4,317

Tabela 8:53 - Distribuição da força horizontal – Modelo III – Caso II - Fase de Pico – F-X

8.10.1.3 Fase de Fmax/2

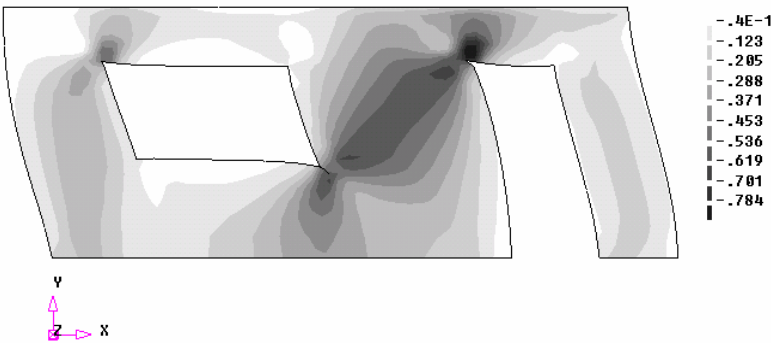


Figura 8:30 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 – Modelo III – Caso II – F-X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	24.420,99	17,485
B	104.280,49	74,662
C	10.969,12	7,854

Tabela 8:54 - Distribuição da força horizontal – Modelo III – Caso II : Fase de Fmax/2 – F-X

8.10.1.4 Fase de Pós Pico

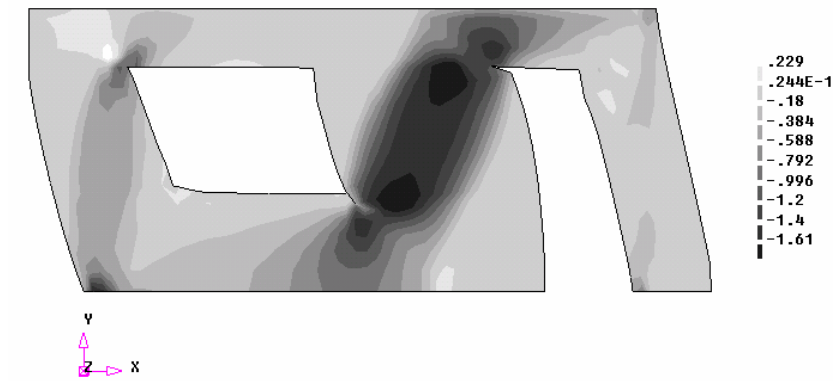


Figura 8:31 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo III - Caso II - F-X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	38.544,53	14,241
B	220.685,02	81,536
C	11.432,48	4,224

Tabela 8:55 - Distribuição da força horizontal - Modelo III - Caso II : Fase Pós Pico - F-X

8.10.2 Modelo III - Caso II - F-X - Gráficos

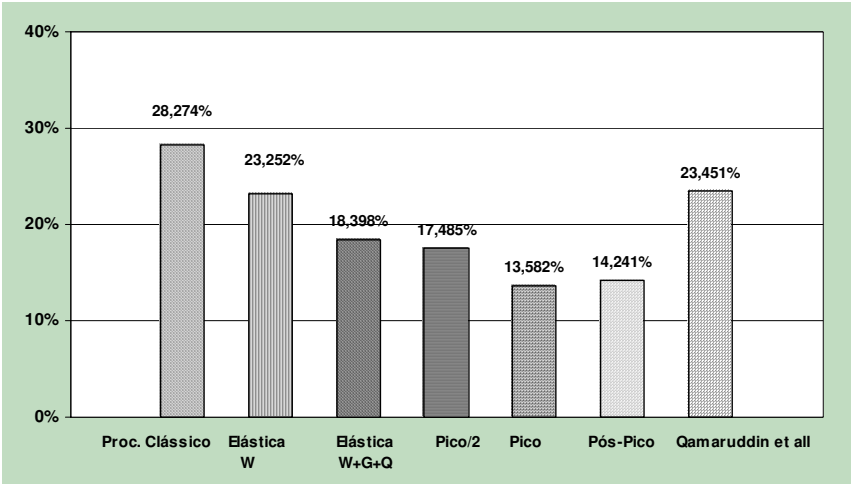


Gráfico 8:4 - Distribuição da força horizontal: Modelo III - Caso II: F-X: Membro A

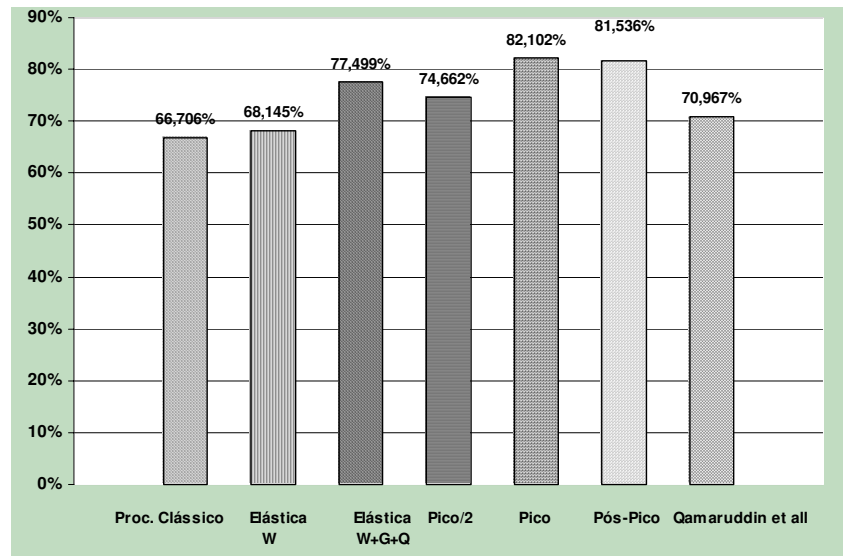


Gráfico 8:5 - Distribuição da força horizontal: Modelo III - Caso II: F-X: Membro B

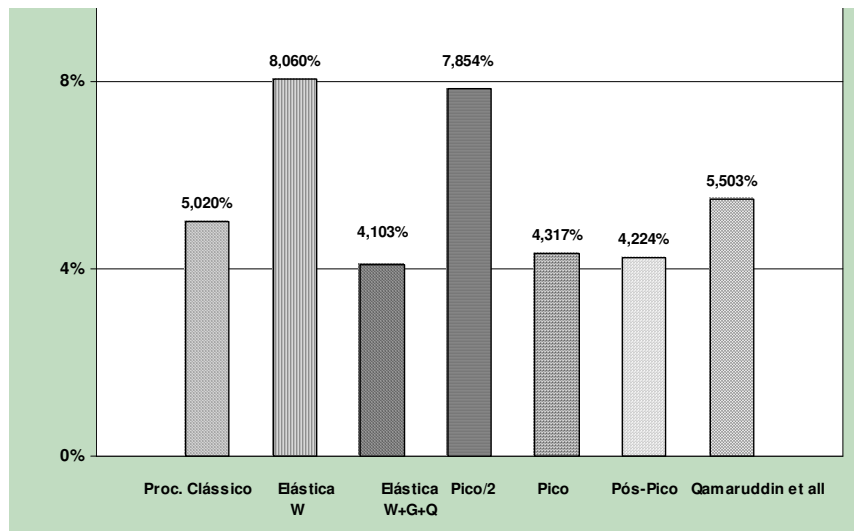


Gráfico 8:6 - Distribuição da força horizontal: Modelo III - Caso II: F-X: Membro C

8.11 Modelo III-A - Caso II - F+X

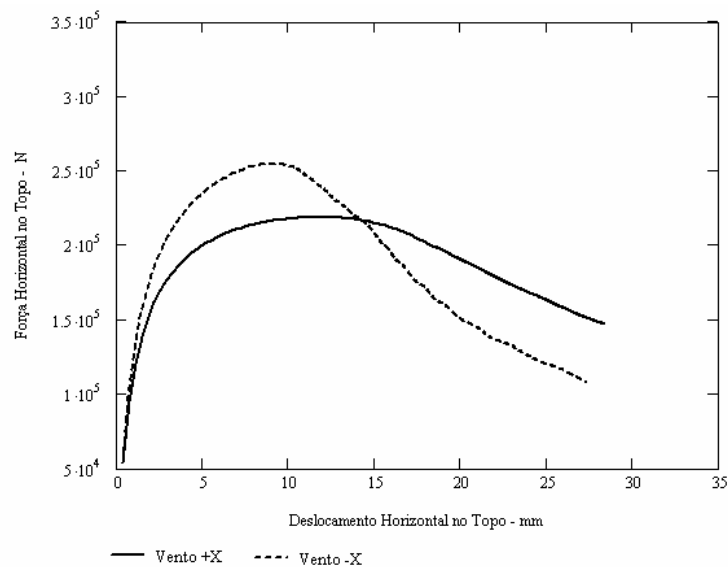


Figura 8:32 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo III-A: Caso II - F+X

Os deslocamentos horizontais máximos obtidos foram de 11,615 mm e 9,32 mm, correspondentes, respectivamente, aos valores máximos das forças horizontal agindo segundo as direções +X e -X. As forças máximas alcançadas para estas duas situações, 219,10 kN e 254,80 kN, o que conduziu a fatores de carga de 3,94 e 4,58 respectivamente.

8.11.1 Distribuição da Força Horizontal

8.11.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	1.000	1,200	108.333,33	28,274	15.727,13
B	1.200	1.800	0,667	255.582,52	66,706	37.104,54
C	2.200	800	2,750	19.234,24	5,020	2.792,33

Tabela 8:56 - Distribuição de força cortante - Modelo III-A - Caso II : Fase Elástica - F+X - Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	15.727,13	13.108,57	19,976	23,566
B	37.104,54	37.643,41	-1,432	67,675
C	2.792,33	4.872,02	-42,686	8,759

Tabela 8:57 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo III-A - Caso II : Fase Elástica - F+X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	15.727,13	13.387,98	17,472	24,069
B	37.104,54	35.136,58	5,600	63,168
C	2.792,33	7.099,44	-60,668	12,763

Tabela 8:58 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo III-A - Caso II: Fase Elástica - F+X+G+Q

8.11.1.2 Fase de Pico

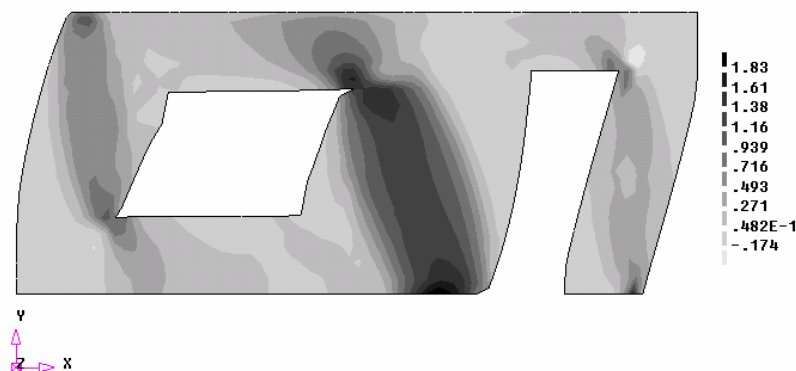
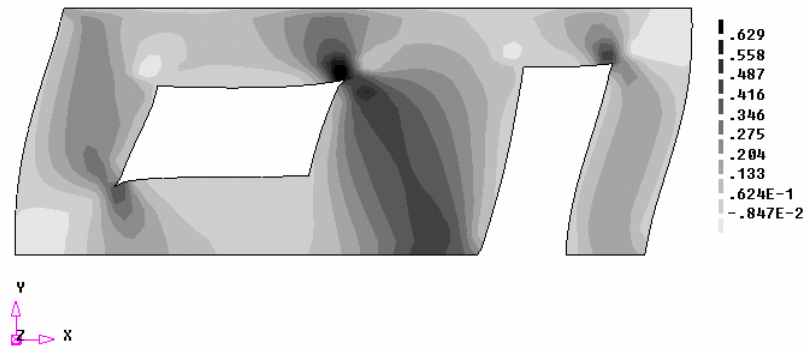


Figura 8:33 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo III-A - Caso II - F+X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	44.103,56	20,129
B	151.448,71	69,273
C	23.216,54	10,596

Tabela 8:59 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-A - Caso II - Fase de Pico - F+X

8.11.1.3 Fase de $F_{max}/2$

Figura 8:34 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo III-A - Caso II - F+X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	24.973,76	22,796
B	70.659,50	64,498
C	13.919,62	12,706

Tabela 8:60 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-A - Caso II : Fase de $F_{max}/2$ - F+X

8.11.1.4 Fase de Pós Pico

Figura 8:35 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo III-A - Caso II - F+X N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	44.712,51	20,854
B	146.972,64	68,550
C	22.719,35	10,596

Tabela 8:61 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-A - Caso II : Fase Pós Pico - F+X

8.11.2 Modelo III - Caso II - F+X - Gráficos

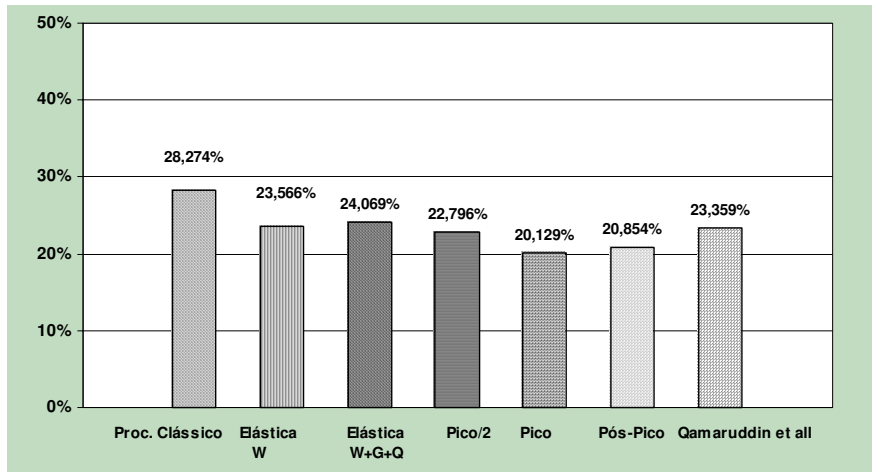


Gráfico 8:7 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso II: F+X: Membro A

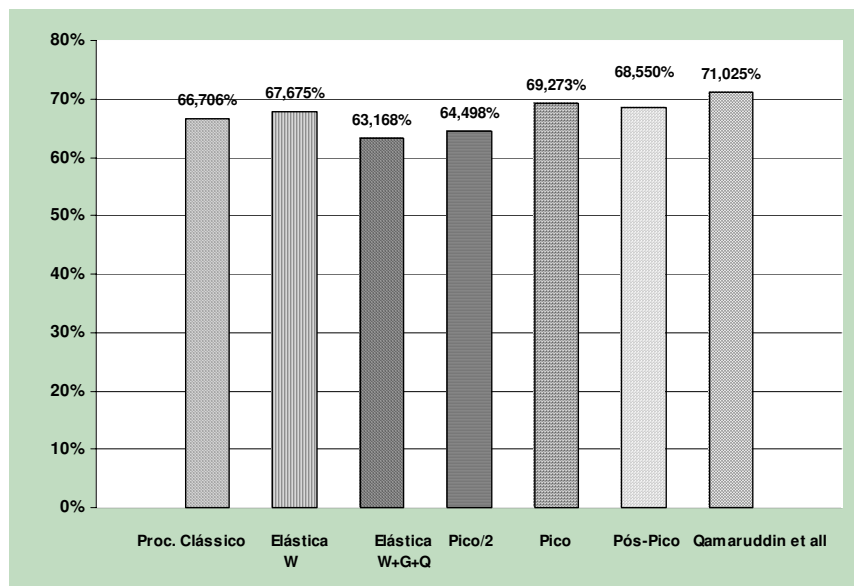


Gráfico 8:8 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso II: F+X: Membro B

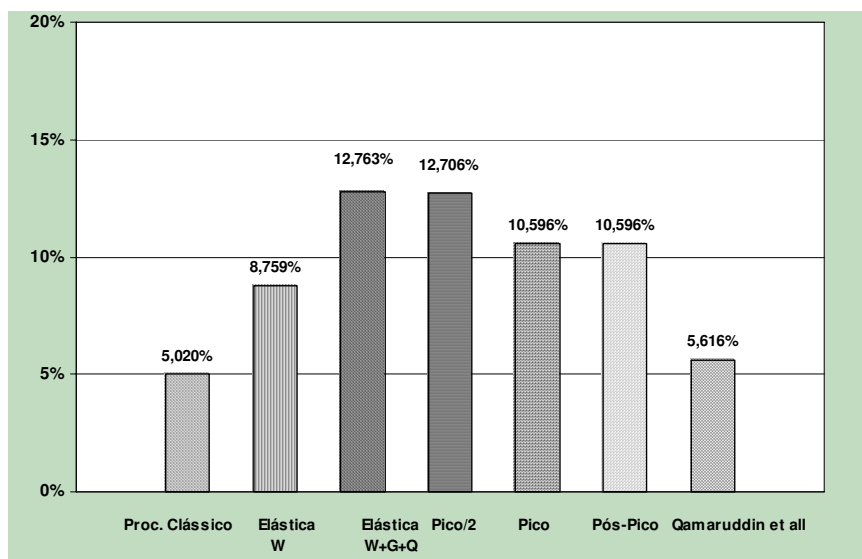


Gráfico 8:9 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso II: F+X: Membro C

8.12 Modelo III-A - Caso II - F-X

8.12.1 Distribuição da Força Horizontal

8.12.1.1 Fase Elástica

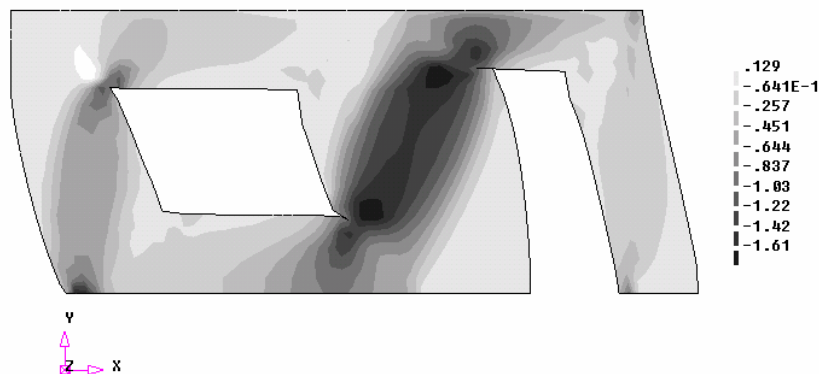
Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	15.727,13	13.108,57	19,976	23,566
B	37.104,54	37.643,40	-1,431	67,675
C	2.792,33	4.872,02	-42,686	8,759

Tabela 8:62 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo III-A - Caso II : Fase Elástica - F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	15.727,13	13.139,35	19,695	23,622
B	37.104,54	39.966,21	-7,160	71,851
C	2.792,33	2.518,43	10,876	4,528

Tabela 8:63 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo III-A - Caso II: Fase Elástica - F-X₊G+Q

8.12.1.2 Fase de Pico

Figura 8:36 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo III-A - Caso II - F-X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	44.969,23	17,651
B	196.343,48	77,067
C	13.468,97	5,287

Tabela 8:64 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-A - Caso II - Fase de Pico - F-X

8.12.1.3 Fase de $F_{max}/2$

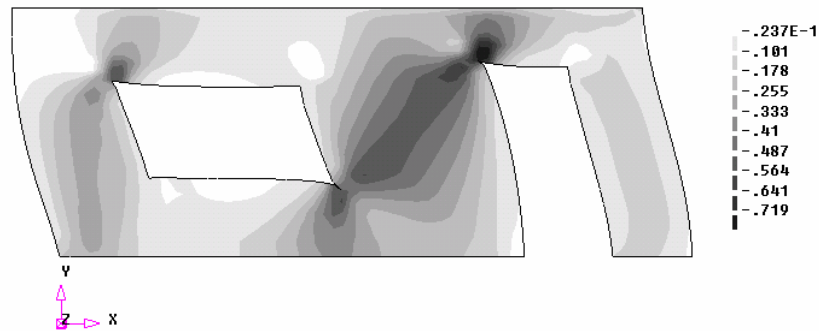


Figura 8:37 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo III-A - Caso II - F-X - N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	26.390,30	20,708
B	90.609,38	71,101
C	10.438,07	8,191

Tabela 8:65 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-A - Caso II : Fase de $F_{max}/2$ - F-X

8.12.1.4 Fase de Pós Pico

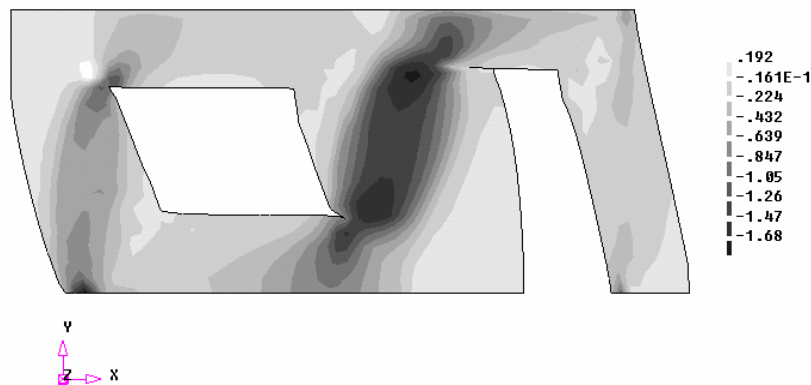


Figura 8:38 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo III-A - Caso II - F-X N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	47.707,51	20,917
B	166.723,14	73,098
C	13.651,62	5,985

Tabela 8:66 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-A - Caso II : Fase Pós Pico - F-X

8.12.2 Modelo III-A - Caso II - F-X - Gráficos

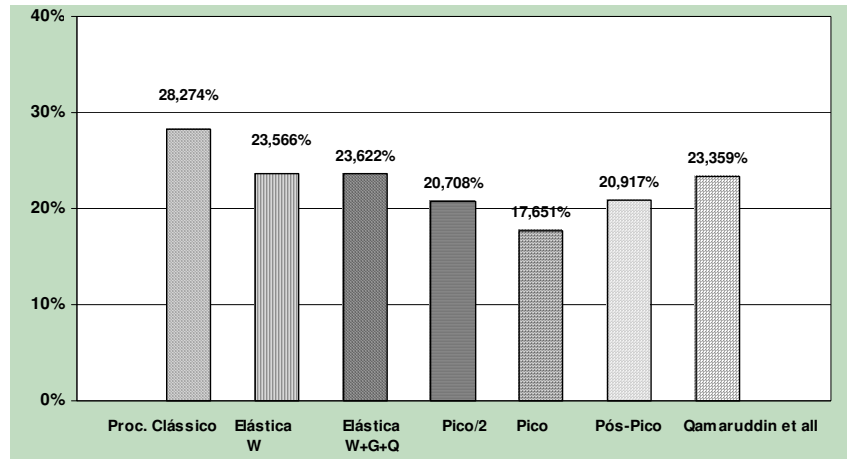


Gráfico 8:10 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso II: F-X: Membro A

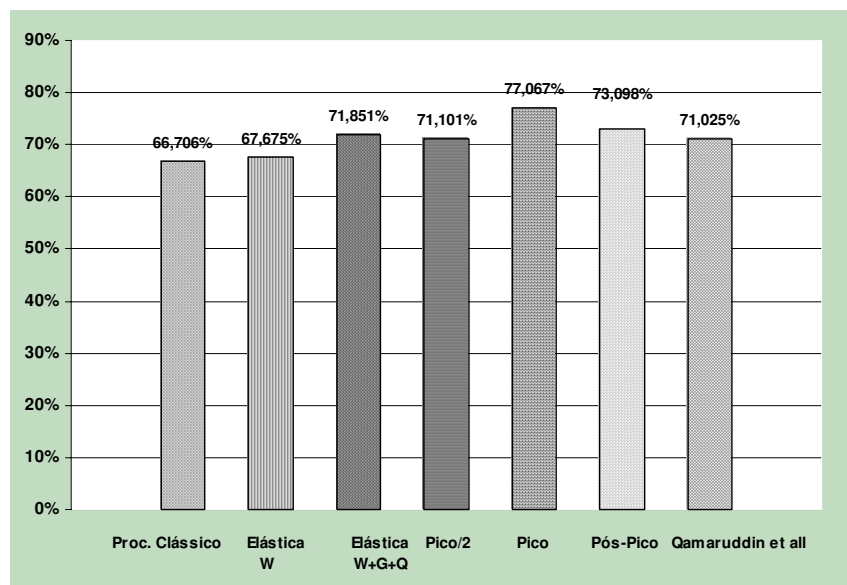


Gráfico 8:11 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso II: F-X: Membro B

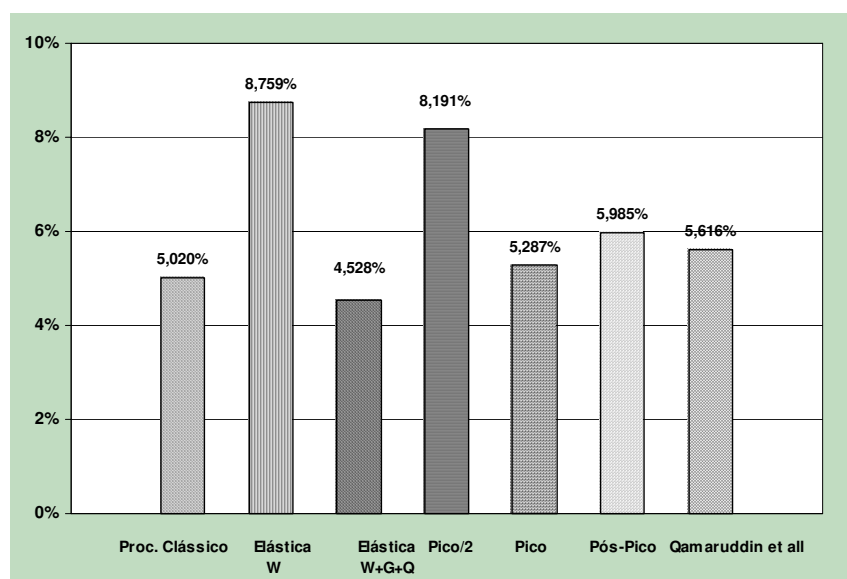


Gráfico 8:12 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso II: F-X: Membro C

8.13 Modelo III-B - Caso II - F+X

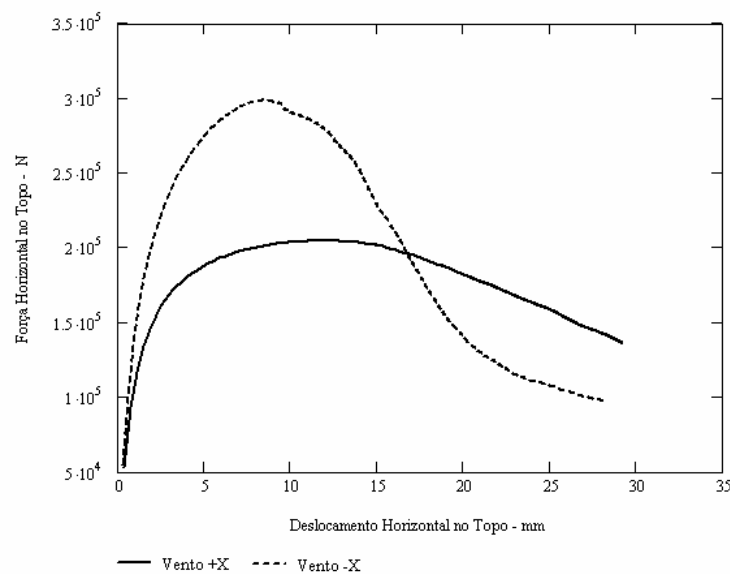


Figura 8:39 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo III-B: Caso II - F+X

Os deslocamentos horizontais máximos obtidos foram de 12,044 mm e 8,608 mm, correspondentes, respectivamente, aos valores máximos das forças horizontal agindo segundo as direções +X e -X. As forças máximas alcançadas para estas duas situações, 204,60 kN e 298,90 kN, o que conduziu a fatores de carga de 3,68 e 5,37 respectivamente.

8.13.1 Distribuição da Força Horizontal

8.13.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	1.000	1,200	108.333,33	24,190	13.455,45
B	1.000	1.800	0,556	320.271,97	71,515	39.779,50
C	2.200	800	2,750	19.234,24	4,295	2.389,05

Tabela 8:67 - Distribuição de força cortante - Modelo III-B - Caso II : Fase Elástica - F+X - Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	13.455,45	13.478,61	-0,172	24,232
B	39.779,50	37.660,34	5,680	67,705
C	2.389,05	4.485,05	-46,733	8,063

Tabela 8:68 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo III-B - Caso II : Fase Elástica - F+X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	13.455,45	18.878	-28,724	33,939
B	39.779,50	29.653	34,150	53,310
C	2.389,05	7.093	-66,318	12,752

Tabela 8:69 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo III-B - Caso II: Fase Elástica - F+X₋+G+Q

8.13.1.2 Fase de Pico



Figura 8:40 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo III-B - Caso II - F+X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	61.432,78	30,028
B	119.838,53	58,576
C	23.316,73	11,397

Tabela 8:70 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-B - Caso II - Fase de Pico - F+X

8.13.1.3 Fase de Fmax/2

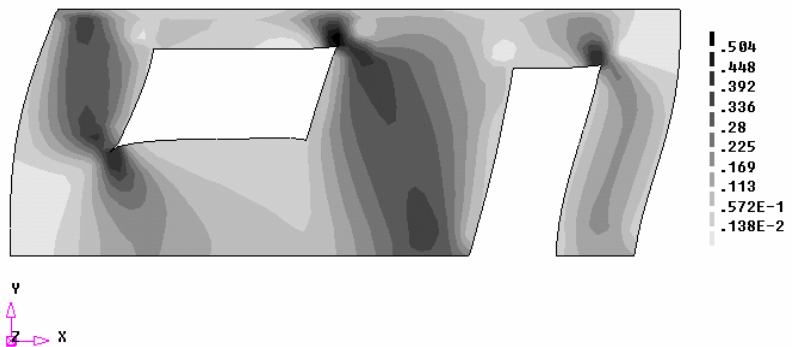


Figura 8:41 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 - Modelo III-B - Caso II - F+X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	31.449,78	30,757
B	57.534,93	56,268
C	13.266,36	12,974

Tabela 8:71 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-B - Caso II : Fase de Fmax/2 - F+X

8.13.1.4 Fase de Pós Pico



Figura 8:42 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo III-B - Caso II - F+X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	58.610,64	30,261
B	111.827,11	57,737
C	23.250,63	12,004

Tabela 8:72 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-B - Caso II : Fase Pós Pico - F+X

8.13.2 Modelo III-B - Caso II - F+X - Gráficos

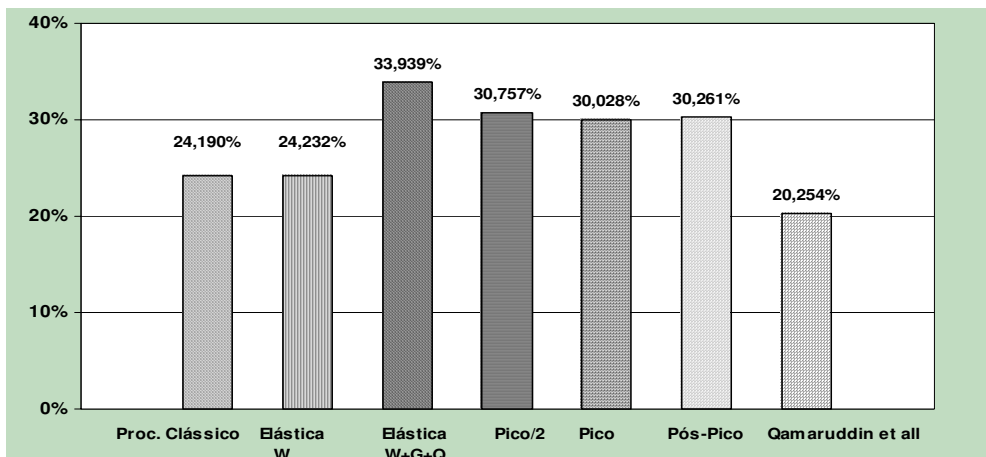


Gráfico 8:13 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso II: F+X: Membro A

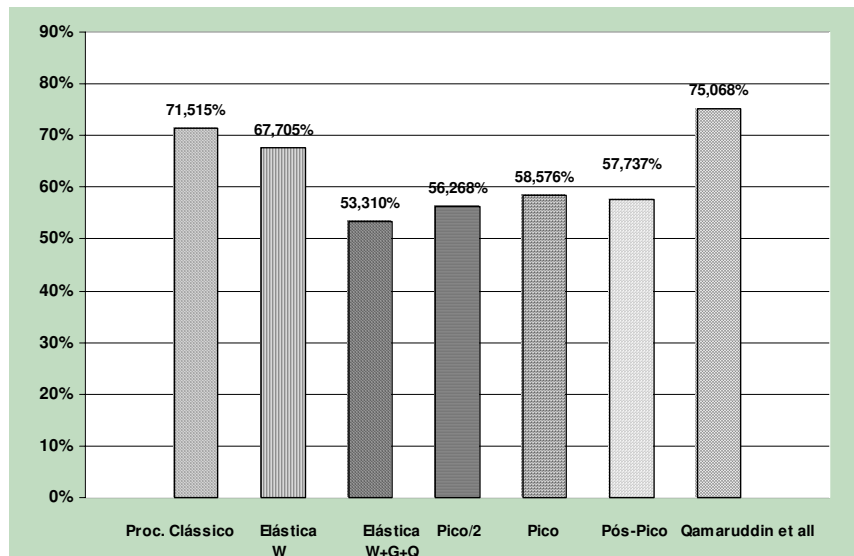


Gráfico 8:14 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso II: F+X: Membro B

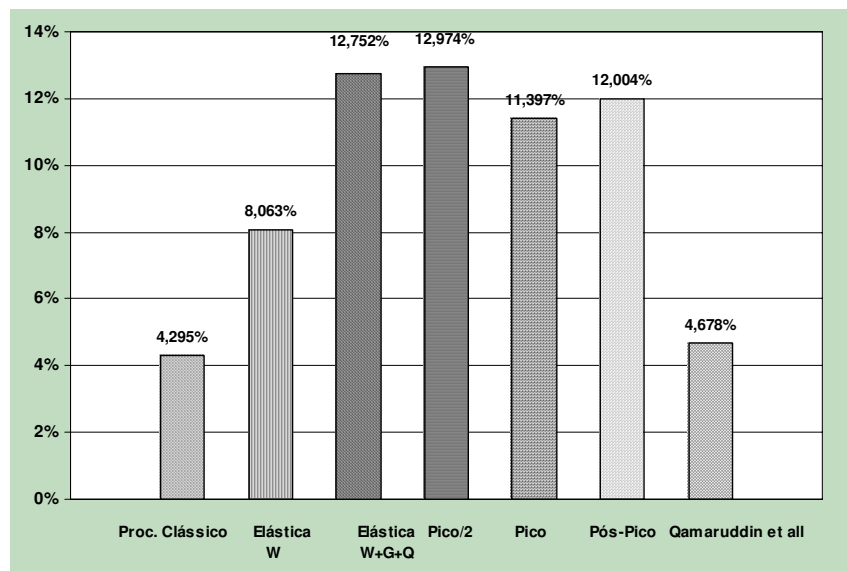


Gráfico 8:15 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso II: F+X: Membro C

8.14 Modelo III-B - Caso II - F-X

8.14.1 Distribuição da Força Horizontal

8.14.1.1 Fase Elástica

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	13.455,45	12.905,98	4,257	23,202
B	39.779,50	38.117,77	4,359	68,528
C	2.389,05	4.600,25	-48,067	8,270

Tabela 8:73 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo III-B - Caso II : Fase Elástica - F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	13.455,45	7.506,59	79,249	13,495
B	39.779,50	46.125,11	-13,757	82,923
C	2.389,05	1.992,30	19,914	3,582

Tabela 8:74 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-B – Caso II: Fase Elástica – F-X₋G+Q

8.14.1.2 Fase de Pico

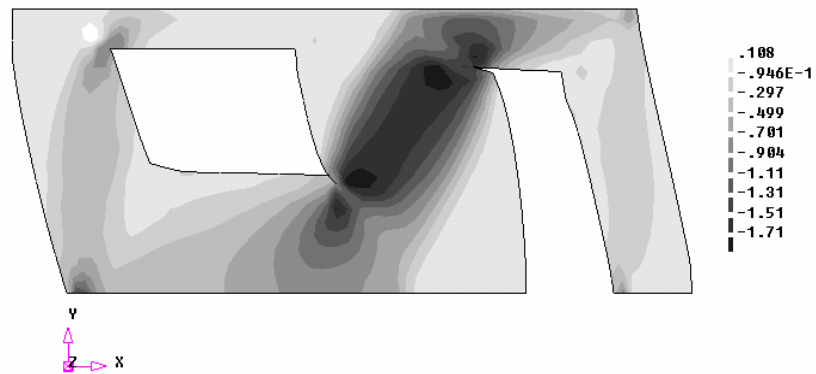


Figura 8:43 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III-B – Caso II – F-X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	31.767,06	10,628
B	255.132,34	85,359
C	11.992,17	4,012

Tabela 8:75 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B – Caso II - Fase de Pico – F-X

8.14.1.3 Fase de Fmax/2

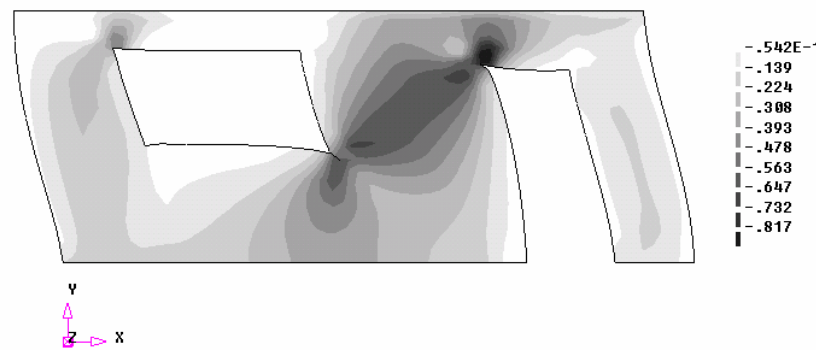


Figura 8:44 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 – Modelo III-B – Caso II – F-X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	22.410,72	14,997
B	116.061,13	77,667
C	10.963,01	7,336

Tabela 8:76 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B – Caso II : Fase de Fmax/2 – F-X

8.14.1.4 Fase de Pós Pico

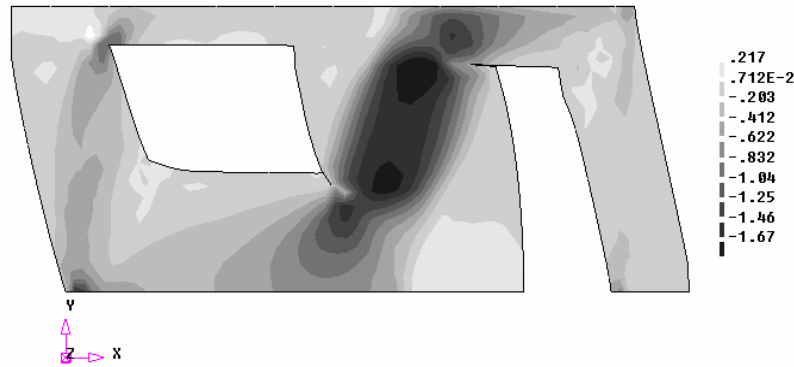


Figura 8:45 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo III-B - Caso II - F-X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	33.229,95	12,513
B	220.895,78	83,181
C	11.434,79	4,306

Tabela 8:77 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-B - Caso II : Fase Pós Pico - F-X

8.14.2 Modelo III-B - Caso II - F-X - Gráficos

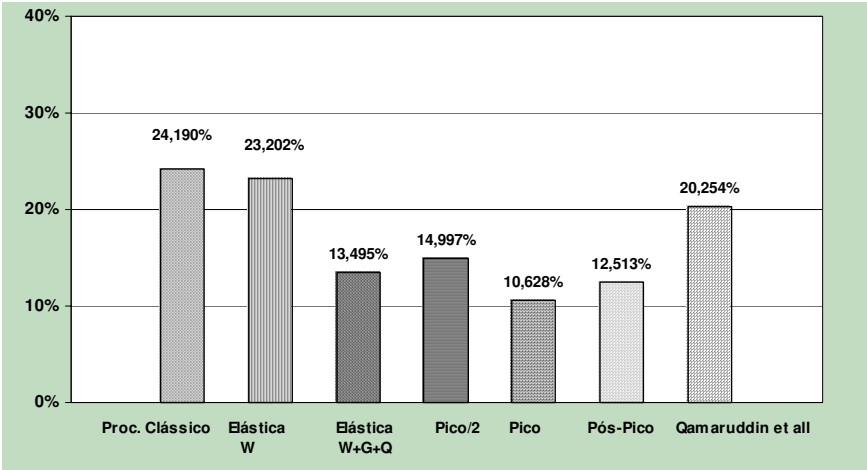


Gráfico 8:16 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso II: F-X: Membro A

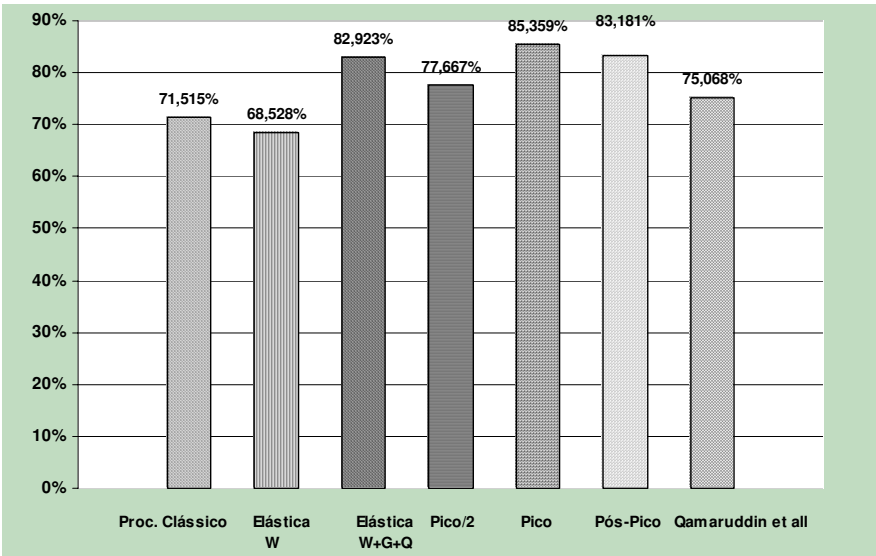


Gráfico 8:17 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso II: F-X: Membro B

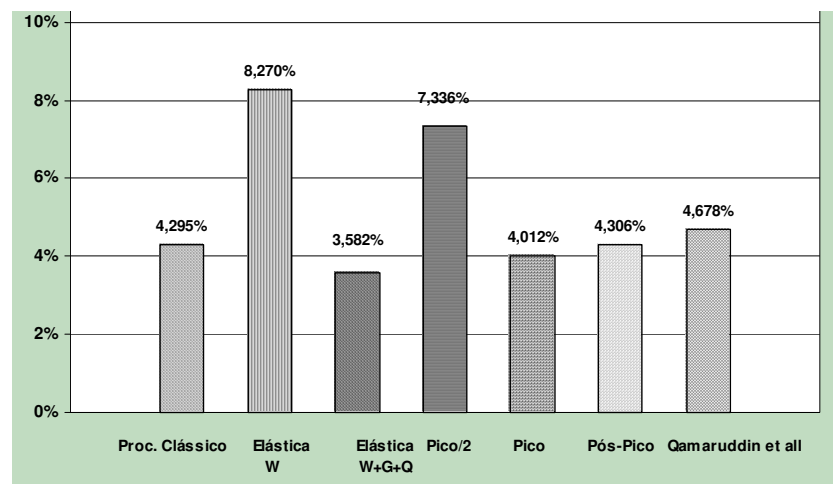


Gráfico 8:18 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso II: F-X: Membro C

8.15 Modelo IV – Caso II – F+X

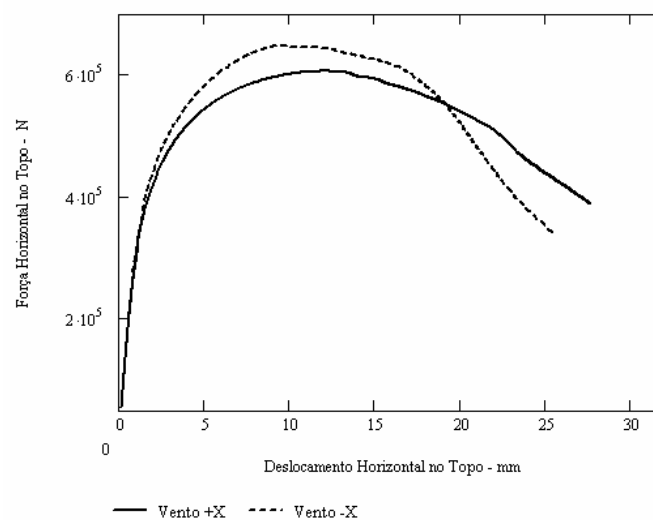


Figura 8:46 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo IV: Caso II – F+X

Os deslocamentos horizontais máximos obtidos foram de 12,319 mm e 9,549 mm, correspondentes, respectivamente, aos valores máximos das forças horizontal agindo segundo as direções +X e -X. As forças máximas alcançadas para estas duas situações, 606,10 kN e 648,40 kN, o que conduziu a fatores de carga de 10,90 e 11,66 respectivamente.

8.15.1 Distribuição da Força Horizontal

8.15.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	2.000	0,600	291.666,67	30,781	17.121,62
B	1.200	3.600	0,333	570.510,83	60,208	33.490,10
C	2.200	1.600	1,375	85.384,41	9,011	5.012,28

Tabela 8:78 - Distribuição de força cortante – Modelo IV – Caso II : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	17.121,62	15.850,16	8,022	28,495
B	33.490,10	32.418,31	3,306	58,281
C	5.012,28	7.355,53	-31,857	13,224

Tabela 8:79 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo IV – Caso II : Fase Elástica – F+X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	17.121,62	14.794,56	15,729	26,597
B	33.490,10	29.747,48	12,581	53,479
C	5.012,28	11.081,95	-54,771	19,923

Tabela 8:80 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo IV – Caso II: Fase Elástica – F+X+G+Q

8.15.1.2 Fase de Pico

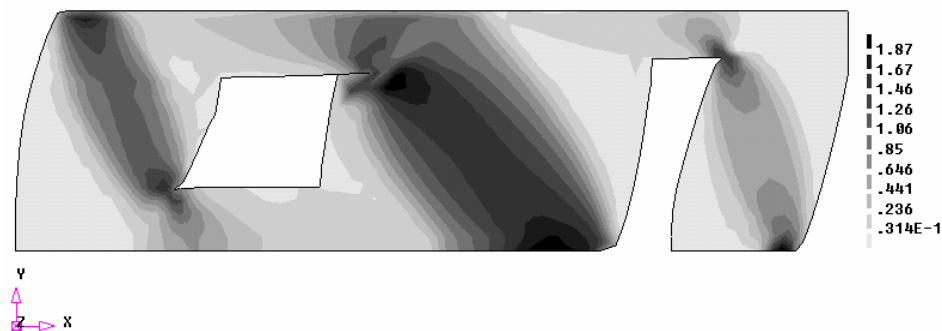


Figura 8:47 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo IV – Caso II - F+X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	131.742,62	21,738
B	403.516,41	66,581
C	70.803,33	11,683

Tabela 8:81 - Distribuição da força horizontal – Modelo IV – Caso II - Fase de Pico – F+X

8.15.1.3 Fase de $F_{max}/2$

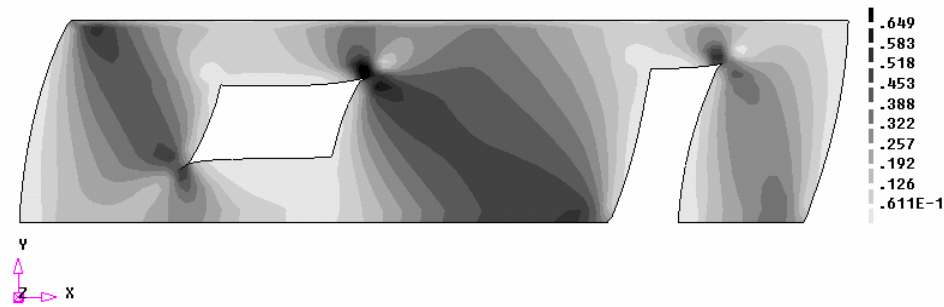


Figura 8:48 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo IV - Caso II - F+X - N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	78.551,61	25,878
B	177.818,42	58,580
C	47.177,93	15,542

Tabela 8:82 - Distribuição da força horizontal - Modelo IV - Caso II : Fase de $F_{max}/2$ - F+X

8.15.1.4 Fase de Pós Pico

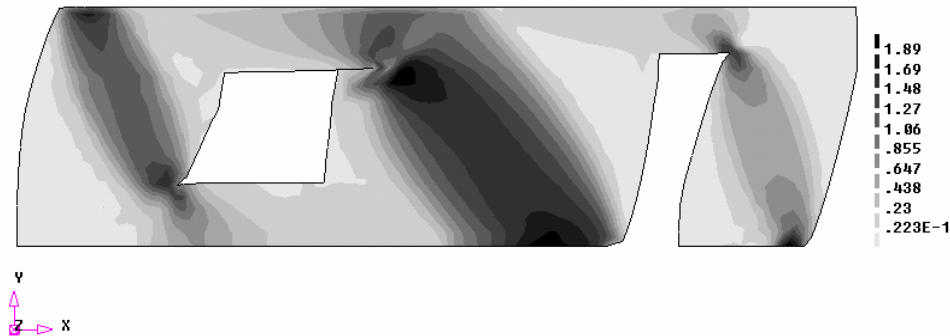


Figura 8:49 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo IV - Caso II - F+X N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	131.621,28	21,951
B	397.685,36	66,324
C	70.303,73	11,725

Tabela 8:83 - Distribuição da força horizontal - Modelo IV - Caso II : Fase Pós Pico - F+X

8.15.2 Modelo IV - Caso II - F+X - Gráficos

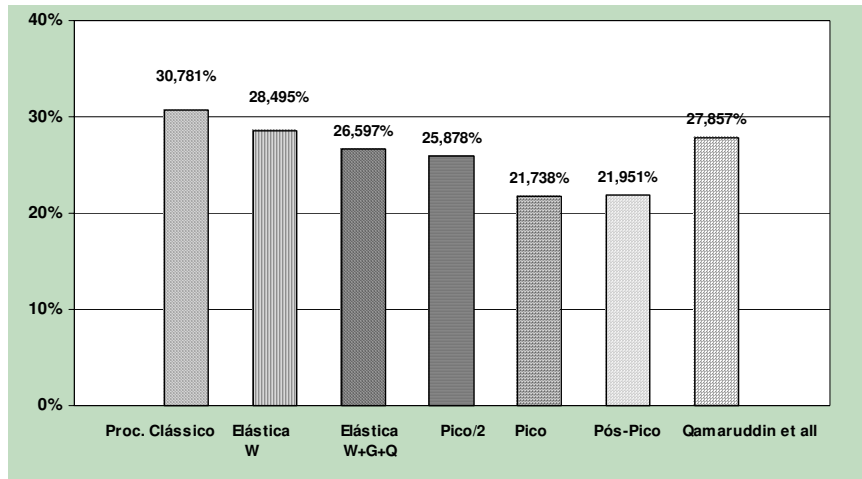


Gráfico 8:19 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV - Caso II: F+X: Membro A

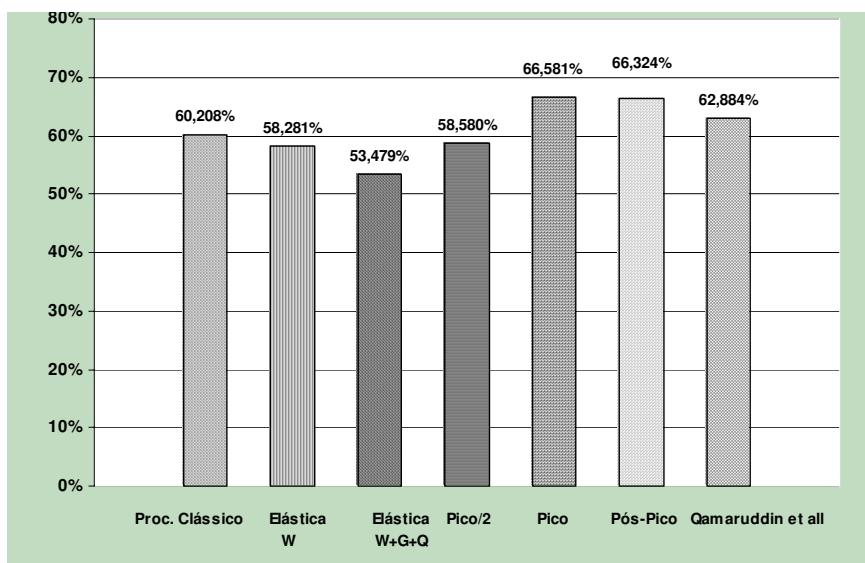


Gráfico 8:20 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV - Caso II: F+X: Membro B

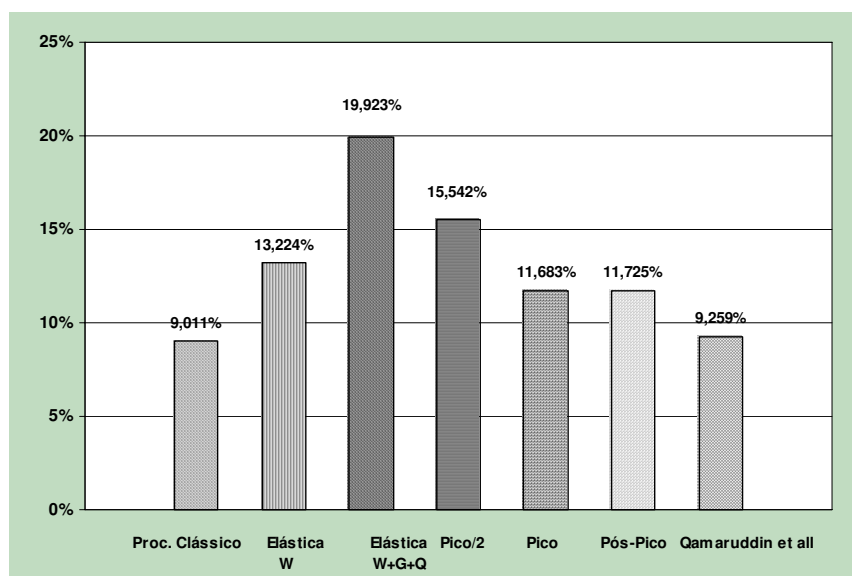


Gráfico 8:21 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV - Caso II: F+X: Membro C

8.16 Modelo IV- Caso II - F-X

8.16.1 Distribuição da Força Horizontal

8.16.1.1 Fase Elástica

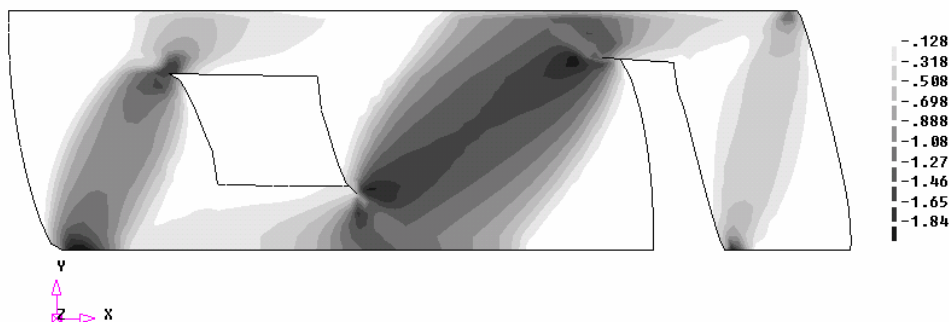
Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	17.121,62	13.719,76	24,795	24,665
B	33.490,10	33.244,69	0,738	59,767
C	5.012,28	8.659,55	-42,118	15,568

Tabela 8:84 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo IV - Caso II : Fase Elástica - F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	17.121,62	14.871,13	15,133	26,735
B	33.490,10	36.103,22	-7,238	64,906
C	5.012,28	4.649,65	7,799	8,359

Tabela 8:85 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo IV - Caso II: Fase Elástica - F-X+G+Q

8.16.1.2 Fase de Pico

Figura 8:50 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo IV - Caso II - F-X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	136.478,31	21,048
B	467.314,82	72,069
C	44.644,91	6,885

Tabela 8:86 - Distribuição da força horizontal - Modelo IV - Caso II - Fase de Pico - F-X

8.16.1.3 Fase de $F_{max}/2$

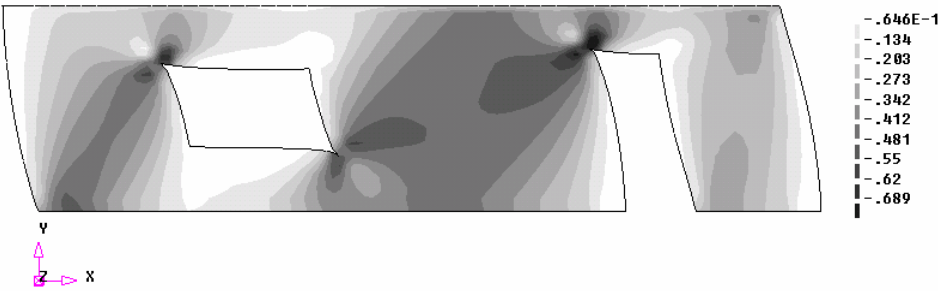


Figura 8:51 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo IV - Caso II - F-X - N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	78.133,54	24,097
B	204.693,67	63,130
C	41.412,33	12,772

Tabela 8:87 - Distribuição da força horizontal - Modelo IV - Caso II : Fase de $F_{max}/2$ - F-X

8.16.1.4 Fase de Pós Pico

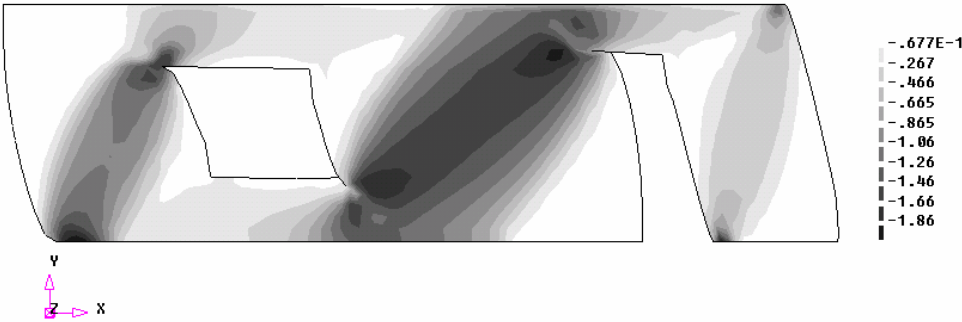


Figura 8:52 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo IV - Caso II - F-X N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	137.486,11	21,276
B	466.484,87	72,189
C	42.225,46	6,534

Tabela 8:88 - Distribuição da força horizontal - Modelo IV - Caso II : Fase Pós Pico - F-X

8.16.2 Modelo IV - Caso II - F-X - Gráficos

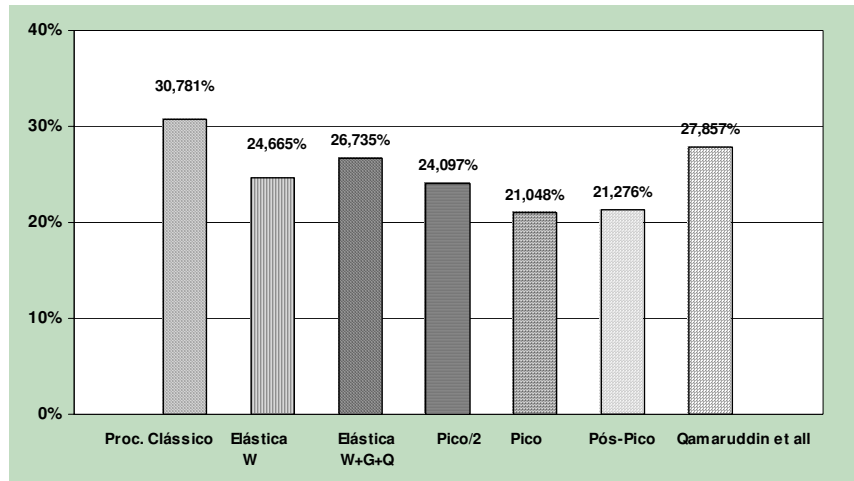


Gráfico 8:22 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV - Caso II: F-X: Membro A

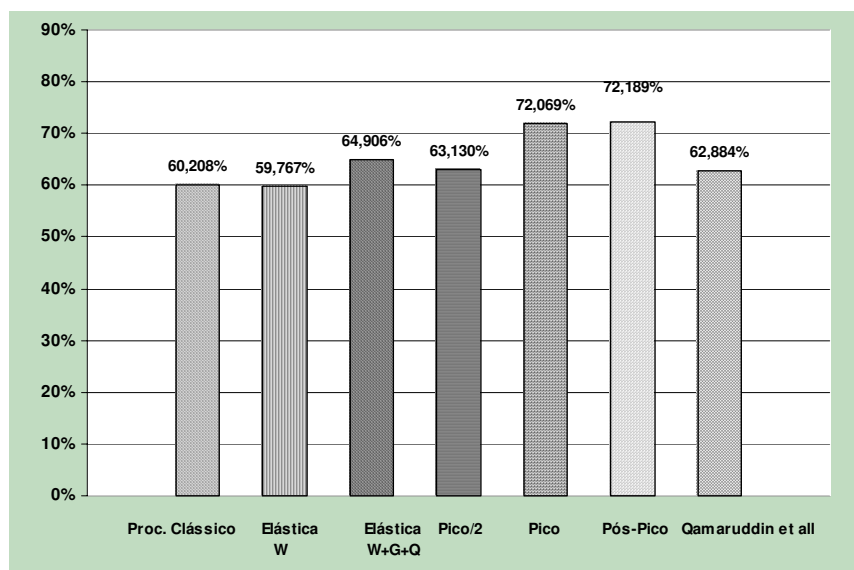


Gráfico 8:23 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV - Caso II: F-X: Membro B

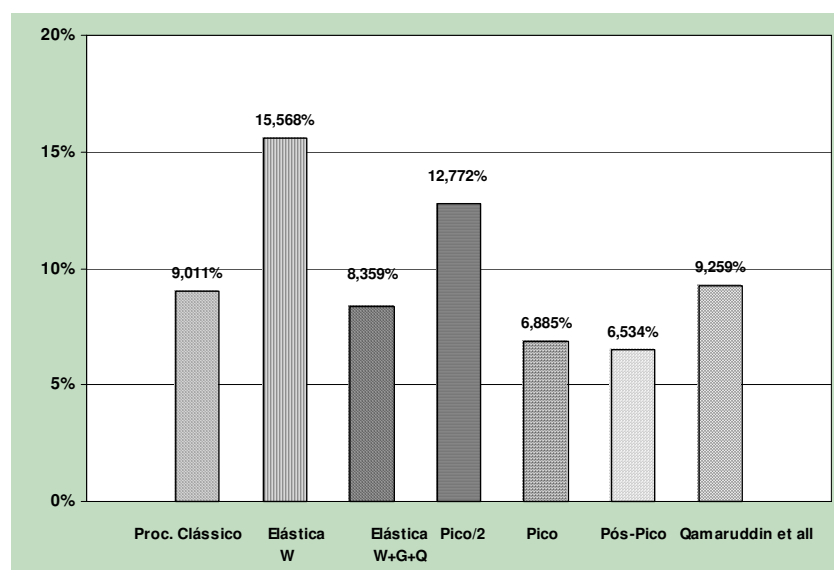


Gráfico 8:24 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV - Caso II: F-X: Membro C

8.17 Modelo V – Caso II – F+X e F-X

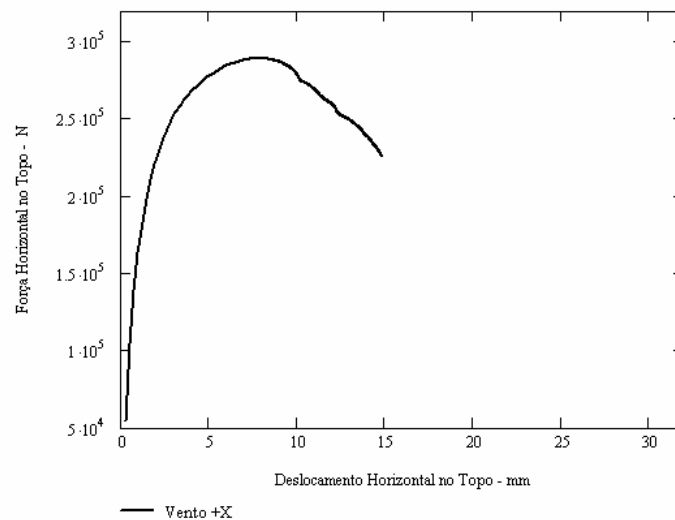


Figura 8:53 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo V: Caso II – F+X e F-X

O deslocamento horizontal máximo obtido foi de 7,9 mm, correspondente a uma força horizontal máxima de 289,20 kN, o que perfaz um fator de carga de 5,20.

8.17.1 Distribuição da Força Horizontal

8.17.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.100	1.400	1,273	205.755,91	33,333	18.541,33
B	1.100	1.400	1,273	205.755,91	33,333	18.541,33
C	1.100	1.400	1,273	205.755,91	33,333	18.541,33

Tabela 8:89 - Distribuição de força cortante-Modelo V- Caso II: Fase Elástica-F+X e F-X-Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	18.541,33	16.569,23	11,902	29,788
B	18.541,33	23.067,40	-19,621	41,470
C	18.541,33	15.987,37	15,975	28,742

Tabela 8:90 - Comparação de distribuição de força cortante-Modelo V-Caso II: Fase Elástica-F+X e F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	18.541,33	15.728,13	17,886	28,276
B	18.541,33	23.067,40	-19,621	41,470
C	18.541,33	16.828,47	10,178	30,254

Tabela 8:91 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo IV - Caso II: Fase Elástica - F+X_₋+G+Q e F-X_₋+G+Q

8.17.1.2 Fase de Pico

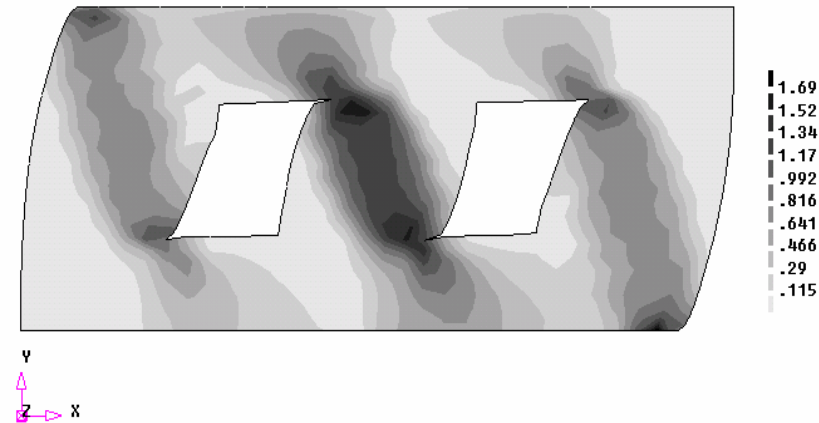


Figura 8:54 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico-Modelo V-Caso II-F+X e F-X- N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	73.201,13	25,315
B	141.177,51	48,824
C	74.780,16	25,861

Tabela 8:92 - Distribuição da força horizontal - Modelo V - Caso II - Fase de Pico - F+X e F-X

8.17.1.3 Fase de Fmax/2

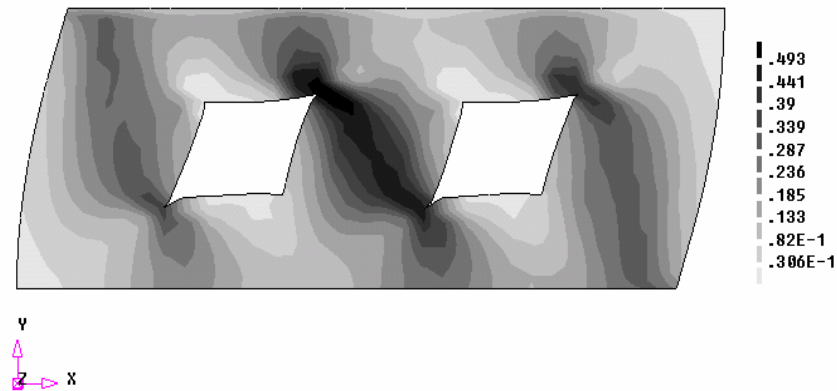


Figura 8:55 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2-Modelo V-Caso II- F+X e F-X- N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	40.064,02	27,701
B	63.660,09	44,016
C	40.905,85	28,283

Tabela 8:93 - Distribuição da força horizontal - Modelo V - Caso II : Fase de Fmax/2 - F+X e F-X

8.17.1.4 Fase de Pós Pico

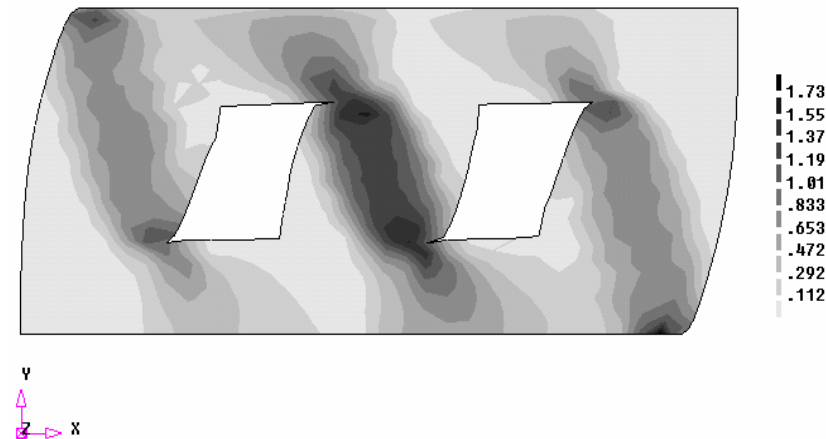


Figura 8:56 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico-Modelo V-Caso II-F+X e F-X- N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	73.635,38	25,527
B	139.406,79	48,376
C	75.131,01	26,072

Tabela 8:94 - Distribuição da força horizontal - Modelo V - Caso II : Fase Pós Pico - F+X e F-X

8.17.2 Modelo V - Caso II - F+X e F-X - Gráficos

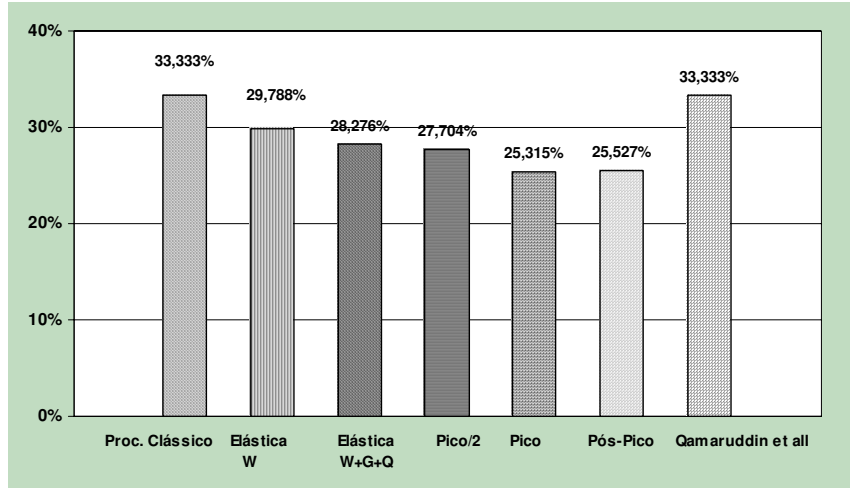


Gráfico 8:25 - Distribuição da força horizontal: Modelo V - Caso II: F+X e F-X: Membro A

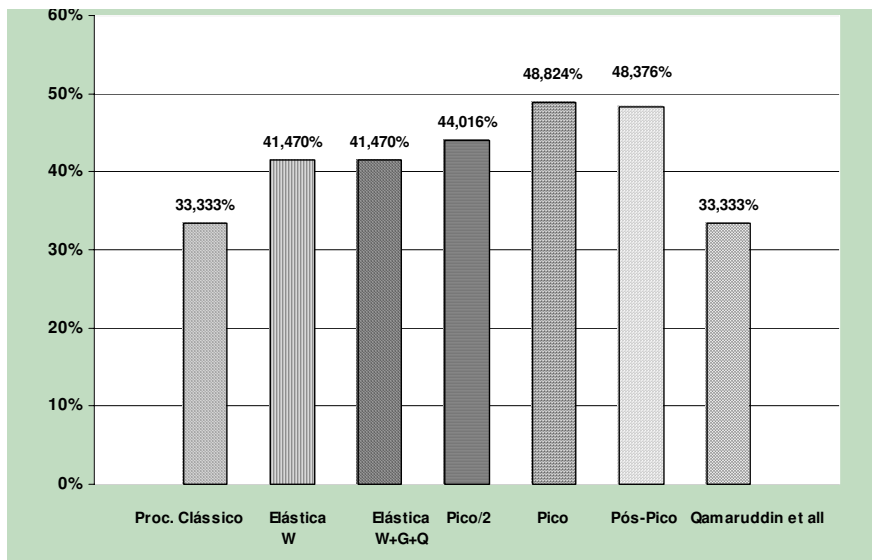


Gráfico 8:26 - Distribuição da força horizontal: Modelo V - Caso II: F+X e F-X: Membro B

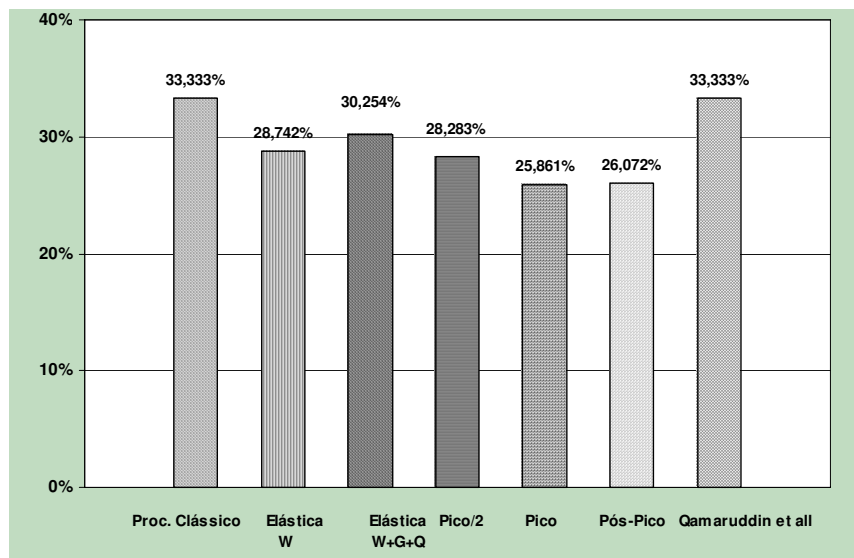


Gráfico 8:27 - Distribuição da força horizontal: Modelo V - Caso II: F+X e F-X: Membro C

8.18 Modelo VI - Caso II - F+X e F-X

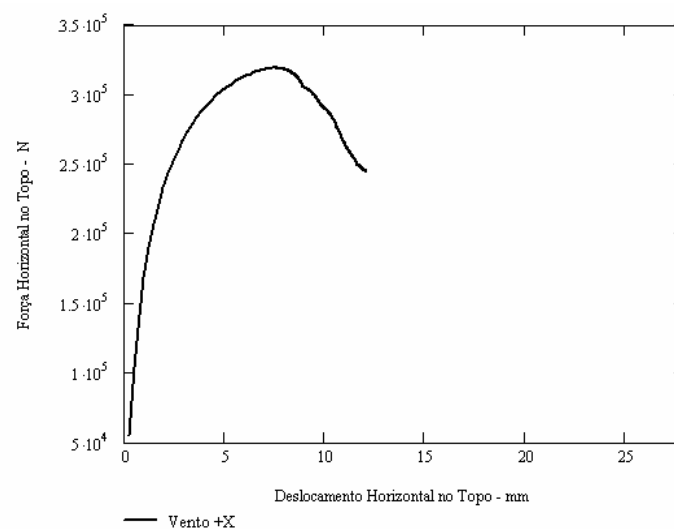


Figura 8:57 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo VI: Caso II - F+X e F-X

O deslocamento horizontal máximo obtido foi de 7,58 mm, correspondente a uma força horizontal máxima de 319,10 kN, o que perfaz um fator de carga de 5,74.

8.18.1 Distribuição da Força Horizontal

8.18.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.100	1.000	1,100	125.028,62	21,774	12.111,57
B	1.100	2.000	0,550	324.155,84	56,452	31.400,86
C	1.100	1.000	1,100	125.028,62	21,774	12.111,57

Tabela 8:95 - Distribuição de força cortante-Modelo VI- Caso II: Fase Elástica-F+X e F-X-Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	12.111,57	9.674,60	25,189	17,393
B	31.400,86	36.599,46	-14,204	65,798
C	12.111,57	9.349,94	29,536	16,809

Tabela 8:96 - Comparação de distribuição de força cortante-Modelo VI-Caso II: Fase Elástica-F+X e F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	12.111,57	9.148,45	32,389	16,447
B	31.400,86	36.599,46	-14,204	65,798
C	12.111,57	9.876,09	22,635	17,755

Tabela 8:97 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo VI - Caso II: Fase Elástica - F+X_₊G+Q e F-X_₊G+Q

8.18.1.2 Fase de Pico

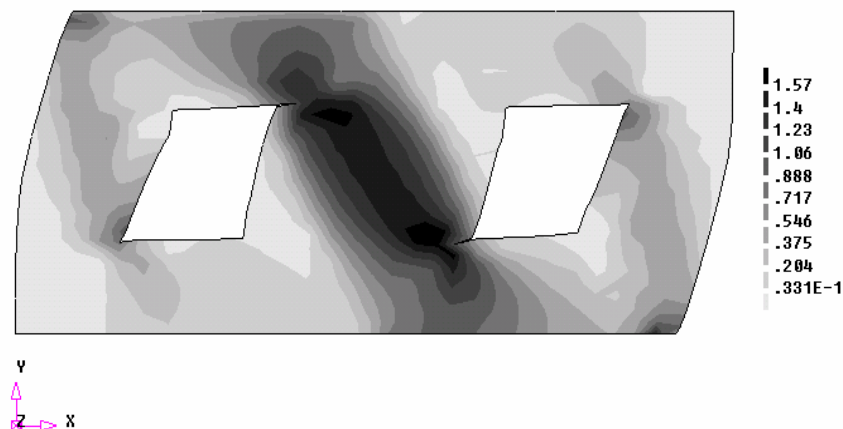


Figura 8:58 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico-Modelo VI-Caso II-F+X e F-X- N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	36.966,09	11,586
B	244.489,66	76,626
C	37.613,47	11,788

Tabela 8:98 - Distribuição da força horizontal - Modelo VI - Caso II - Fase de Pico - F+X e F-X

8.18.1.3 Fase de Fmax/2

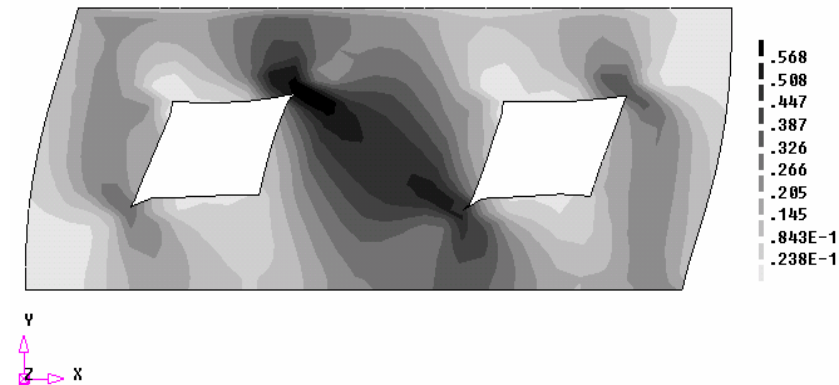


Figura 8:59 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2-Modelo VI-Caso II- F+X e F-X- N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	24.895,29	15,612
B	109.188,91	68,472
C	25.380,22	15,916

Tabela 8:99 - Distribuição da força horizontal - Modelo VI - Caso II : Fase de Fmax/2 - F+X e F-X

8.18.1.4 Fase de Pós Pico

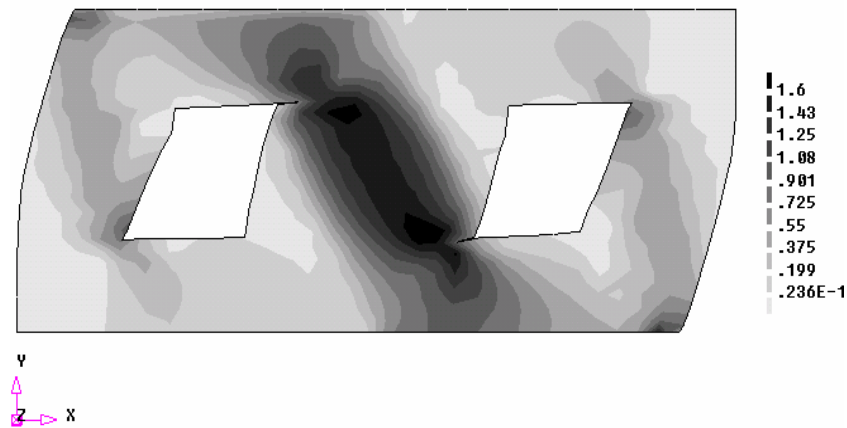


Figura 8:60 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico-Modelo V-Caso II-F+X e F-X- N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	37.054,21	11,761
B	240.335,54	76,284
C	37.664,98	11,955

Tabela 8:100 - Distribuição da força horizontal - Modelo V - Caso II : Fase Pós Pico - F+X e F-X

8.18.2 Modelo VI - Caso II - F+X e F-X - Gráficos

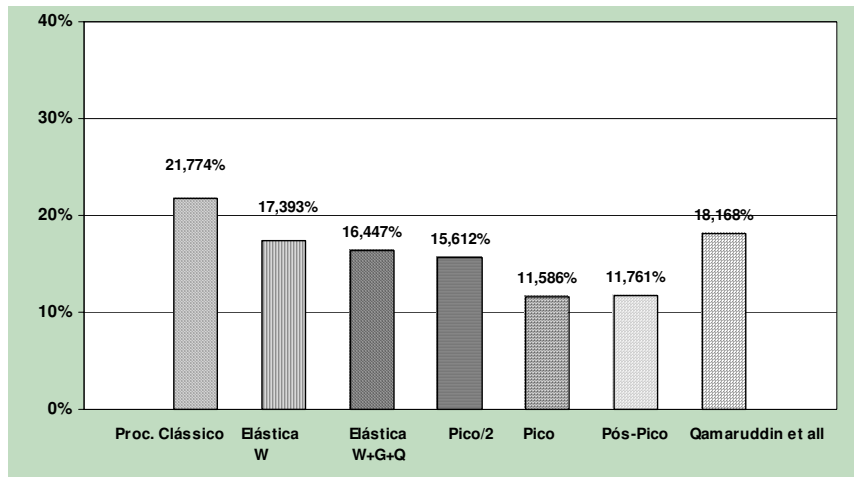


Gráfico 8:28 - Distribuição da força horizontal: Modelo VI - Caso II: F+X e F-X: Membro A

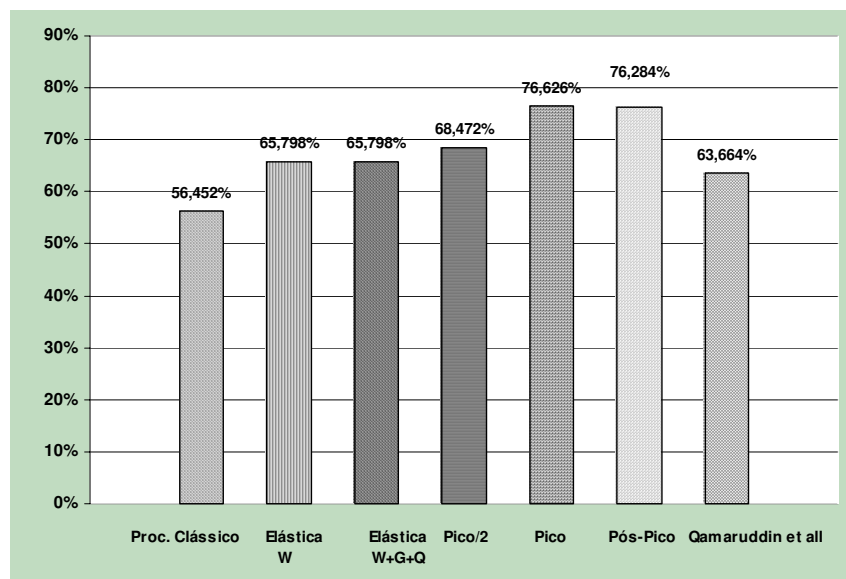


Gráfico 8:29 - Distribuição da força horizontal: Modelo VI - Caso II: F+X e F-X: Membro B

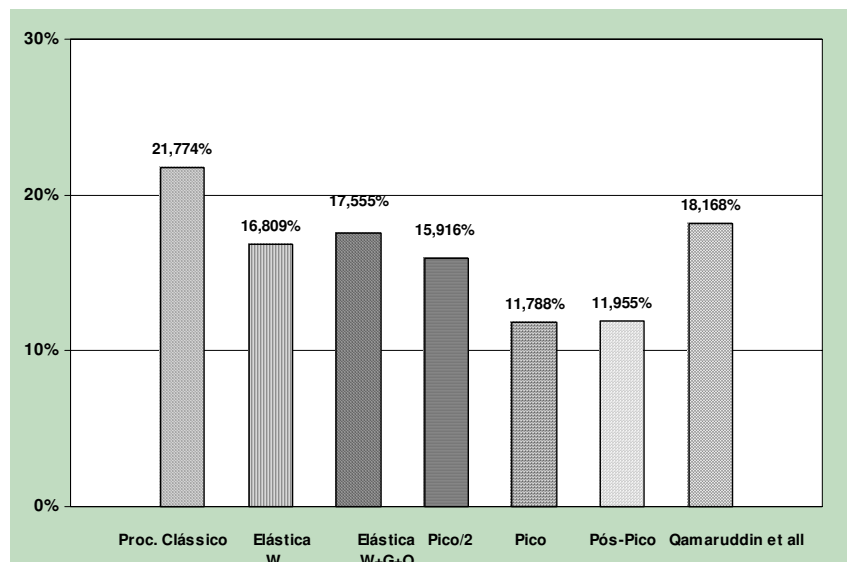


Gráfico 8:30 - Distribuição da força horizontal: Modelo VI - Caso II: F+X e F-X: Membro C

8.19 Modelo I - Caso III - F+X

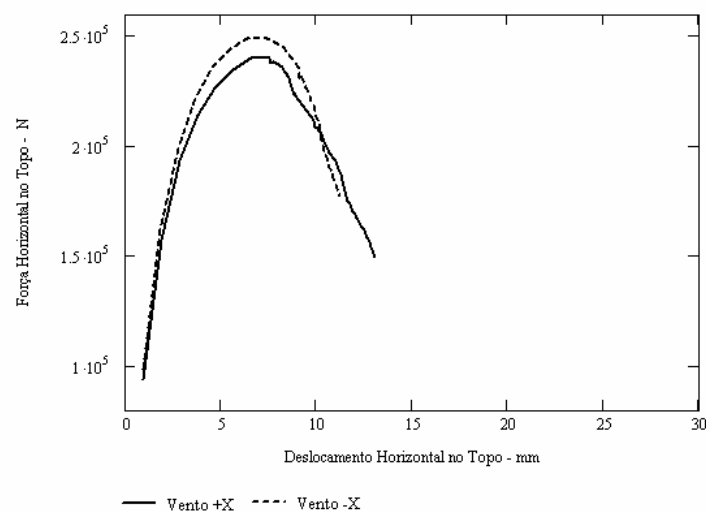


Figura 8:61 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo I: Caso III - F+X

Os deslocamentos horizontais máximos obtidos foram de 7,507 mm e 7,259 mm, correspondentes, respectivamente, aos valores máximos das forças horizontal agindo segundo as direções +X e -X. As forças máximas alcançadas para estas duas situações, 240,3 kN e 249,70 kN, o que conduziu a fatores de carga de 1,86 e 1,93, respectivamente.

8.19.1 Distribuição da Força Horizontal

8.19.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	1.000	1,200	108.333,33	37,041	47.948,09
B	1.200	1.000	1,200	108.333,33	37,041	47.948,09
C	2.200	1.500	1,467	75.802,14	25,918	33.549,82

Tabela 8:101 - Distribuição de força cortante - Modelo I - Caso III : Fase Elástica - F+X - Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	47.948,09	37.133,10	29,125	28,686
B	47.948,09	42.463,23	12,917	32,804
C	33.549,82	50.448,86	-33,497	38,973

Tabela 8:102 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I - Caso III : Fase Elástica - F+X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	47.948,09	40.969,70	17,033	31,650
B	47.948,09	28.840,94	66,250	22,280
C	33.549,82	60.103,78	-44,180	46,431

Tabela 8:103 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I - Caso III: Fase Elástica - F+X+G+Q

8.19.1.2 Fase de Pico

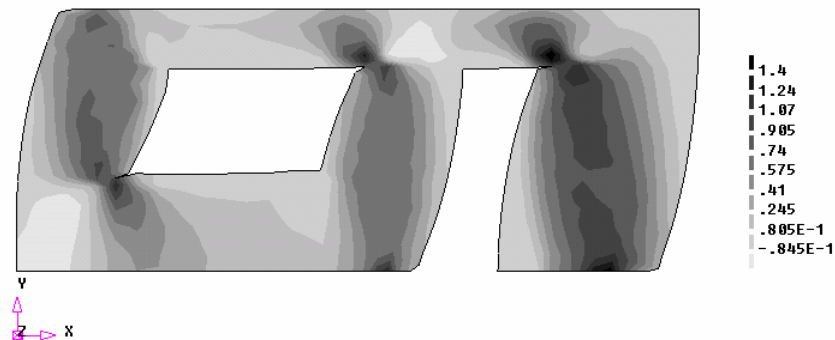


Figura 8:62 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo I - Caso III - F+X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	67.126,85	27,940
B	58.442,58	24,325
C	116.186,78	48,360

Tabela 8:104 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso III - Fase de Pico - F+X

8.19.1.3 Fase de $F_{max}/2$



Figura 8:63 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo I - Caso III - F+X - N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	36.951,79	30,745
B	24.290,59	20,211
C	59.316,40	49,353

Tabela 8:105 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso III : Fase de $F_{max}/2$ - F+X

8.19.1.4 Fase de Pós Pico



Figura 8:64 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo I - Caso III - F+X N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	62.102,06	26,696
B	58.781,02	25,268
C	113.351,36	48,726

Tabela 8:106 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso III : Fase Pós Pico - F+X

8.19.2 Modelo I - Caso III - F+X - Gráficos

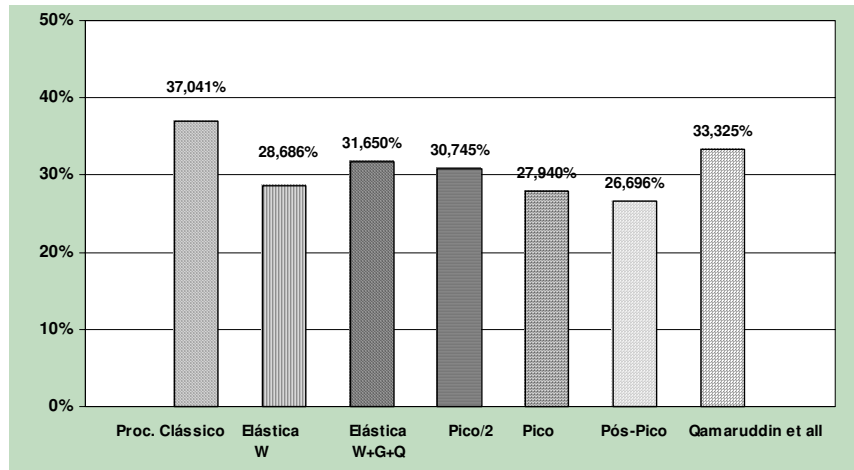


Gráfico 8:31 - Distribuição da força horizontal: Modelo I - Caso III: F+X: Membro A

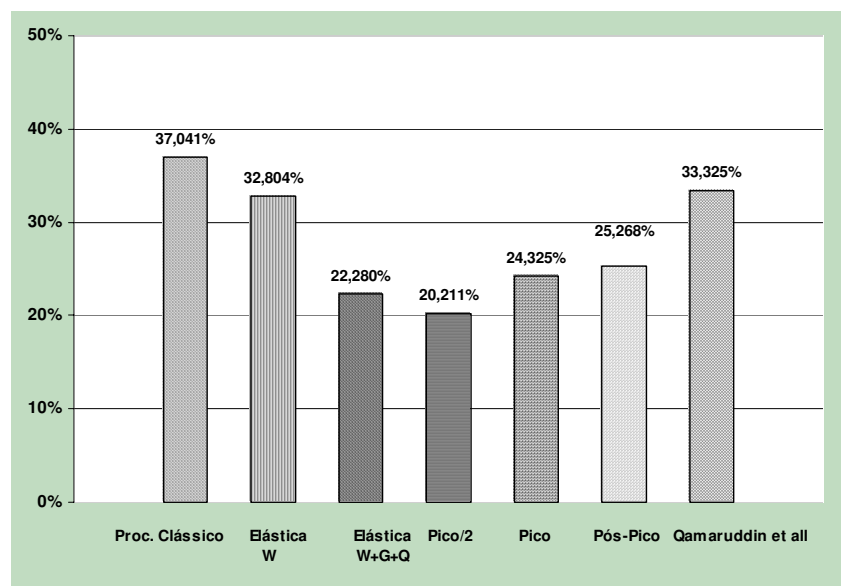


Gráfico 8:32 - Distribuição da força horizontal: Modelo I - Caso III: F+X: Membro B

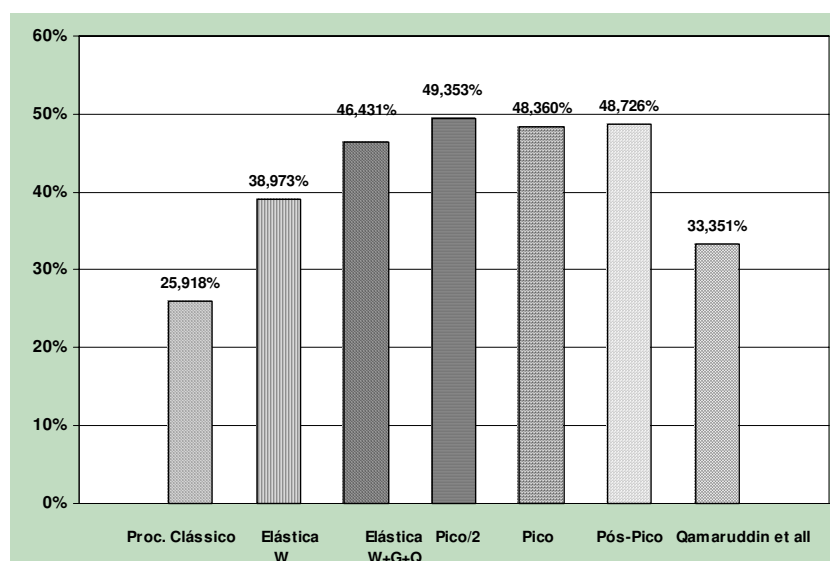


Gráfico 8:33 - Distribuição da força horizontal: Modelo I - Caso III: F+X: Membro C

8.20 Modelo I – Caso III – F-X

8.20.1 Distribuição da Força Horizontal

8.20.1.1 Fase Elástica

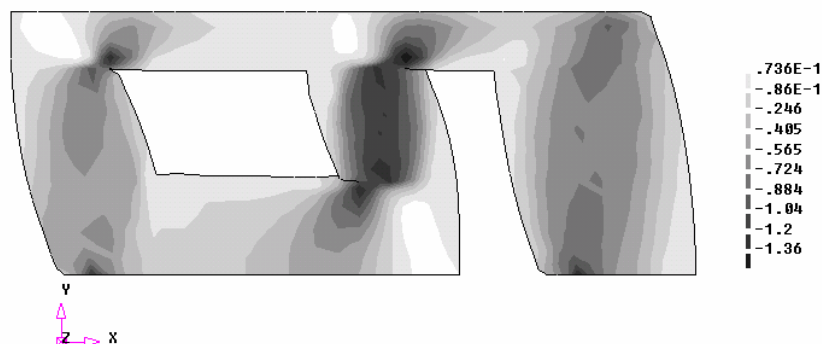
Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	47.948,09	36.055,36	32,985	27,854
B	47.948,09	42.467,00	12,907	32,807
C	33.549,82	51.514,13	-34,873	39,796

Tabela 8:107 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I – Caso III : Fase Elástica – F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	47.948,09	32.218,75	48,820	24,890
B	47.948,09	56.089,29	-14,515	43,330
C	33.549,82	41.859,20	-19,851	32,337

Tabela 8:108 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I – Caso III: Fase Elástica – F-X_{+G+Q}

8.20.1.2 Fase de Pico

Figura 8:65 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo I – Caso III – F-X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	59.243,75	23,726
B	98.444,80	39,425
C	94.057,43	37,668

Tabela 8:109 - Distribuição da força horizontal – Modelo I – Caso III - Fase de Pico – F-X

8.20.1.3 Fase de $F_{\max}/2$

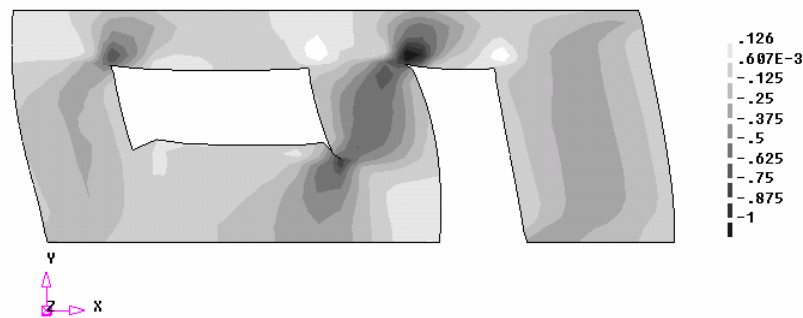


Figura 8:66 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{\max}/2$ - Modelo I - Caso III - F-X - N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	26.778,33	21,444
B	56.957,55	45,611
C	41.850,36	33,513

Tabela 8:110 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso III : Fase de $F_{\max}/2$ - F-X

8.20.1.4 Fase de Pós Pico

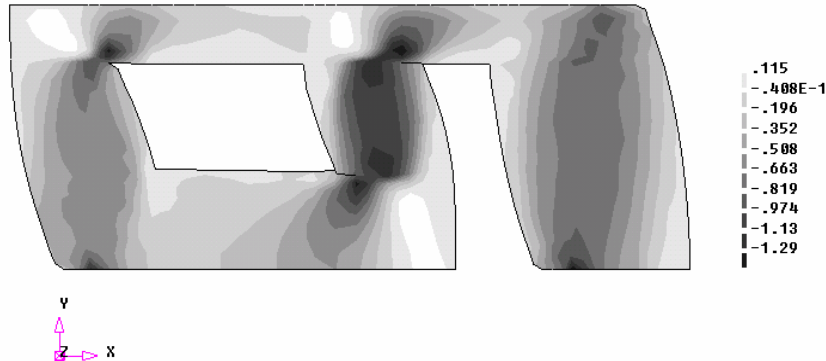


Figura 8:67 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo I - Caso III - F-X - N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	58.767,82	24,024
B	93.463,18	38,207
C	94.538,94	38,646

Tabela 8:111 - Distribuição da força horizontal - Modelo I - Caso III : Fase Pós Pico - F-X

8.20.2 Modelo I - Caso III - F-X - Gráficos

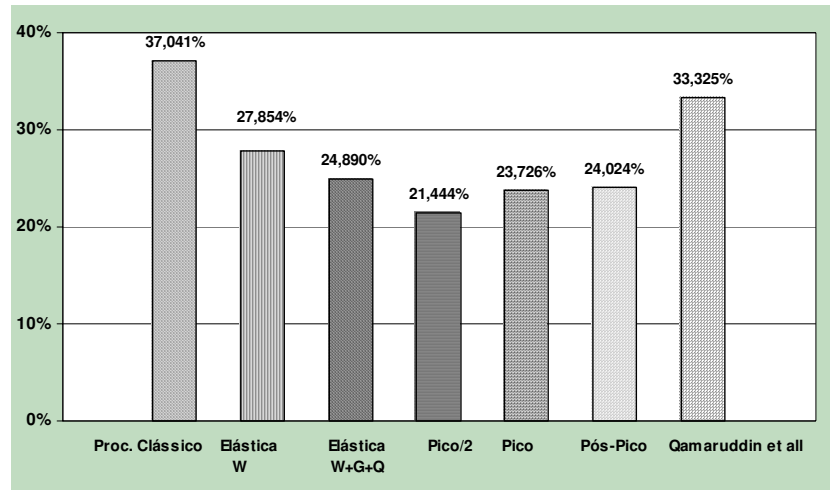


Gráfico 8:34 - Distribuição da força horizontal: Modelo I - Caso III: F-X: Membro A

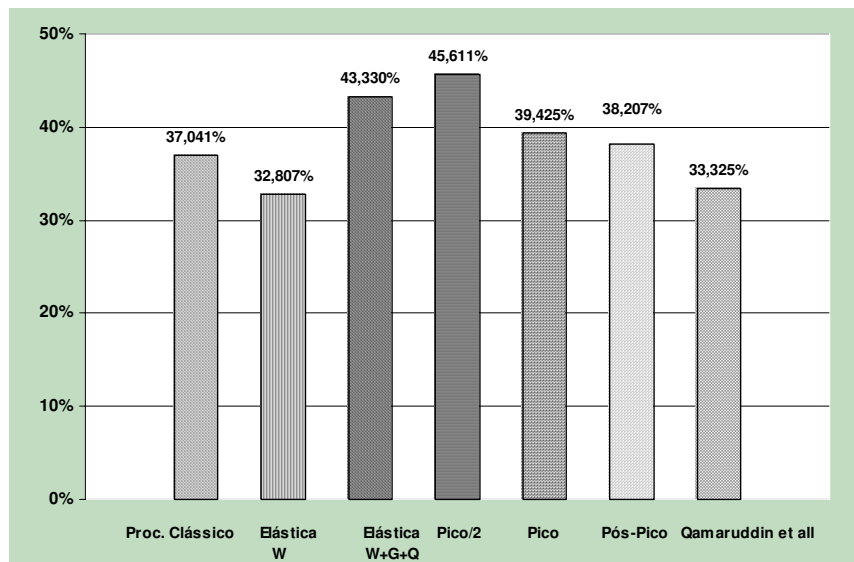


Gráfico 8:35 - Distribuição da força horizontal: Modelo I - Caso III: F-X: Membro B

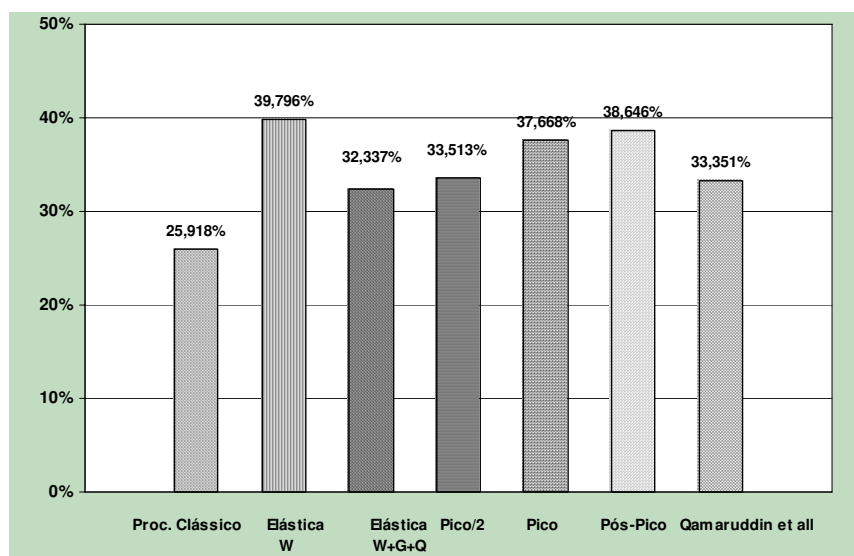


Gráfico 8:36 - Distribuição da força horizontal: Modelo I - Caso III: F-X: Membro C

8.21 Modelo I-A - Caso III - F+X

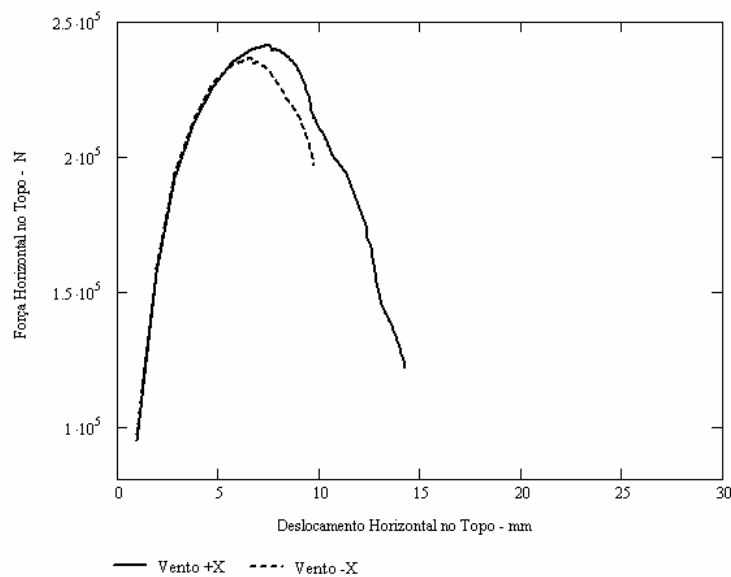


Figura 8:68 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo I-A: Caso III - F+X

Os deslocamentos horizontais máximos obtidos foram de 7,536 mm e 6,591 mm, correspondentes, respectivamente, aos valores máximos das forças horizontal agindo segundo as direções +X e -X. As forças máximas alcançadas para estas duas situações, 241,50 kN e 236,70 kN, o que conduziu a fatores de carga de 1,87 e 1,83, respectivamente.

8.21.1 Distribuição da Força Horizontal

8.21.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	1.000	1,200	108.333,33	37,041	47.948,09
B	1.200	1.000	1,200	108.333,33	37,041	47.948,09
C	2.200	1.500	1,467	75.802,14	25,918	33.549,82

Tabela 8:112 - Distribuição de força cortante - Modelo I-A - Caso III : Fase Elástica - F+X - Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	47.948,09	37.594,35	27,541	29,042
B	47.948,09	40.916,64	17,185	31,609
C	33.549,82	51.574,09	-34,948	39,842

Tabela 8:113 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I-A - Caso III : Fase Elástica - F+X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	47.948,09	35.743,71	34,144	27,613
B	47.948,09	33.843,48	41,676	26,145
C	33.549,82	60.281,07	-44,344	46,569

Tabela 8:114 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-A – Caso III: Fase Elástica – F+X₋+G+Q

8.21.1.2 Fase de Pico

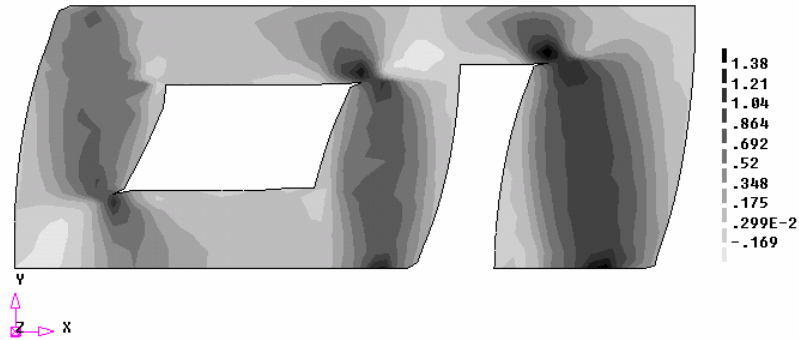


Figura 8:69 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo I-A – Caso III - F+X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	62.409,72	25,840
B	64.505,15	26,707
C	116.221,36	48,120

Tabela 8:115 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A – Caso III - Fase de Pico – F+X

8.21.1.3 Fase de Fmax/2



Figura 8:70 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 – Modelo I-A – Caso III - F+X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	31.202,40	25,830
B	30.231,62	25,026
C	59.728,40	49,444

Tabela 8:116 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A – Caso III : Fase de Fmax/2 – F+X

8.21.1.4 Fase de Pós Pico



Figura 8:71 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo I-A Caso III - F+X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	59.141,47	25,490
B	64.634,91	27,858
C	110.098,16	47,452

Tabela 8:117 - Distribuição da força horizontal - Modelo I-A Caso III : Fase Pós Pico - F+X

8.21.2 Modelo I-A Caso III - F+X - Gráficos

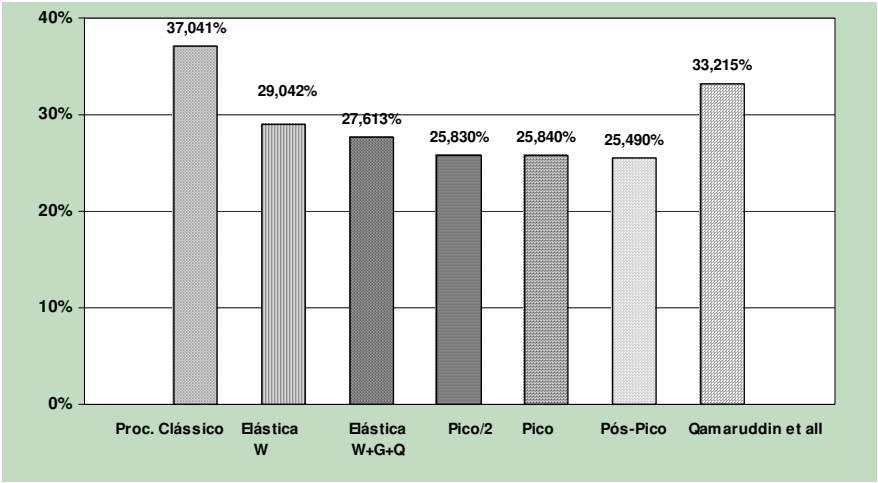


Gráfico 8:37 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-A Caso III: F+X: Membro A

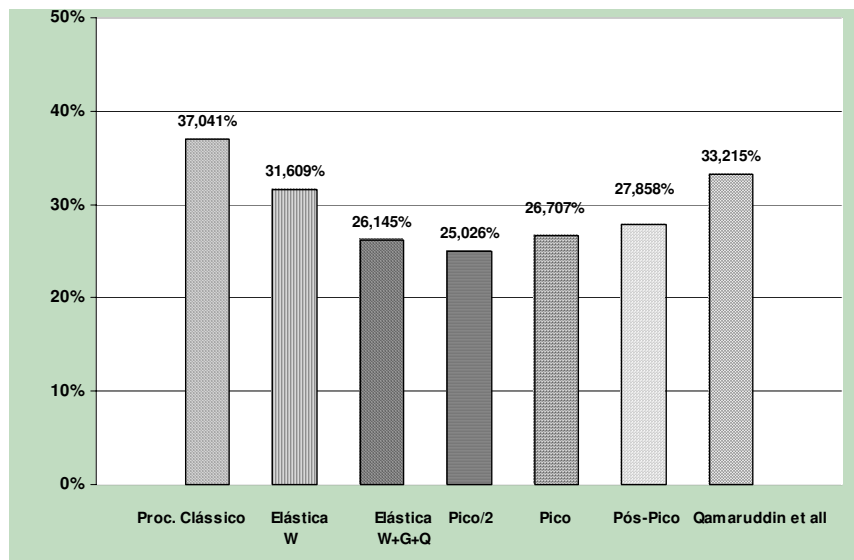


Gráfico 8:38 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-A Caso III: F+X: Membro B

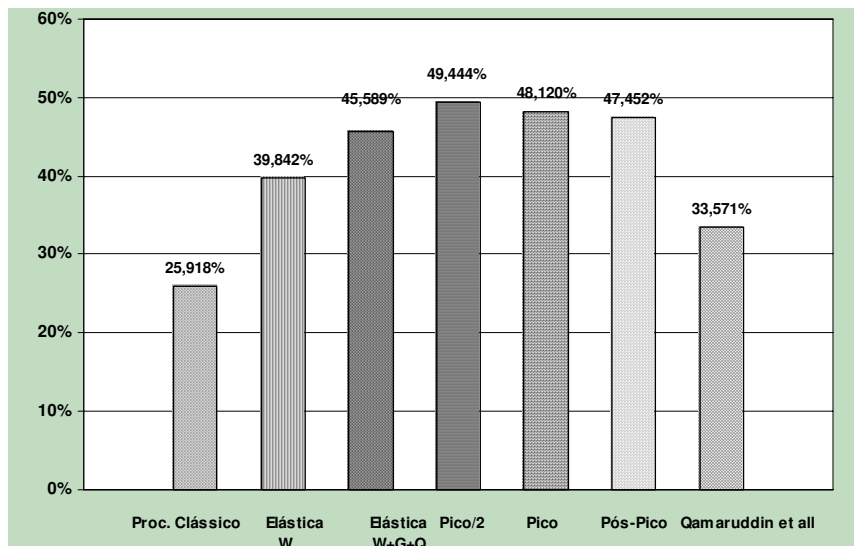


Gráfico 8:39 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-A Caso I?II: F+X: Membro C

8.22 Modelo I-A Caso III – F-X

8.22.1 Distribuição da Força Horizontal

8.22.1.1 Fase Elástica

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	47.948,09	36.747,49	30,483	28,388
B	47.948,09	40.660,29	17,926	31,411
C	33.549,82	52.667,18	-36,298	40,686

Tabela 8:118 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-A Caso III : Fase Elástica – F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	47.948,09	38.598,13	24,224	29,818
B	47.948,09	47.733,45	0,450	36,875
C	33.549,82	43.960,20	-23,682	33,960

Tabela 8:119 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-A Caso III: Fase Elástica – F-X_{G+Q}

8.22.1.2 Fase de Pico

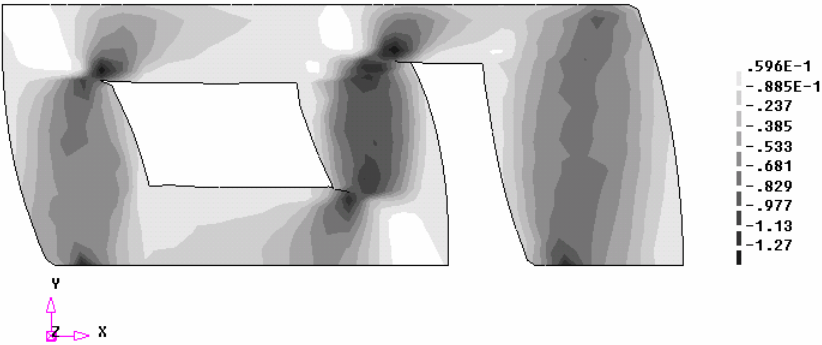


Figura 8:72 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo I-A Caso III – F-X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	64.346,44	27,184
B	81.838,58	34,574
C	92.632,44	39,134

Tabela 8:120 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A Caso III - Fase de Pico – F-X

8.22.1.3 Fase de Fmax/2

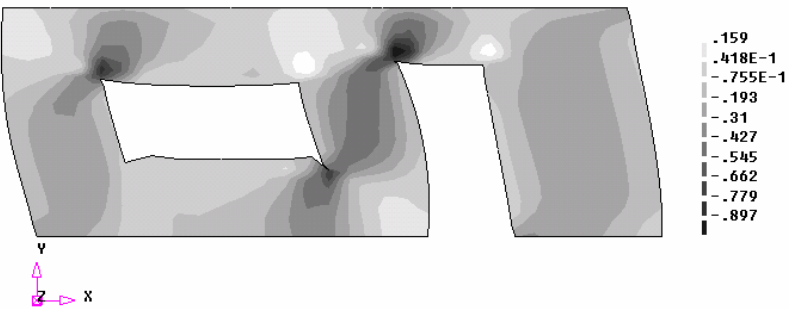


Figura 8:73 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 – Modelo I-A Caso III – F-X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	31.431,77	26,557
B	46.546,46	39,327
C	41.171,15	34,786

Tabela 8:121 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-A Caso III : Fase de Fmax/2 – F-X

8.22.1.4 Fase de Pós Pico

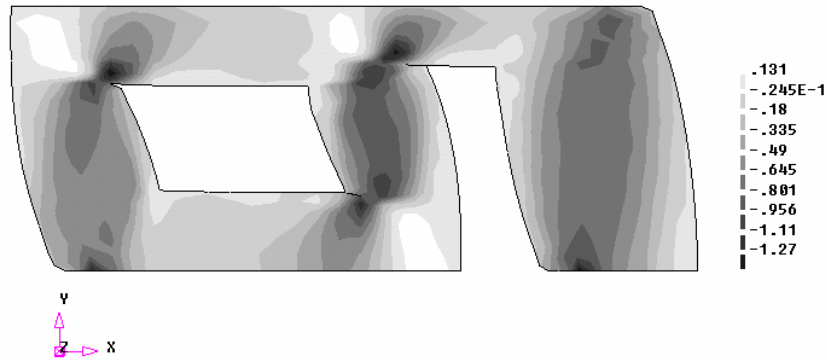


Figura 8:74 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo I-A Caso III - F-X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	63.569,08	28,091
B	70.637,04	31,214
C	94.423,27	41,725

Tabela 8:122 - Distribuição da força horizontal - Modelo I-A Caso III : Fase Pós Pico - F-X

8.22.2 Modelo I-A Caso III - F-X - Gráficos

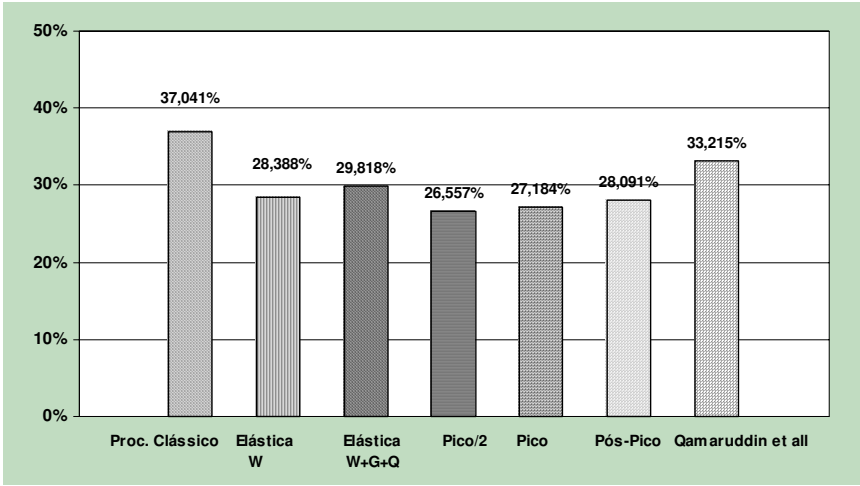


Gráfico 8:40 - Distribuição da força horizontal: Modelo I - Caso III: F-X: Membro A

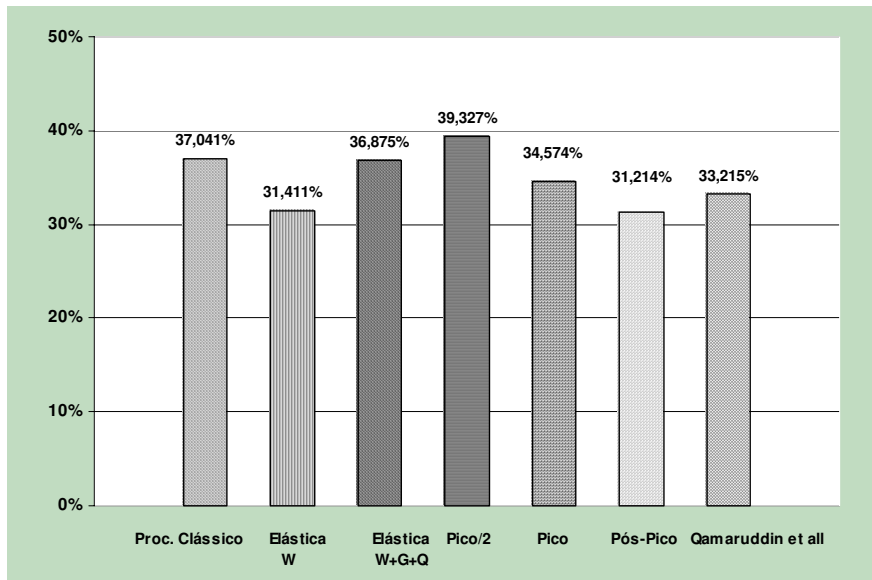


Gráfico 8:41 - Distribuição da força horizontal: Modelo I - Caso III: F-X: Membro B

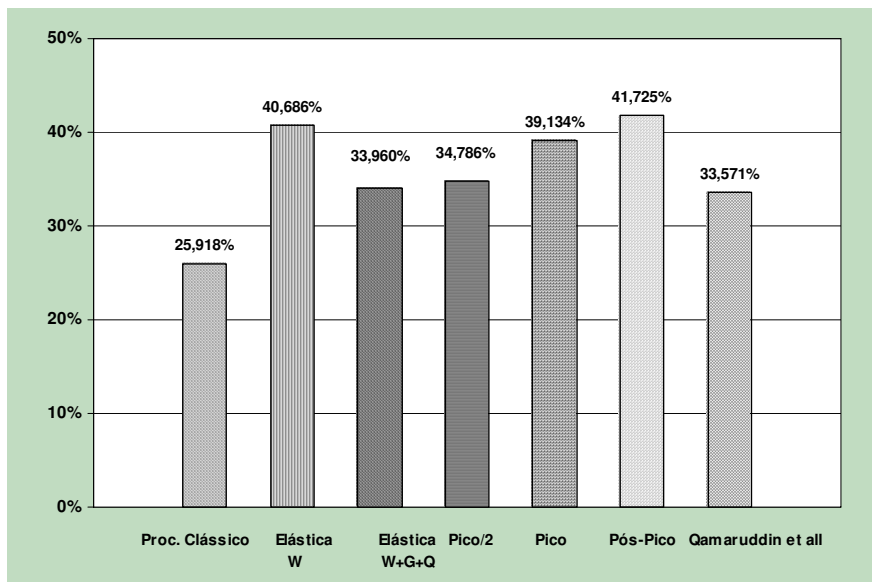


Gráfico 8:42 - Distribuição da força horizontal: Modelo I - Caso III: F-X: Membro C

8.23 Modelo I-B - Caso III - F+X

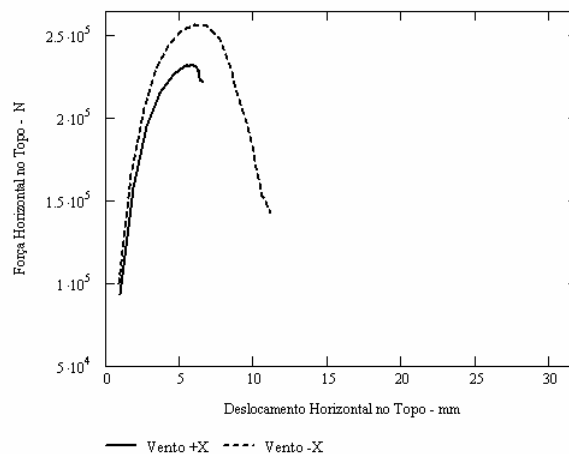


Figura 8:75 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo I-B: Caso III - F+X

Os deslocamentos horizontais máximos obtidos foram de 5,485 mm e 5,974 mm, correspondentes, respectivamente, aos valores máximos das forças horizontal agindo segundo as direções +X e -X. As forças máximas alcançadas para estas duas situações, 232,90 kN e 256,90 kN, o que conduziu a fatores de carga de 1,80 e 1,98, respectivamente.

8.23.1 Distribuição da Força Horizontal

8.23.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	1.000	1,200	108.333,33	32,893	42.578,99
B	1.000	1.000	1,000	145.212,77	44,091	57.073,97
C	2.200	1.500	1,467	75.802,14	23,016	29.793,04

Tabela 8:123 - Distribuição de força cortante - Modelo I-B - Caso III : Fase Elástica - F+X - Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	42.578,99	37.019,53	15,018	28,598
B	57.073,97	44.853,51	27,245	34,650
C	29.793,04	48.094,90	-38,054	37,154

Tabela 8:124 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I-B - Caso III : Fase Elástica - F+X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	42.578,99	46.651,32	-8,729	36,039
B	57.073,97	24.680,55	131,251	19,066
C	29.793,04	58.577,31	-49,139	45,252

Tabela 8:125 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo I-B - Caso III: Fase Elástica - F+X_+G+Q

8.23.1.2 Fase de Pico



Figura 8:76 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo I-B - Caso III - F+X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	70.979,10	30,471
B	50.116,50	21,515
C	112.789,44	48,420

Tabela 8:126 - Distribuição da força horizontal - Modelo I-B - Caso III - Fase de Pico - F+X

8.23.1.3 Fase de Fmax/2



Figura 8:77 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 - Modelo I-B - Caso III - F+X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	42.436,02	36,442
B	18.104,76	15,547
C	56.222,92	48,281

Tabela 8:127 - Distribuição da força horizontal - Modelo I-B - Caso III : Fase de Fmax/2 - F+X

8.23.1.4 Fase de Pós Pico



Figura 8:78 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo I-B Caso III - F+X N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	58.389,71	26,203
B	50.902,53	22,843
C	115.059,12	51,635

Tabela 8:128 - Distribuição da força horizontal - Modelo I-B Caso III : Fase Pós Pico - F+X

8.23.2 Modelo I-B Caso III - F+X - Gráficos

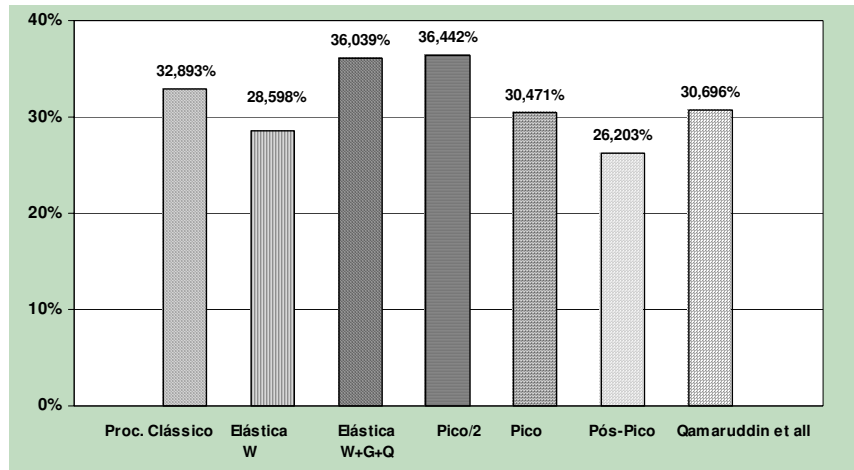


Gráfico 8:43 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-B Caso III: F+X: Membro A

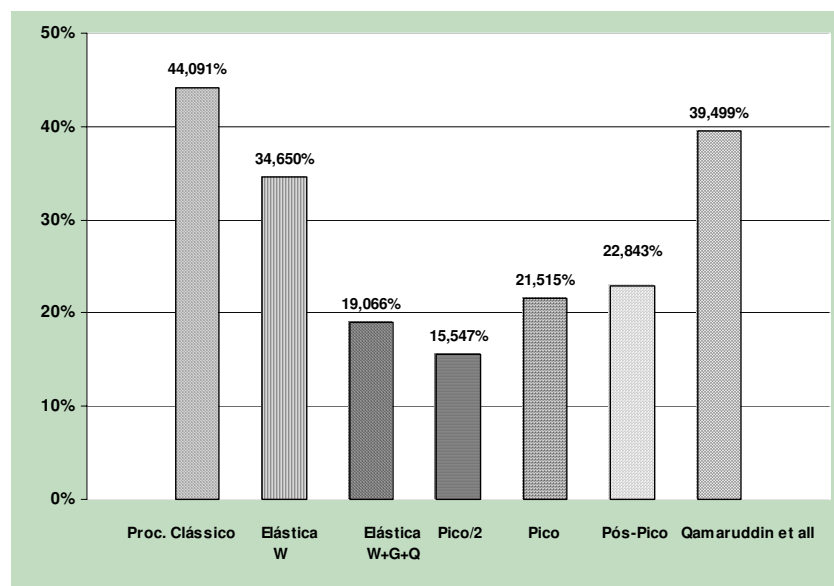


Gráfico 8:44 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-B Caso III: F+X: Membro B

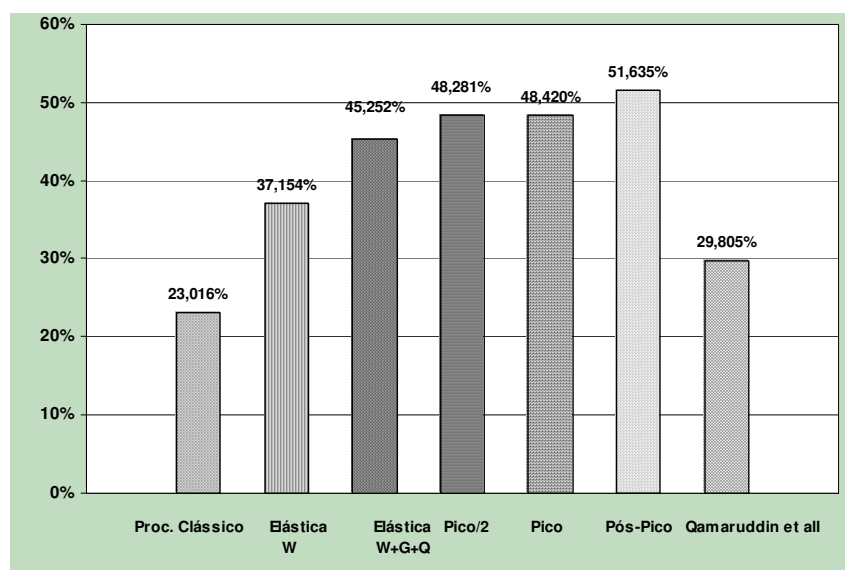


Gráfico 8:45 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-B Caso III: F+X: Membro C

8.24 Modelo I-B Caso III – F-X

8.24.1 Distribuição da Força Horizontal

8.24.1.1 Fase Elástica

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	42.578,99	35.623,71	19,525	27,520
B	57.073,97	45.174,10	26,342	34,898
C	29.793,04	49.168,06	-39,406	37,983

Tabela 8:129 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-B Caso III : Fase Elástica – F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	42.578,99	25.991,92	63,816	20,079
B	57.073,97	65.347,06	-12,660	50,482
C	29.793,04	38.685,64	-22,987	29,886

Tabela 8:130 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo I-B Caso III: Fase Elástica – F-X_{+G+Q}

8.24.1.2 Fase de Pico

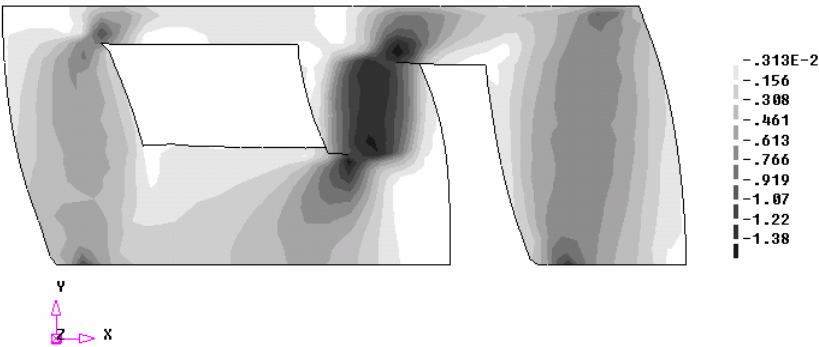


Figura 8:79 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo I-B Caso III – F-X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	53.206,63	20,708
B	115.708,66	45,033
C	89.637,78	34,887

Tabela 8:131 - Distribuição da força horizontal – Modelo I-B Caso III - Fase de Pico – F-X

8.24.1.3 Fase de $F_{max}/2$

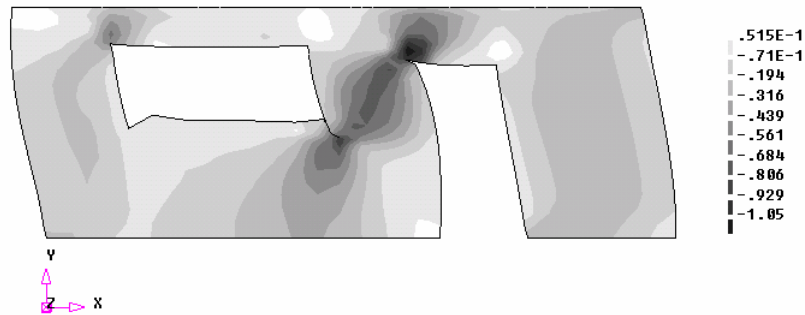


Figura 8:80 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ - Modelo I-B Caso III - F-X - N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	21.394,92	16,660
B	67.466,30	52,537
C	40.155,35	31,269

Tabela 8:132 - Distribuição da força horizontal - Modelo I-B Caso III : Fase de $F_{max}/2$ - F-X

8.24.1.4 Fase de Pós Pico

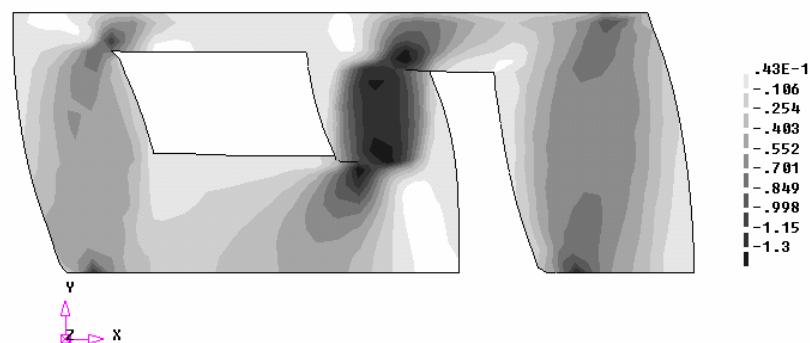


Figura 8:81 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo I-B Caso III - F-X - N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	53.981,20	21,199
B	111.627,90	43,837
C	90.768,55	35,646

Tabela 8:133 - Distribuição da força horizontal - Modelo I-B Caso III : Fase Pós Pico - F-X

8.24.2 Modelo I-B Caso III - F-X - Gráficos

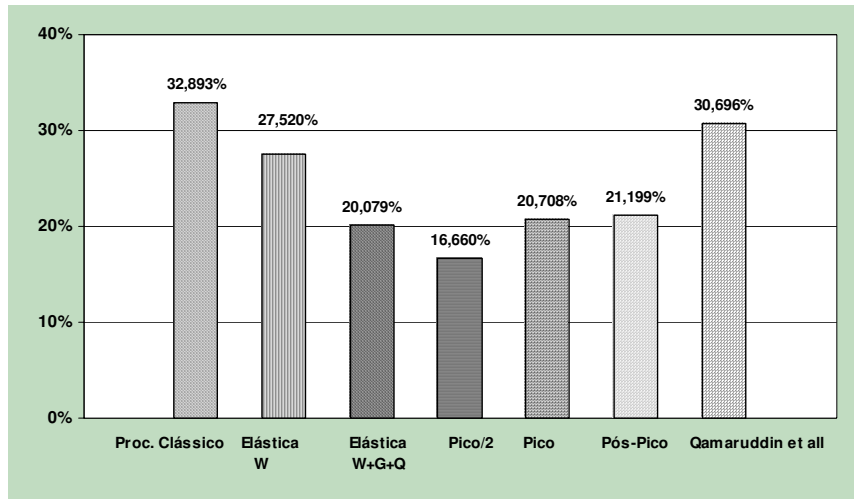


Gráfico 8:46 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-B - Caso III: F-X: Membro A

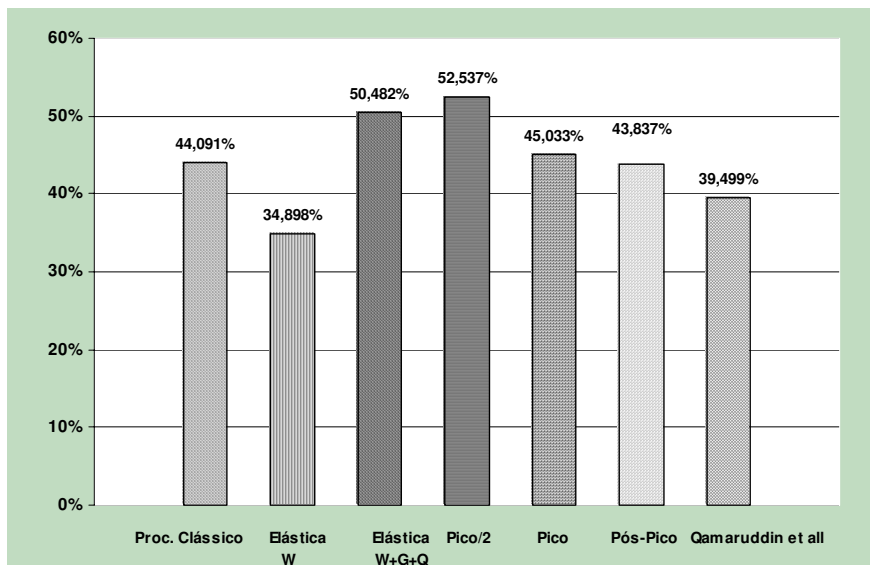


Gráfico 8:47 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-B - Caso III: F-X: Membro B

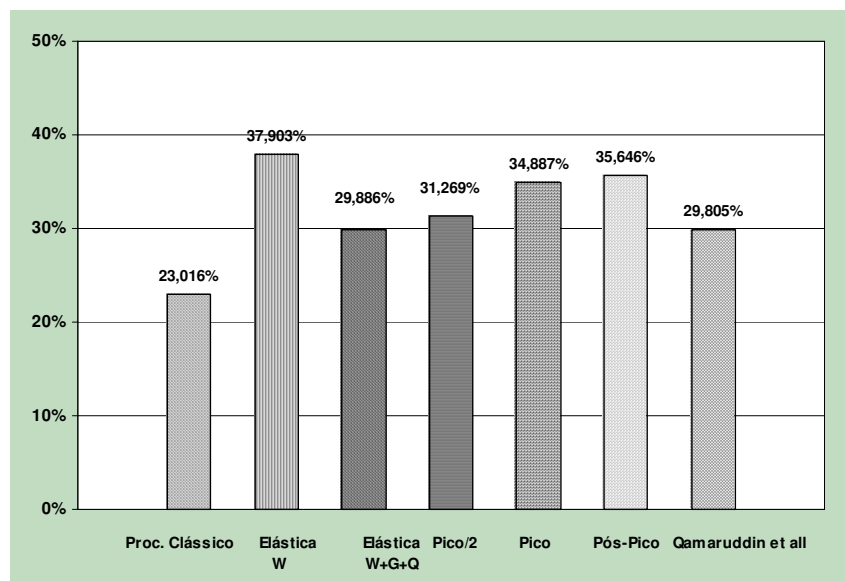


Gráfico 8:48 - Distribuição da força horizontal: Modelo I-B - Caso III: F-X: Membro C

8.25 Modelo II – Caso III – F+X

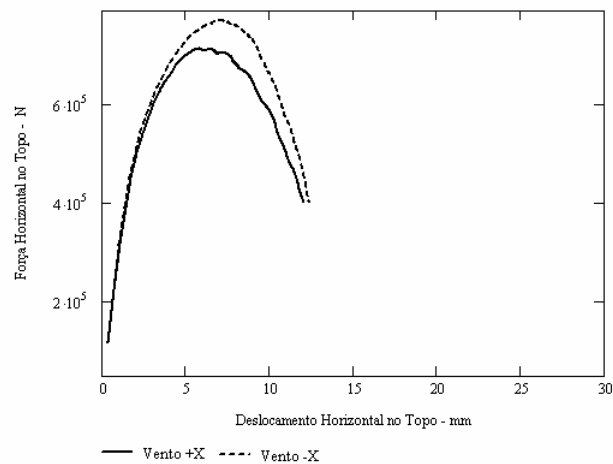


Figura 8:82 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo II: Caso III – F+X

Os deslocamentos horizontais máximos obtidos foram de 5,799 mm e 7,138 mm, correspondentes, respectivamente, aos valores máximos das forças horizontal agindo segundo as direções +X e -X. As forças máximas alcançadas para estas duas situações, 713,70 kN e 768,40 kN, o que conduziu a fatores de carga de 5,51 e 5,94, respectivamente.

8.25.1 Distribuição da Força Horizontal

8.25.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	2.000	0,600	291.666,67	33,135	42.892,33
B	1.000	2.000	0,500	362.790,70	41,215	53.351,79
C	2.200	3.000	0,733	225.771,87	25,649	33.201,88

Tabela 8:134 - Distribuição de força cortante – Modelo II – Caso III : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	42.892,33	40.049,57	7,098	30,939
B	53.351,79	39.595,84	34,741	30,589
C	33.201,88	49.874,10	-33,429	38,529

Tabela 8:135 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo II – Caso III : Fase Elástica – F+X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	42.892,33	51.160,38	-16,162	39,523
B	53.351,79	17.332,96	207,805	13,390
C	33.201,88	61.007,95	-45,578	47,130

Tabela 8:136 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo II - Caso III: Fase Elástica - F+X₁+G+Q

8.25.1.2 Fase de Pico

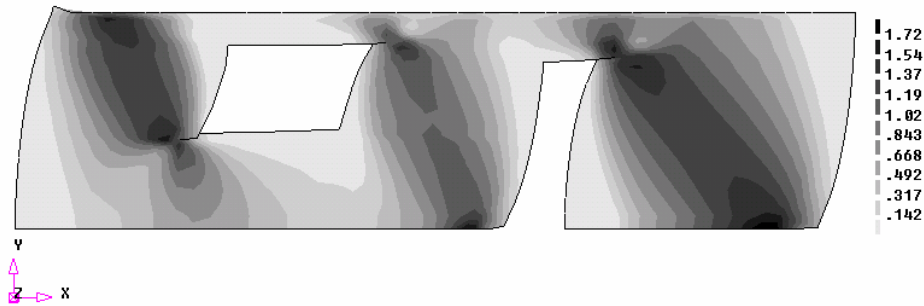


Figura 8:83 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo II - Caso III - F+X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	213.092,36	29,858
B	160.603,74	22,503
C	340.737,98	47,743

Tabela 8:137 - Distribuição da força horizontal - Modelo II - Caso III - Fase de Pico - F+X

8.25.1.3 Fase de Fmax/2

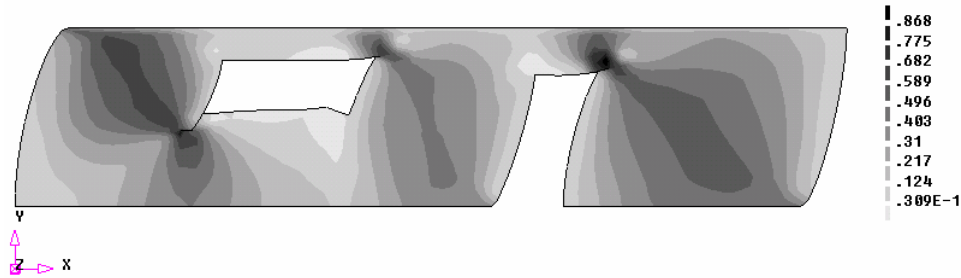


Figura 8:84 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 - Modelo II - Caso III - F+X - N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	119.657,88	33,536
B	80.019,71	22,427
C	157.300,93	44,086

Tabela 8:138 - Distribuição da força horizontal - Modelo II - Caso III : Fase de Fmax/2 - F+X

8.25.1.4 Fase de Pós Pico



Figura 8:85 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo II Caso III – F+X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	185.724,97	26,418
B	165.298,15	23,515
C	352.902,47	50,198

Tabela 8:139 - Distribuição da força horizontal – Modelo II Caso III : Fase Pós Pico – F+X

8.25.2 Modelo II Caso III – F+X – Gráficos

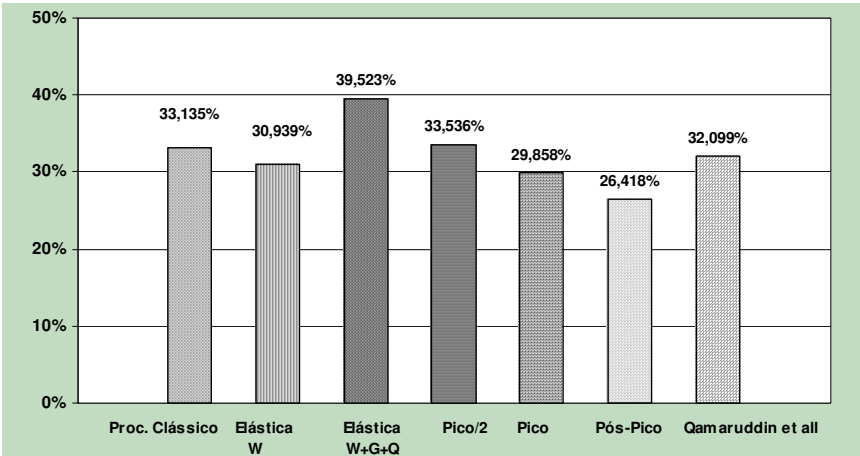


Gráfico 8:49 - Distribuição da força horizontal: Modelo II Caso III: F+X: Membro A

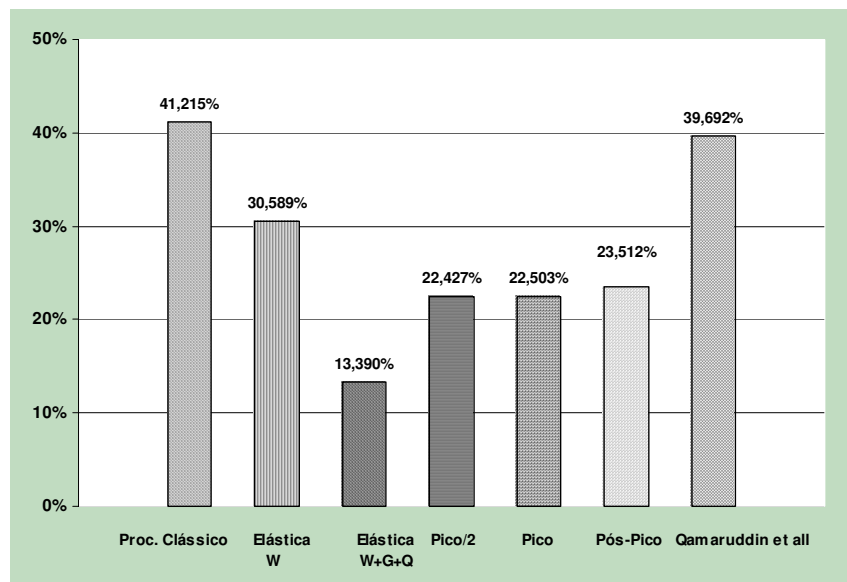


Gráfico 8:50 - Distribuição da força horizontal: Modelo II Caso III: F+X: Membro B

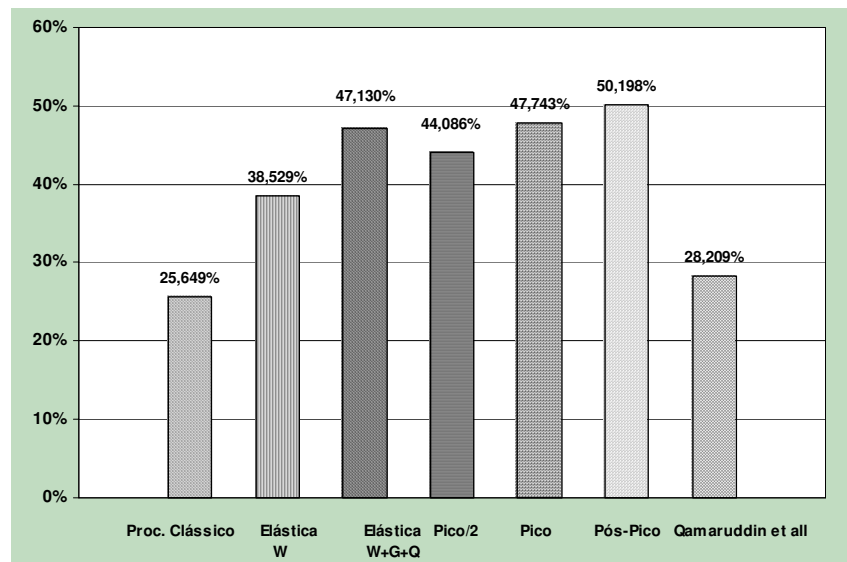


Gráfico 8:51 - Distribuição da força horizontal: Modelo II Caso I?II: F+X: Membro C

8.26 Modelo II Caso III – F-X

8.26.1 Distribuição da Força Horizontal

8.26.1.1 Fase Elástica

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	42.892,33	33.524,86	27,942	25,898
B	53.351,79	39.564,77	34,847	30,565
C	33.201,88	56.419,97	-41,152	43,586

Tabela 8:140 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo II Caso III : Fase Elástica – F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	42.892,33	22.413,56	91,368	17,315
B	53.351,79	61.827,64	-13,709	47,763
C	33.201,88	45.286,12	-26,684	34,985

Tabela 8:141 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo II Caso III: Fase Elástica – F-X+G+Q

8.26.1.2 Fase de Pico

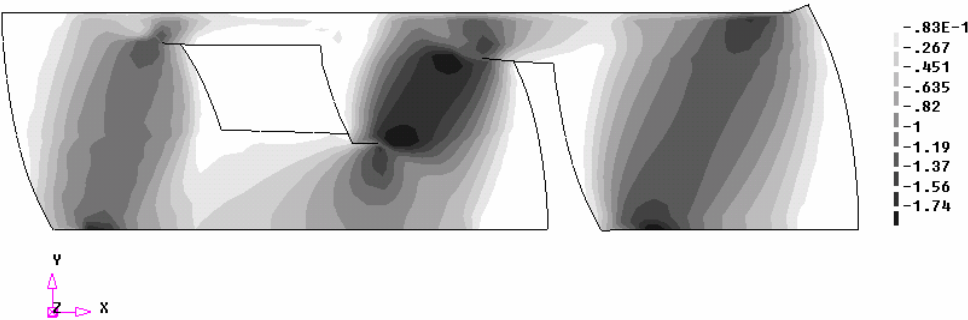


Figura 8:86 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo II Caso III – F-X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	165.924,21	21,594
B	318.067,50	41,395
C	285.104,19	37,105

Tabela 8:142 - Distribuição da força horizontal – Modelo II Caso III - Fase de Pico – F-X

8.26.1.3 Fase de Fmax/2

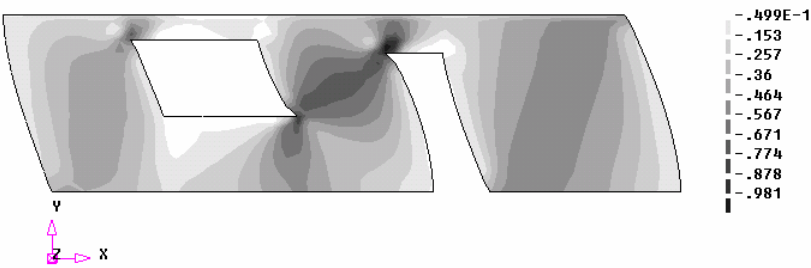


Figura 8:87 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 – Modelo II Caso III – F-X – N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	82.877,19	21,567
B	150.405,90	39,140
C	151.229,70	39,354

Tabela 8:143 - Distribuição da força horizontal – Modelo II Caso III : Fase de Fmax/2 – F-X

8.26.1.4 Fase de Pós Pico

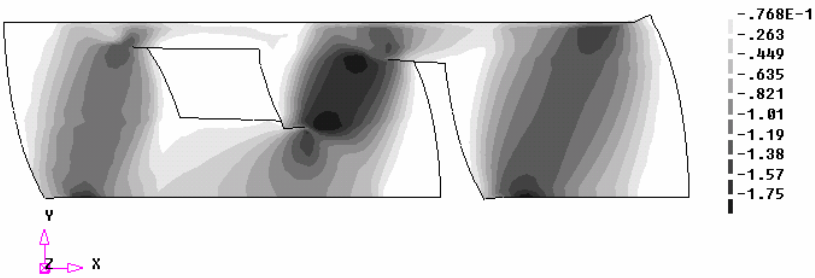


Figura 8:88 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo II Caso III - F-X
N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	166.803,09	21,916
B	316.427,29	41,575
C	278.631,75	36,609

Tabela 8:144 - Distribuição da força horizontal - Modelo II Caso III : Fase Pós Pico - F-X

8.26.2 Modelo II Caso III - F-X - Gráficos

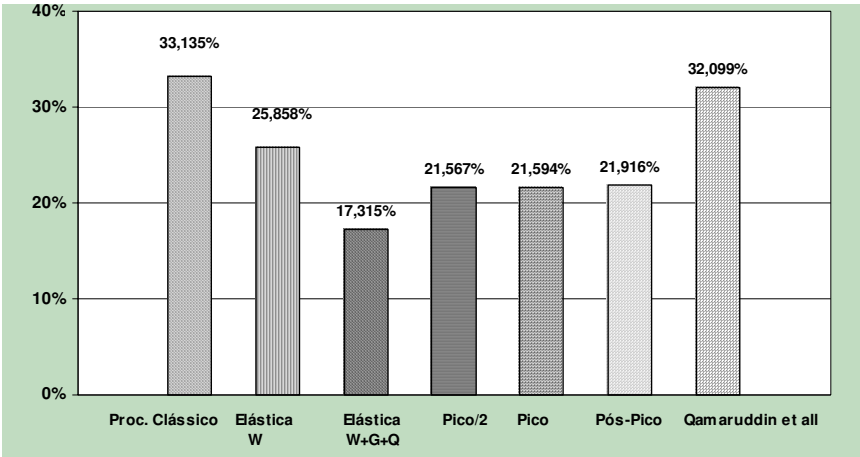


Gráfico 8:52 - Distribuição da força horizontal: Modelo II - Caso III: F-X: Membro A

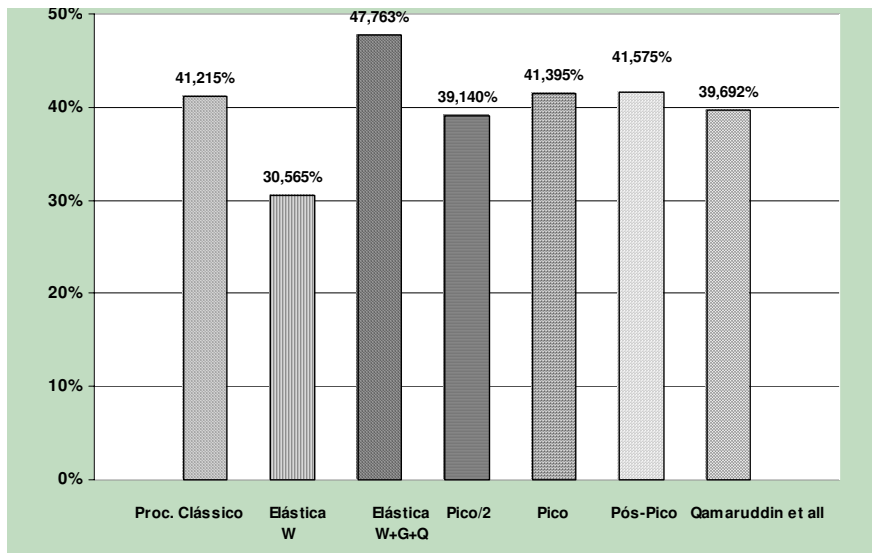


Gráfico 8:53 - Distribuição da força horizontal: Modelo II - Caso III: F-X: Membro B

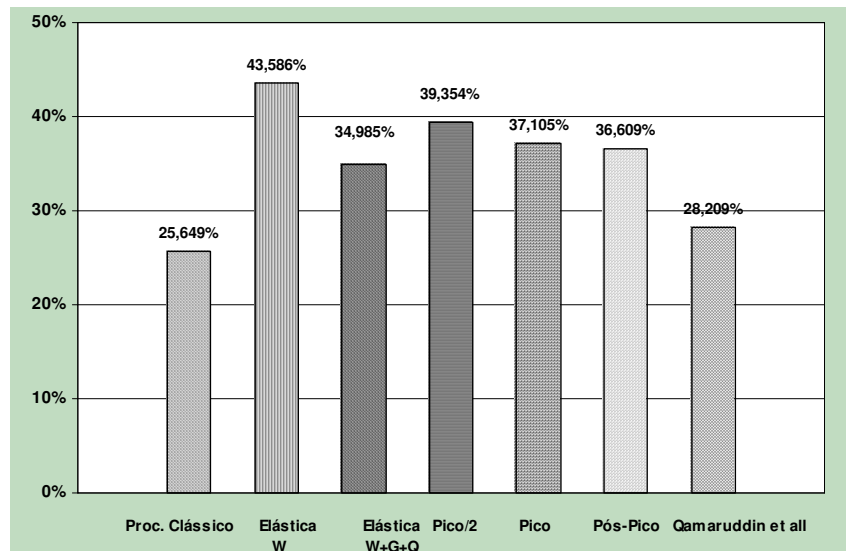


Gráfico 8:54 - Distribuição da força horizontal: Modelo II - Caso III: F-X: Membro C

8.27 Modelo III - Caso III - F+X

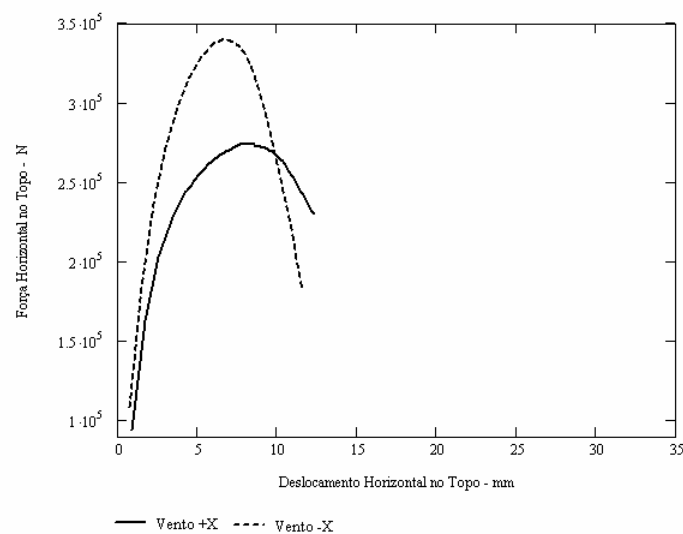


Figura 8:89 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo III: Caso III - F+X

Os deslocamentos horizontais máximos obtidos foram de 8,526 mm e 6,693 mm, correspondentes, respectivamente, aos valores máximos das forças horizontais agindo segundo as direções +X e -X. As forças máximas alcançadas para estas duas situações, 274,10kN e 340,50 kN , o que conduziu a fatores de carga de 2,12 e 2,63, respectivamente.

8.27.1 Distribuição da Força Horizontal

8.27.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	1.000	1,200	108.333,33	28,274	36.600,06
B	1.200	1.800	0,667	255.582,52	66,706	86.347,71
C	2.200	800	2,750	19.234,24	5,020	6.498,23

Tabela 8:145 - Distribuição de força cortante - Modelo III - Caso III : Fase Elástica - F+X - Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	36.600,06	31.083,98	17,746	24,013
B	86.347,71	87.504,50	-1,322	67,599
C	6.498,23	10.857,51	-40,150	8,388

Tabela 8:146 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo III - Caso III : Fase Elástica - F+X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	36.600,06	36.642,90	-0,117	28,307
B	86.347,71	76.569,74	12,770	59,152
C	6.498,23	16.233,37	-59,970	12,541

Tabela 8:147 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo III - Caso III: Fase Elástica - F+X+G+Q

8.27.1.2 Fase de Pico



Figura 8:90 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo III - Caso III - F+X - N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	68.981,54	25,163
B	166.300,06	60,662
C	38.860,56	14,175

Tabela 8:148 - Distribuição da força horizontal - Modelo III - Caso III - Fase de Pico - F+X

8.27.1.3 Fase de Fmax/2



Figura 8:91 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 - Modelo III - Caso III - F+X - N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	37.138,84	27,108
B	83.346,29	60,835
C	16.518,00	12,057

Tabela 8:149 - Distribuição da força horizontal - Modelo III - Caso III : Fase de Fmax/2 - F+X

8.27.1.4 Fase de Pós Pico



Figura 8:92 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo III Caso III - F+X N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	61.726,94	24,583
B	149.917,73	59,706
C	39.449,42	15,711

Tabela 8:150 - Distribuição da força horizontal - Modelo III Caso III : Fase Pós Pico - F+X

8.27.2 Modelo III Caso III - F+X - Gráficos

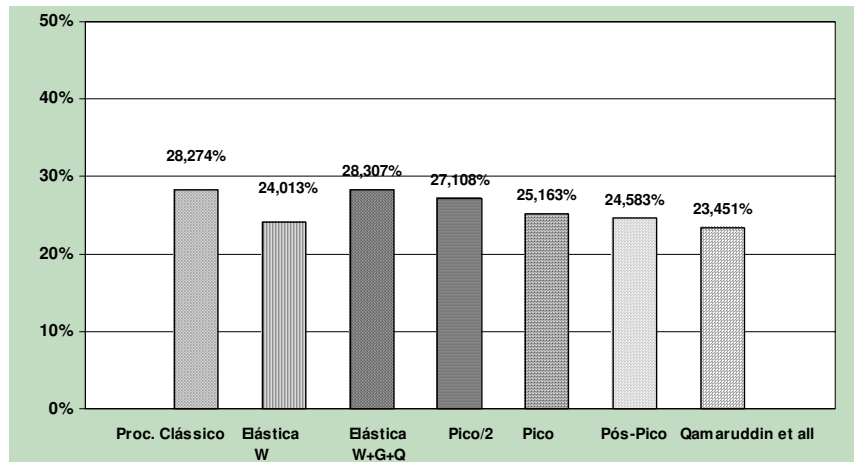


Gráfico 8:55 - Distribuição da força horizontal: Modelo III Caso III: F+X: Membro A

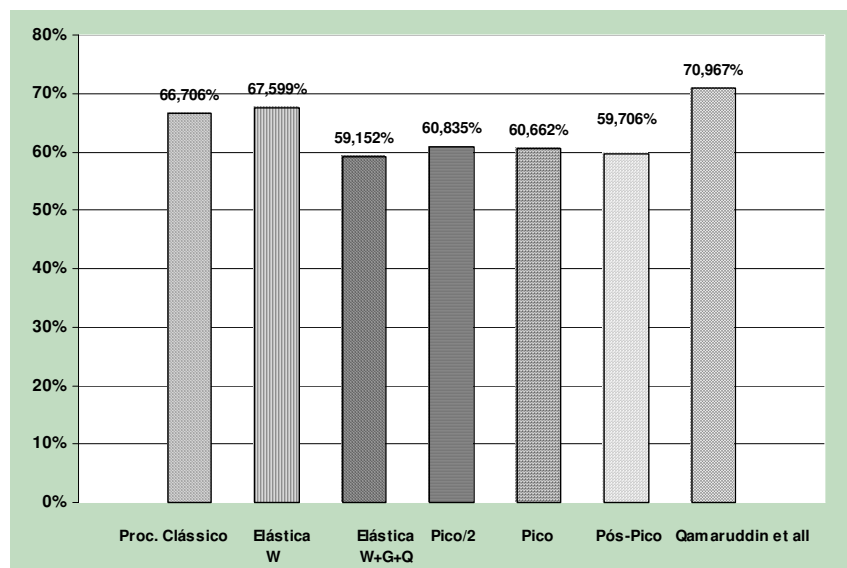


Gráfico 8:56 - Distribuição da força horizontal: Modelo III Caso III: F+X: Membro B

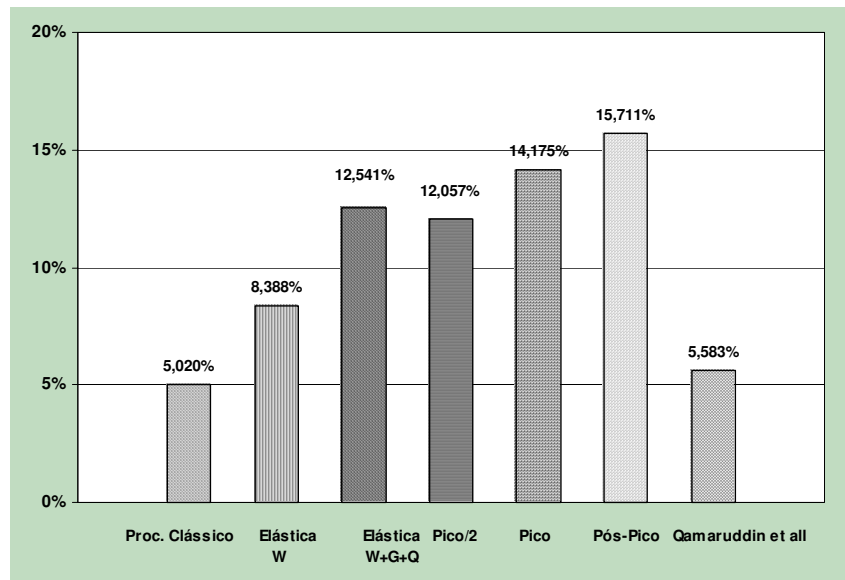


Gráfico 8:57 - Distribuição da força horizontal: Modelo III Caso III: F+X: Membro C

8.28 Modelo III Caso III – F-X

8.28.1 Distribuição da Força Horizontal

8.28.1.1 Fase Elástica

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	36.600,06	30.099,43	21,597	23,252
B	86.347,71	88.211,59	-2,113	68,145
C	6.498,23	11.134,98	-41,641	8,602

Tabela 8:151 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III Caso III : Fase Elástica – F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	36.600,06	24.540,52	49,141	18,958
B	86.347,71	99.146,36	-12,909	76,593
C	6.498,23	5.759,13	12,834	4,449

Tabela 8:152 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III Caso III: Fase Elástica – F-X+G+Q

8.28.1.2 Fase de Pico

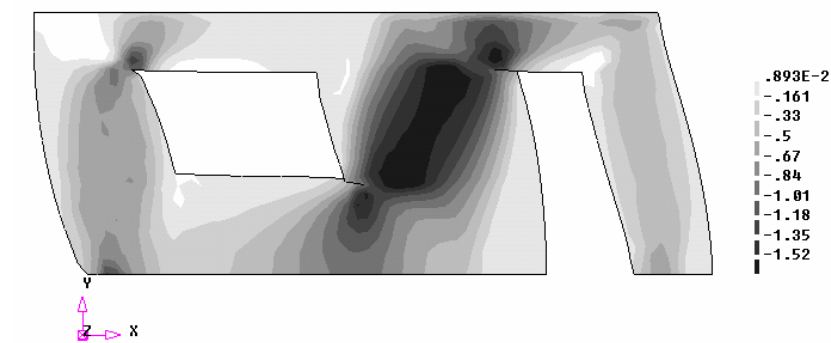


Figura 8:93 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo III Caso III - F-X - N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	57.468,86	16,878
B	253.290,82	74,390
C	29.754,81	8,739

Tabela 8:153 - Distribuição da força horizontal - Modelo III Caso III - Fase de Pico - F-X

8.28.1.3 Fase de Fmax/2

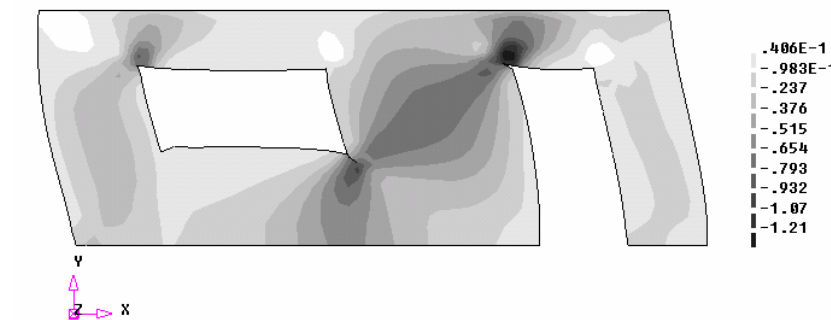


Figura 8:94 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 - Modelo III Caso III - F-X - N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	27.781,67	16,321
B	132.952,30	78,104
C	9.491,44	5,576

Tabela 8:154 - Distribuição da força horizontal - Modelo III Caso III : Fase de Fmax/2 - F-X

8.28.1.4 Fase de Pós Pico

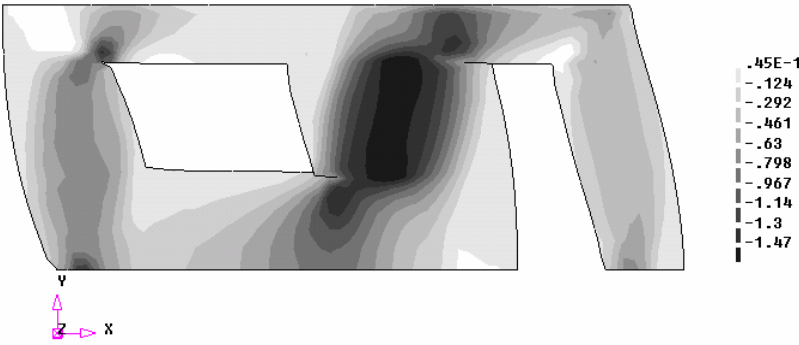


Figura 8:95 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo III Caso III - F-X
N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	59.492,84	18,710
B	227.622,98	71,587
C	30.850,38	9,702

Tabela 8:155 - Distribuição da força horizontal - Modelo III Caso III : Fase Pós Pico - F-X

8.28.2 Modelo III Caso III - F-X - Gráficos

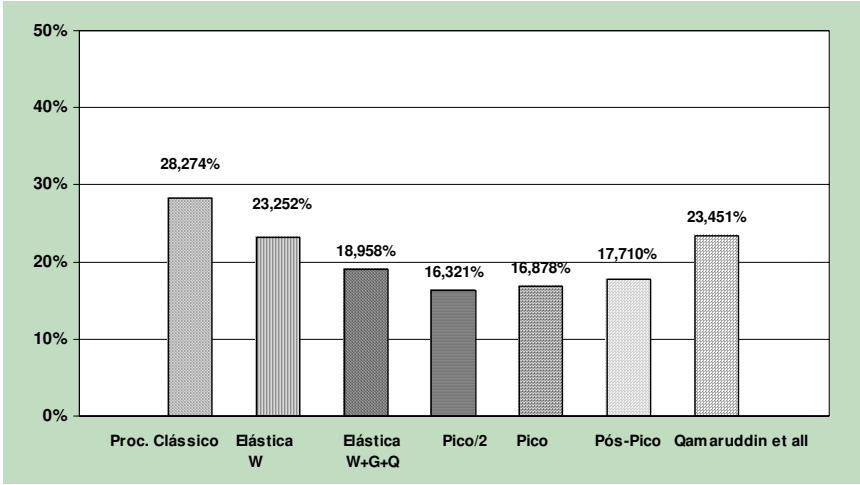


Gráfico 8:58 - Distribuição da força horizontal: Modelo III - Caso III: F-X: Membro A

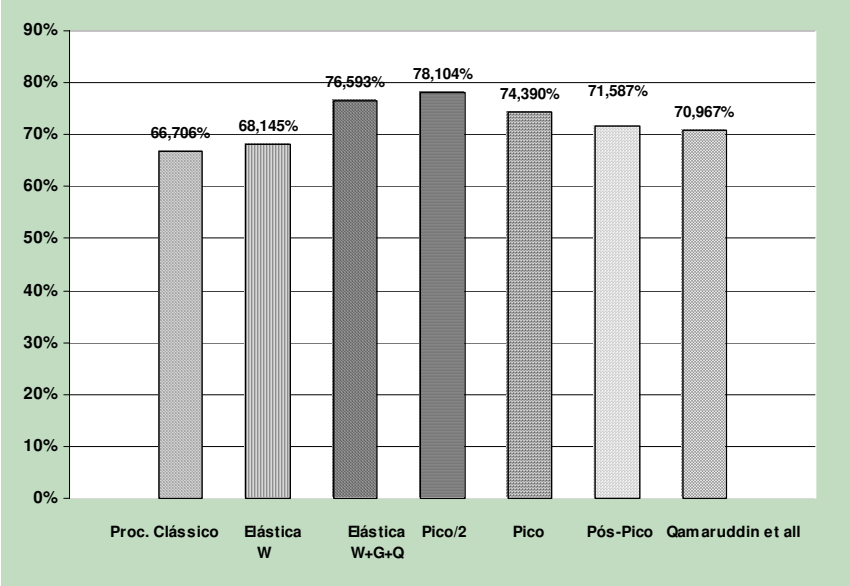


Gráfico 8:59 - Distribuição da força horizontal: Modelo III - Caso III: F-X: Membro B

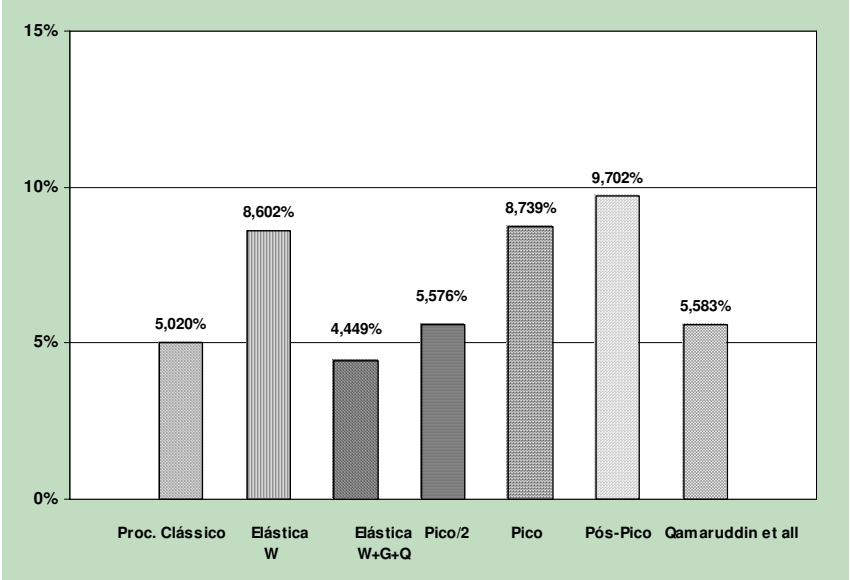


Gráfico 8:60 - Distribuição da força horizontal: Modelo III - Caso III: F-X: Membro C

8.29 Modelo III-A Caso III – F+X

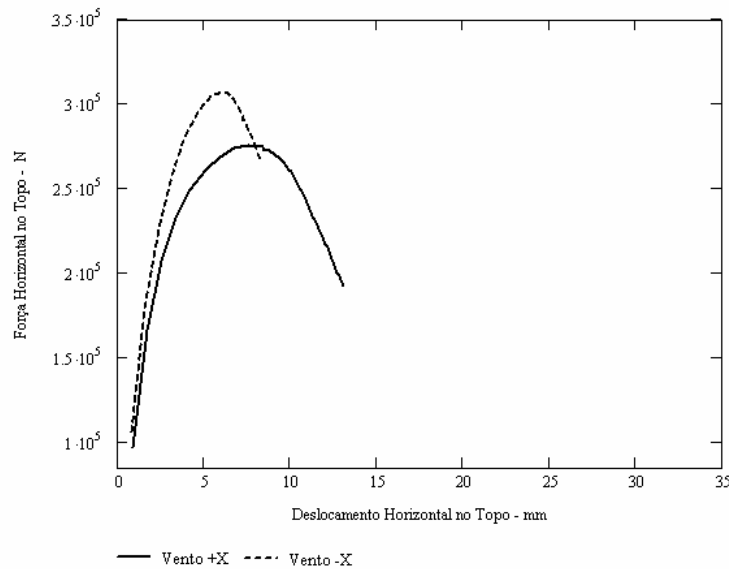


Figura 8:96 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo III-A: Caso III – F+X

Os deslocamentos horizontais máximos obtidos foram de 7,576 mm e 6,224 mm, correspondentes, respectivamente, aos valores máximos das forças horizontais agindo segundo as direções +X e -X. As forças máximas alcançadas para estas duas situações, 276 kN e 307,50 kN, o que conduziu a fatores de carga de 2,13 e 2,38, respectivamente.

8.29.1 Distribuição da Força Horizontal

8.29.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	1.000	1,200	108.333,33	28,274	36.600,06
B	1.200	1.800	0,667	255.582,52	66,706	86.347,71
C	2.200	800	2,750	19.234,24	5,020	6.498,23

Tabela 8:156 - Distribuição de força cortante – Modelo III-A – Caso III : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	36.600,06	31.227,60	17,204	24,124
B	86.347,71	87.174,03	-0,948	67,344
C	6.498,23	11.044,36	-41,162	8,532

Tabela 8:157 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-A – Caso III : Fase Elástica – F+X

Membro	Força Cortante (N)	Diferença Relativa	Percentual MEF (Relativo à força
--------	--------------------	--------------------	----------------------------------

	Procedimento Clássico	MEF	(%)	aplicada)
A	36.600,06	30.974,71	18,161	23,929
B	86.347,71	82.375,60	4,822	63,637
C	6.498,23	16.095,69	-59,628	12,434

Tabela 8:158 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-A – Caso III: Fase Elástica – F+X_+G+Q

8.29.1.2 Fase de Pico

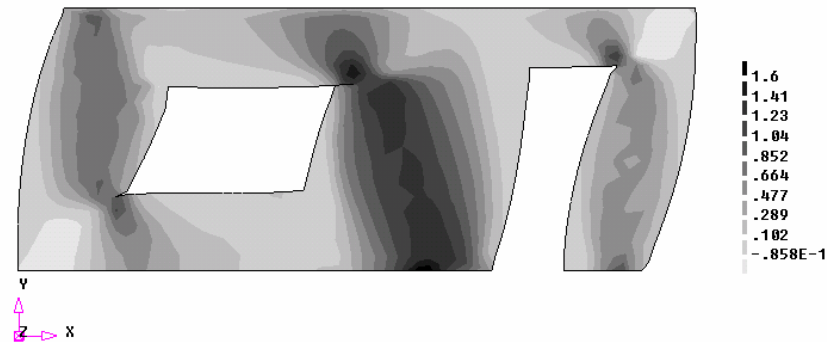


Figura 8:97 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III-A – Caso III - F+X – N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	62.479,21	22,635
B	175.291,31	63,505
C	38.258,31	13,860

Tabela 8:159 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-A – Caso III - Fase de Pico – F+X

8.29.1.3 Fase de Fmax/2

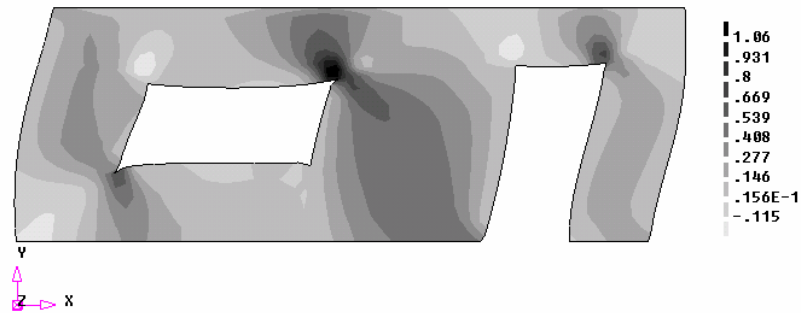


Figura 8:98 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 – Modelo III-A – Caso III - F+X – N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	30.778,08	22,303
B	91.022,13	65,959
C	16.196,84	11,737

Tabela 8:160 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-A – Caso III : Fase de Fmax/2 – F+X

8.29.1.4 Fase de Pós Pico

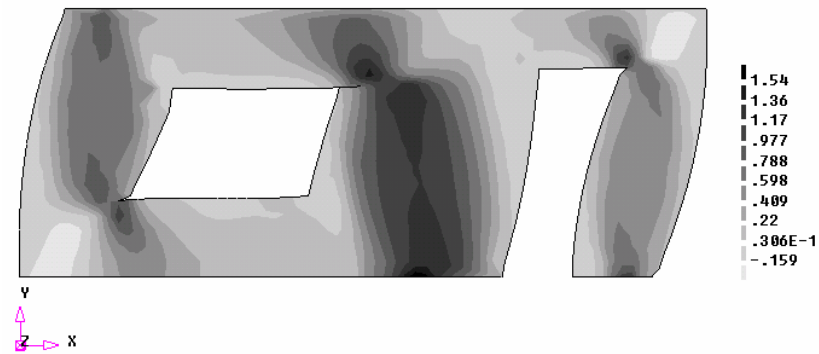


Figura 8:99 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo III-A - Caso III - F+X
N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	62.088,79	23,963
B	157.709,30	60,867
C	39.271,35	15,156

Tabela 8:161 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-A - Caso III : Fase Pós Pico - F+X

8.29.2 Modelo III-A Caso III - F+X - Gráficos

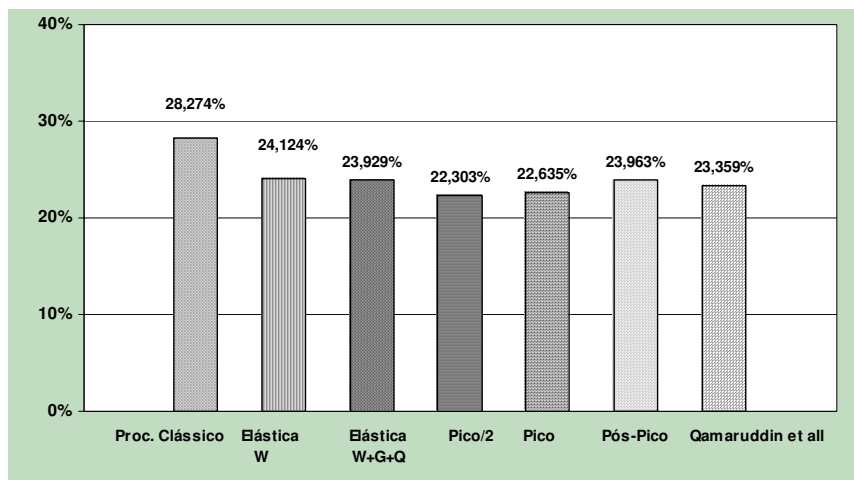


Gráfico 8:61 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso III: F+X: Membro A

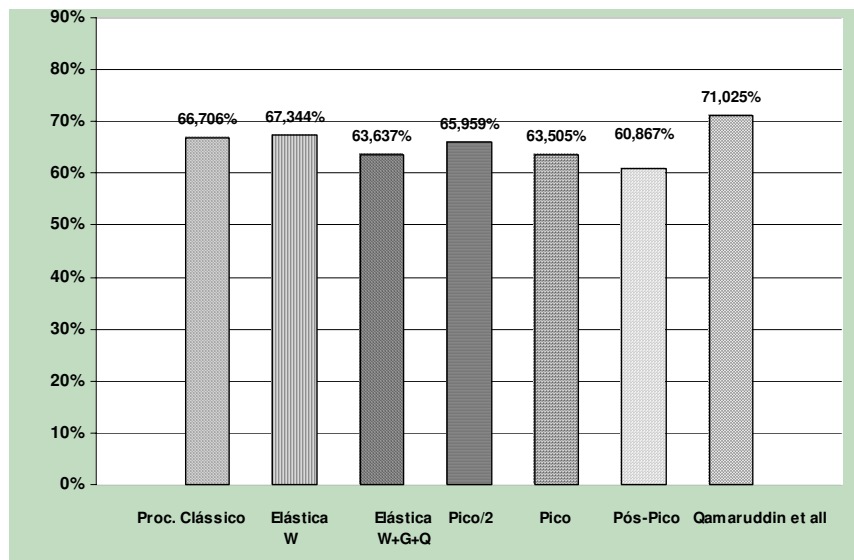


Gráfico 8:62 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso III: F+X: Membro B

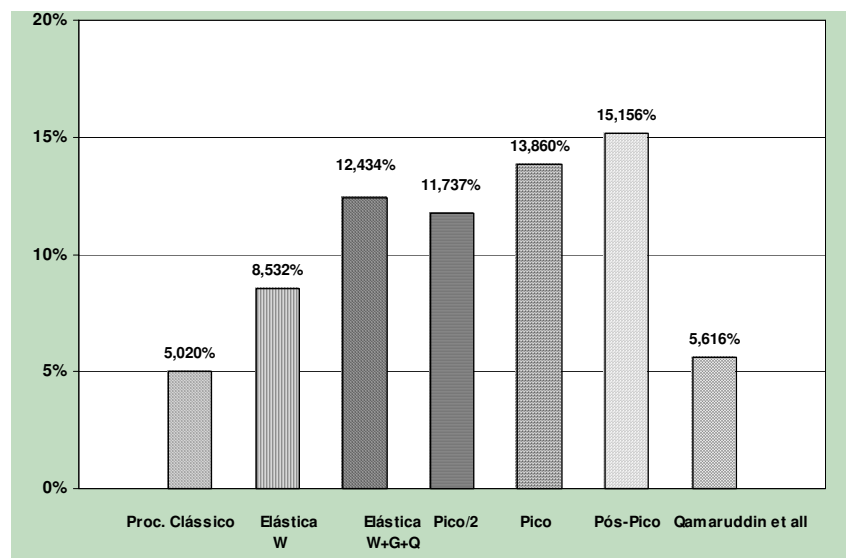


Gráfico 8:63 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso III: F+X: Membro C

8.30 Modelo III-A Caso III – F-X

8.30.1 Distribuição da Força Horizontal

8.30.1.1 Fase Elástica

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	36.600,06	30.505,76	19,978	23,566
B	86.347,71	87.602,26	-1,432	67,657
C	6.498,23	11.337,98	-42,686	8,759

Tabela 8:162 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-A - Caso III : Fase Elástica – F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	36.600,06	30.758,65	18,991	23,762
B	86.347,71	92.400,70	-6,551	71,382
C	6.498,23	6.286,65	3,366	4,857

Tabela 8:163 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo III-A - Caso III: Fase Elástica - F-X_{G+Q}

8.30.1.2 Fase de Pico

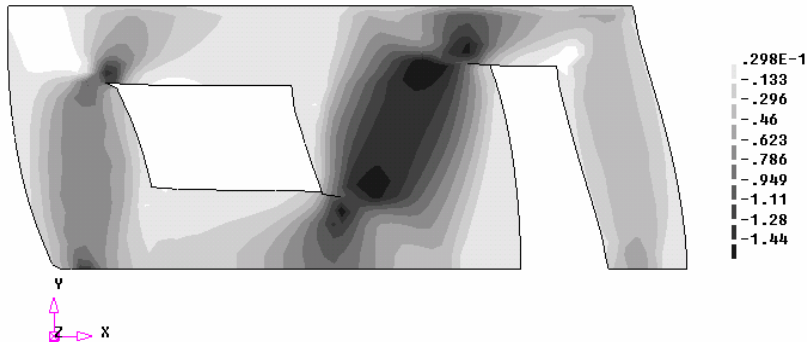


Figura 8:100 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo III-A - Caso III - F-X - N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	62.265,39	20,247
B	215.902,66	70,206
C	29.356,54	9,546

Tabela 8:164 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-A - Caso III - Fase de Pico - F-X

8.30.1.3 Fase de Fmax/2

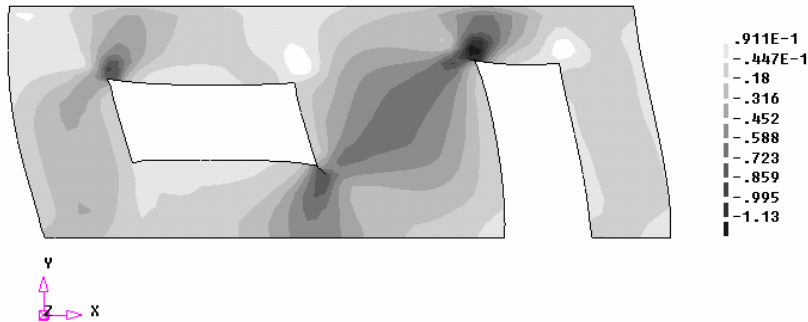


Figura 8:101 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 - Modelo III-A - Caso III - F-X - N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	31.281,96	20,355
B	113.613,90	73,929
C	8.780,71	5,714

Tabela 8:165 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-A - Caso III : Fase de Fmax/2 - F-X

8.30.1.4 Fase de Pós Pico

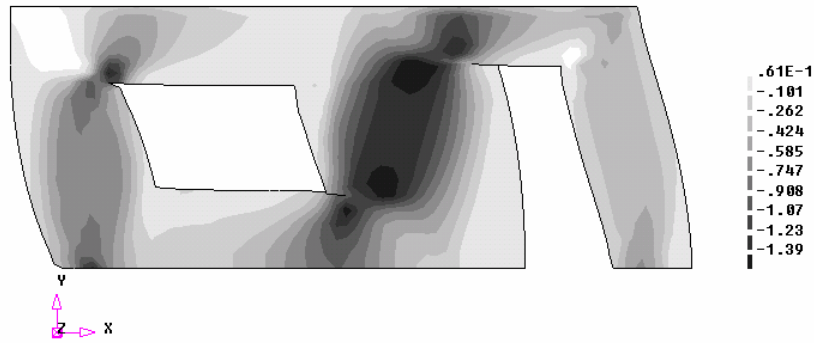


Figura 8:102 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo III-A -Caso III - F-X
N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	63.471,78	22,009
B	194.676,44	67,503
C	30.252,07	10,490

Tabela 8:166 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-A -Caso III : Fase Pós Pico - F-X

8.30.2 Modelo III-A Caso III - F-X - Gráficos

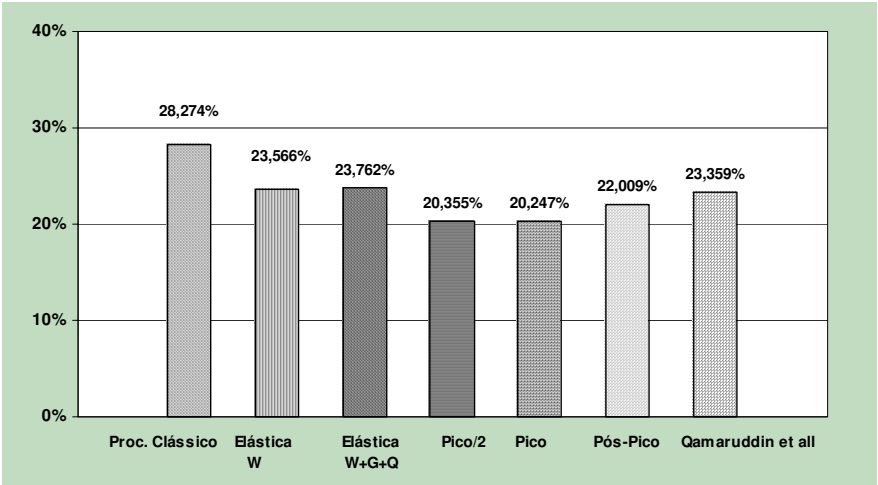


Gráfico 8:64 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso III: F-X: Membro A

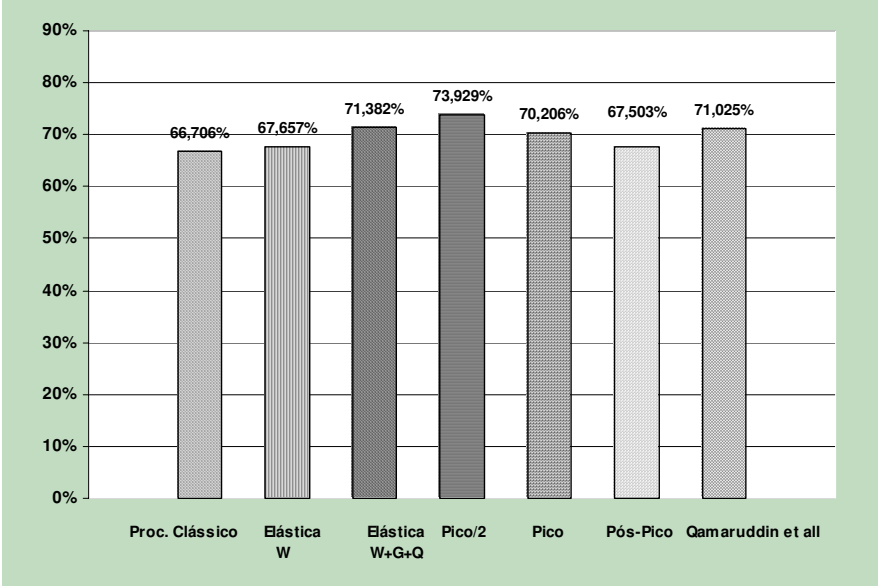


Gráfico 8:65 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso III: F-X: Membro B

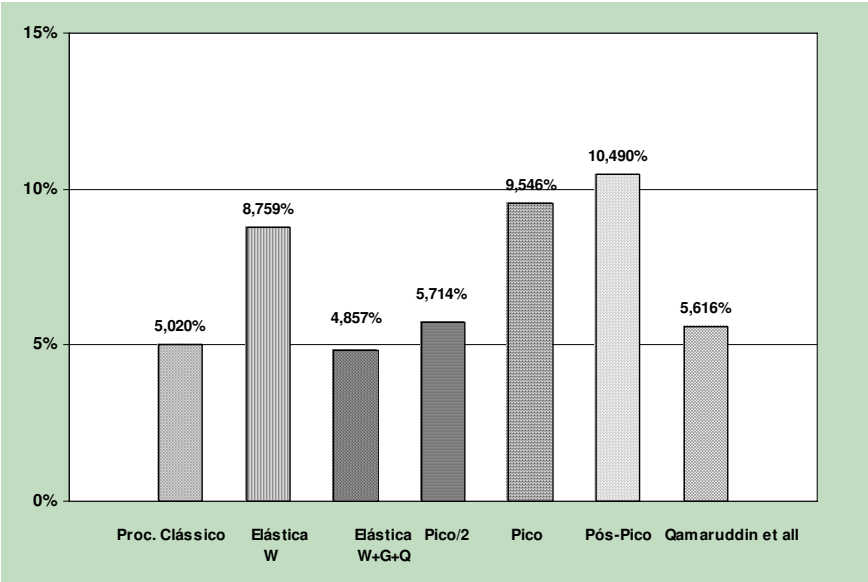


Gráfico 8:66 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-A - Caso III: F-X: Membro C

8.31 Modelo III-B Caso III – F+X

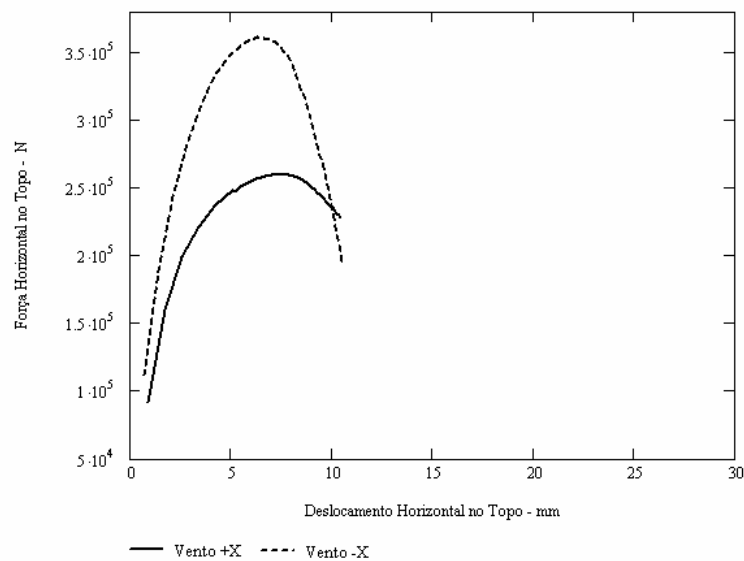


Figura 8:103 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo III-B: Caso III – F+X

Os deslocamentos horizontais máximos obtidos foram de 7,506 mm e 6,279 mm, correspondentes, respectivamente, aos valores máximos das forças horizontal agindo segundo as direções +X e -X. As forças máximas alcançadas para estas duas situações, 259,70 kN e 361,20 kN, o que conduziu a fatores de carga de 2,01 e 2,79, respectivamente.

8.31.1 Distribuição da Força Horizontal

8.31.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	1.000	1,200	108.333,33	24,190	31.313,26
B	1.000	1.800	0,556	320.271,97	71,515	92.573,17
C	2.200	800	2,750	19.234,24	4,295	5.559,57

Tabela 8:167 - Distribuição de força cortante – Modelo III-B – Caso III : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	31.313,26	31.366,90	-0,171	24,232
B	92.573,17	87.641,67	5,627	67,705
C	5.559,57	10.437,43	-46,734	8,063

Tabela 8:168 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-B – Caso III : Fase Elástica – F+X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	31.313,26	42.711,57	-26,687	32,996
B	92.573,17	70.687,51	30,961	54,608
C	5.559,57	16.046,91	-65,354	12,397

Tabela 8:169 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-B – Caso III: Fase Elástica – F+X₁+G+Q

8.31.1.2 Fase de Pico

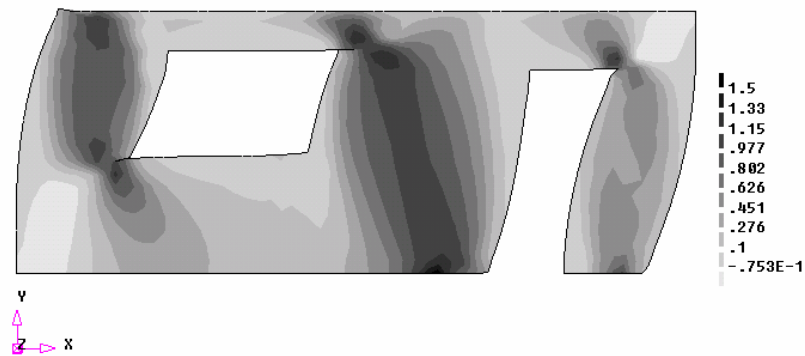


Figura 8:104 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III-B – Caso III - F+X – N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	76.372,50	29,412
B	145.564,15	56,060
C	37.723,19	14,528

Tabela 8:170 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B – Caso III - Fase de Pico – F+X

8.31.1.3 Fase de Fmax/2

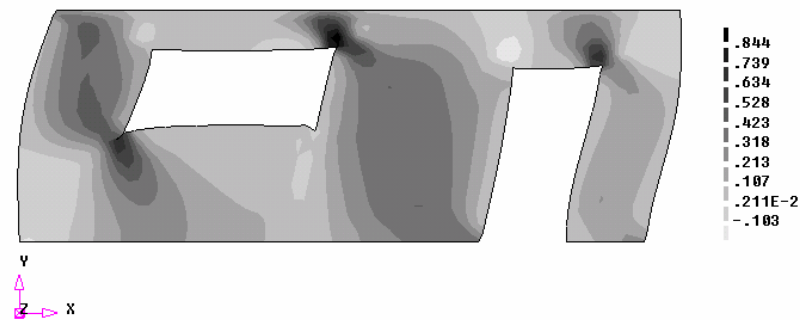


Figura 8:105 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 – Modelo III-B – Caso III - F+X – N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	42.790,05	32,946
B	71.393,05	54,968
C	15.697,32	12,086

Tabela 8:171 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B – Caso III : Fase de Fmax/2 – F+X

8.31.1.4 Fase de Pós Pico



Figura 8:106 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo III-B - Caso III - F+X N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	74.645,04	29,261
B	141.807,72	55,590
C	38.645,28	15,149

Tabela 8:172 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-B - Caso III : Fase Pós Pico - F+X

8.31.2 Modelo III-B Caso III - F+X - Gráficos

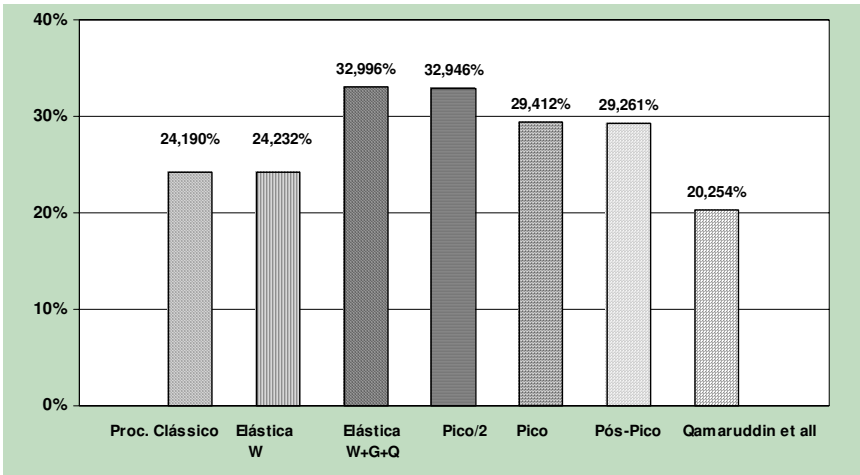


Gráfico 8:67 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso III: F+X: Membro A

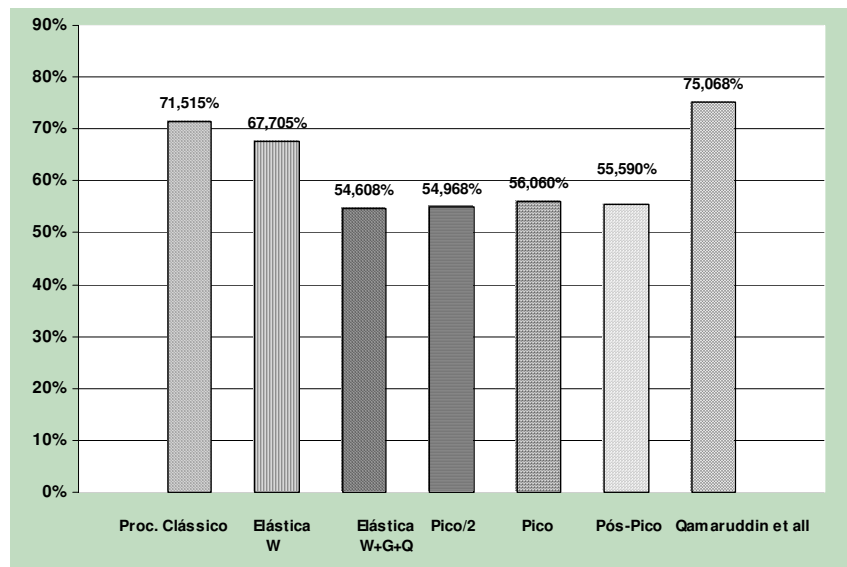


Gráfico 8:68 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso III: F+X: Membro B

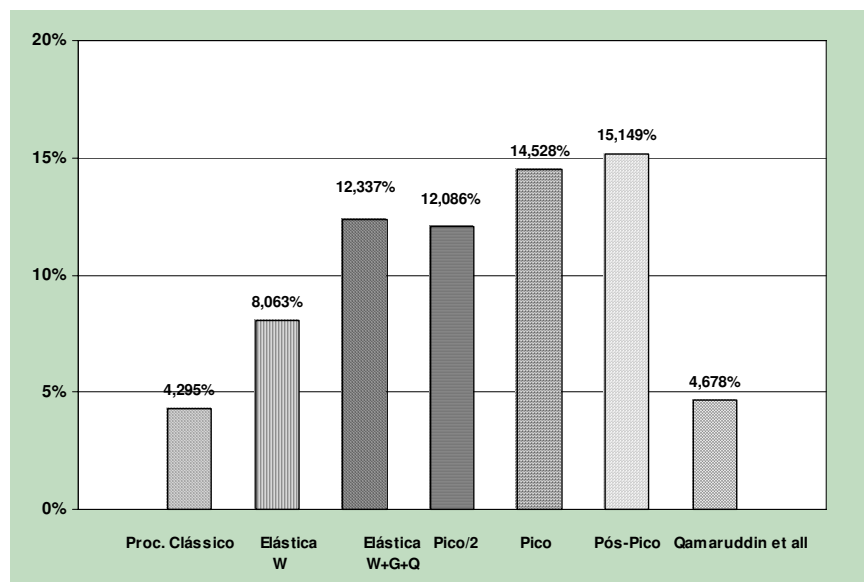


Gráfico 8:69 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso III: F+X: Membro C

8.32 Modelo III-B Caso III – F-X

8.32.1 Distribuição da Força Horizontal

8.32.1.1 Fase Elástica

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	31.313,26	30.034,29	4,258	23,202
B	92.573,17	88.706,20	4,539	68,528
C	5.559,57	10.705,51	-48,068	8,270

Tabela 8:173 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-B - Caso III : Fase Elástica – F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	31.313,26	18.689,62	67,544	14,438
B	92.573,17	105.660,35	-12.386	81,625
C	5.559,57	5.096,03	9,096	3,937

Tabela 8:174 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo III-B - Caso III: Fase Elástica – F-X₊G+Q

8.32.1.2 Fase de Pico

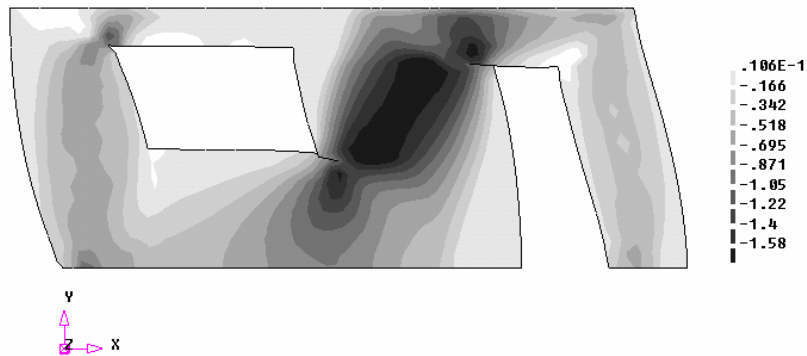


Figura 8:107 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico – Modelo III-B - Caso III – F-X – N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	51.137,57	14,159
B	280.836,18	77,756
C	29.203,16	8,086

Tabela 8:175 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B - Caso III - Fase de Pico – F-X

8.32.1.3 Fase de Fmax/2

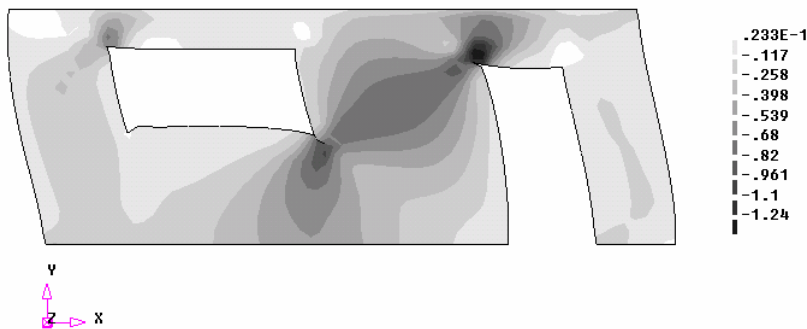


Figura 8:108 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 – Modelo III-B - Caso III – F-X – N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	23.479,29	13,000
B	147.788,79	81,827
C	9.343,33	5,173

Tabela 8:176 - Distribuição da força horizontal – Modelo III-B - Caso III : Fase de Fmax/2 – F-X

8.32.1.4 Fase de Pós Pico

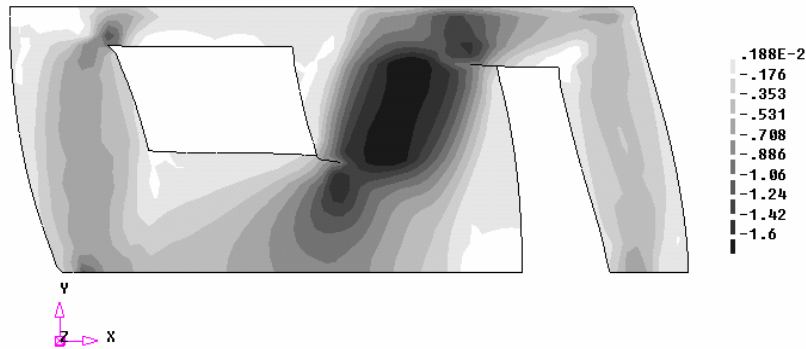


Figura 8:109 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo III-B -Caso III - F-X
N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	52.511,43	14,894
B	269.924,33	76,562
C	30.121,17	8,544

Tabela 8:177 - Distribuição da força horizontal - Modelo III-B -Caso III : Fase Pós Pico - F-X

8.32.2 Modelo III-B Caso III - F-X - Gráficos

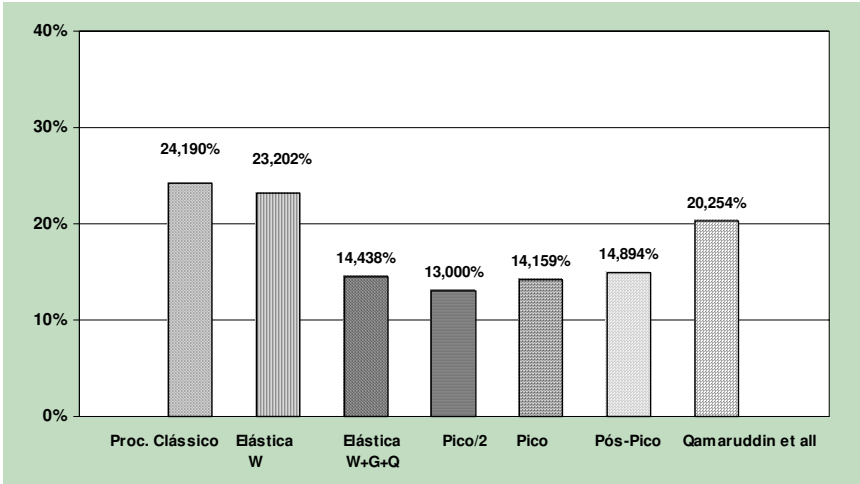


Gráfico 8:70 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso III: F-X: Membro A

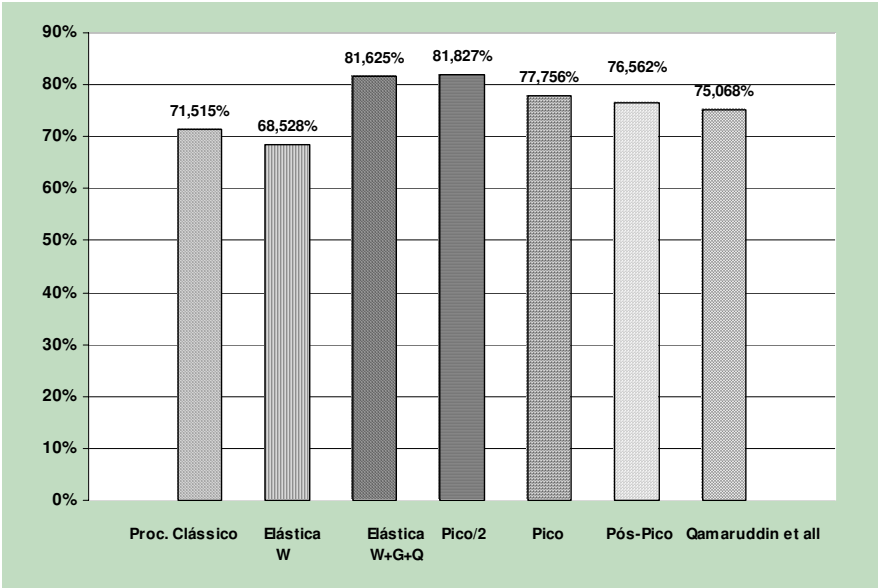


Gráfico 8:71 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso III: F-X: Membro B

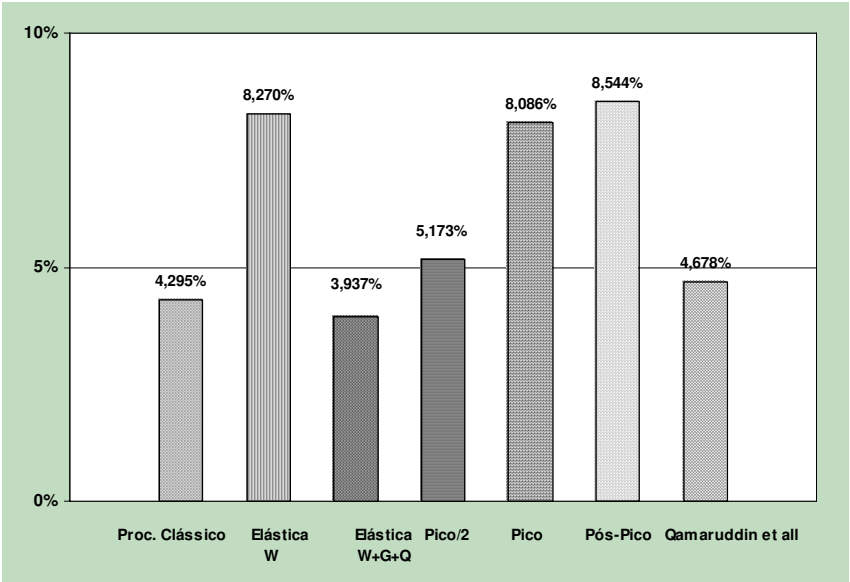


Gráfico 8:72 - Distribuição da força horizontal: Modelo III-B - Caso III: F-X: Membro C

8.33 Modelo IV Caso III – F+X

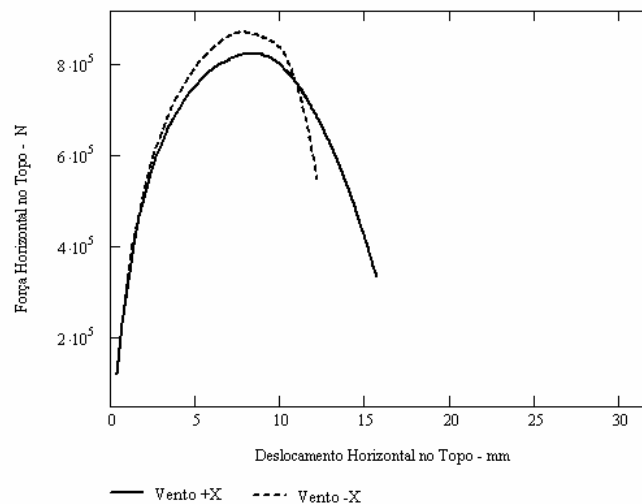


Figura 8:110 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo IV: Caso III – F+X

Os deslocamentos horizontais máximos obtidos foram de 8,397 mm e 7,754 mm, correspondentes, respectivamente, aos valores máximos das forças horizontais agindo segundo as direções +X e -X. As forças máximas alcançadas para estas duas situações, 825,10 kN e 872 kN, o que conduziu a fatores de carga de 6,37 e 6,74, respectivamente.

8.33.1 Distribuição da Força Horizontal

8.33.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.200	2.000	0,600	291.666,67	30,781	39.844,45
B	1.200	3.600	0,333	570.510,84	60,208	77.937,22
C	2.200	1.600	1,375	85.384,42	9,011	11.664,33

Tabela 8:178 - Distribuição de força cortante – Modelo IV – Caso III : Fase Elástica – F+X – Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	39.844,45	36.885,88	8,021	28,495
B	77.937,22	75.442,63	3,307	58,281
C	11.664,33	17.117,49	-31,857	13,224

Tabela 8:179 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo IV – Caso III : Fase Elástica – F+X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	39.844,45	34.386,63	15,872	26,564
B	77.937,22	69.942,14	11,431	54,032
C	11.664,33	25.117,22	-53,560	19,404

Tabela 8:180 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo IV - Caso III: Fase Elástica - F+X₋+G+Q

8.33.1.2 Fase de Pico

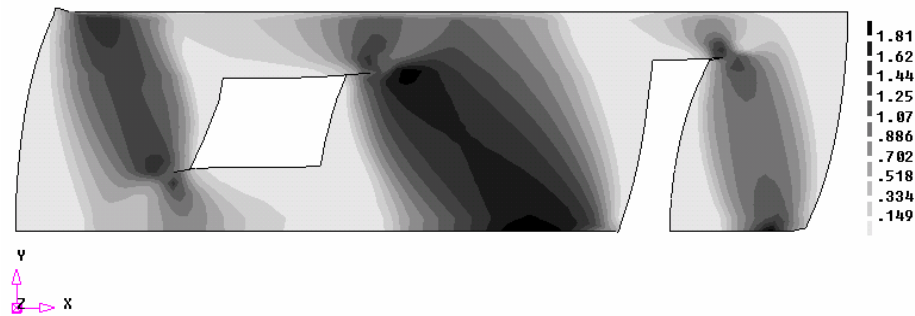


Figura 8:111 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo IV - Caso III - F+X - N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	195.017,94	23,636
B	506.366,45	61,372
C	123.702,75	14,993

Tabela 8:181 - Distribuição da força horizontal - Modelo IV - Caso III - Fase de Pico - F+X

8.33.1.3 Fase de Fmax/2

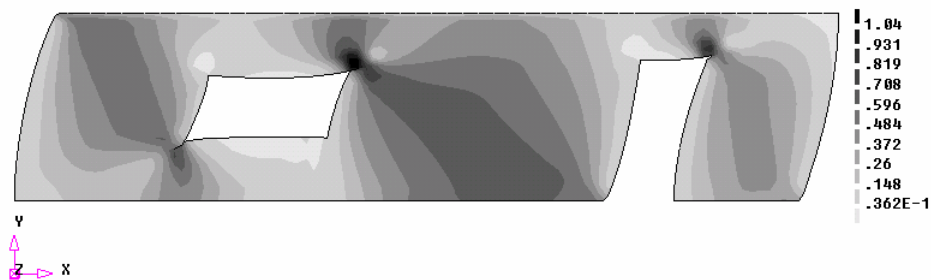


Figura 8:112 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 - Modelo IV - Caso III - F+X - N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	106.722,84	25,869
B	243.369,87	58,991
C	62.459,46	15,140

Tabela 8:182 - Distribuição da força horizontal - Modelo IV - Caso III : Fase de Fmax/2 - F+X

8.33.1.4 Fase de Pós Pico

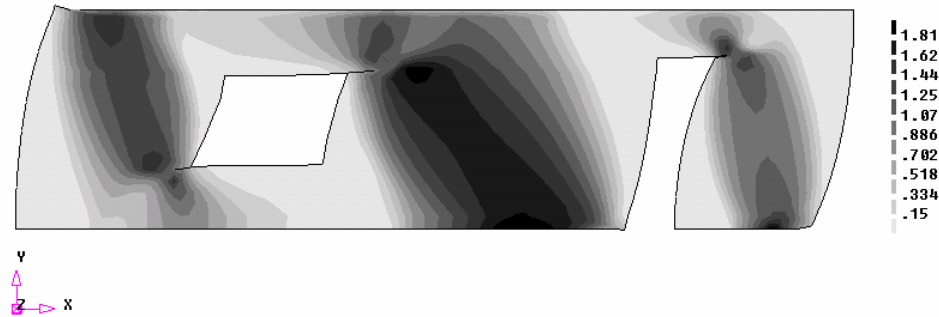


Figura 8:113 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico - Modelo IV - Caso III - F+X
N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	191.724,45	23,484
B	499.956,65	61,238
C	124.741,82	15,279

Tabela 8:183 - Distribuição da força horizontal - Modelo IV - Caso III : Fase Pós Pico - F+X

8.33.2 Modelo IV Caso III – F+X – Gráficos

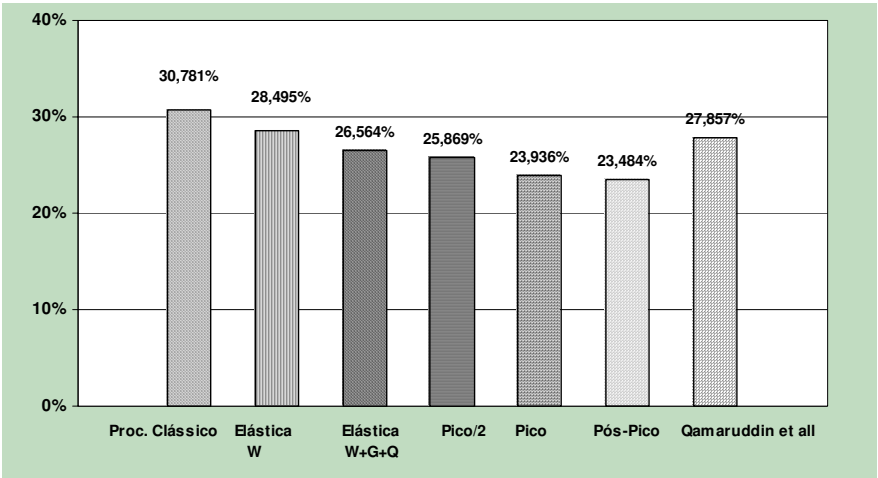


Gráfico 8:73 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV - Caso III: F+X: Membro A

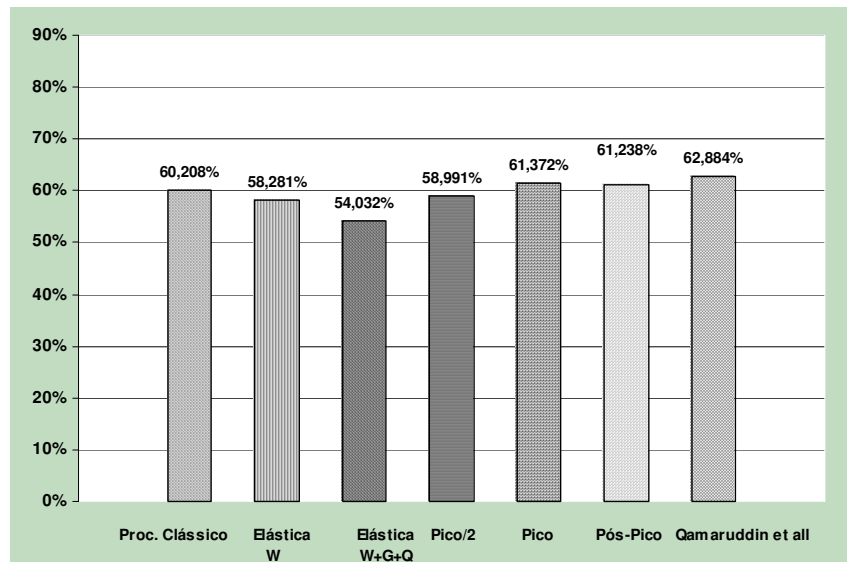


Gráfico 8:74 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV - Caso III: F+X: Membro B

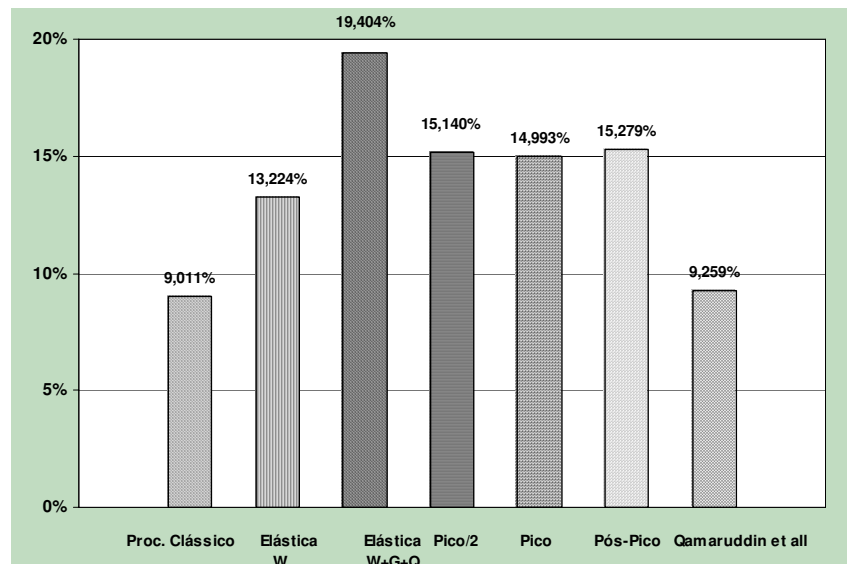


Gráfico 8:75 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV - Caso III: F+X: Membro C

8.34 Modelo IV Caso III – F-X

8.34.1 Distribuição da Força Horizontal

8.34.1.1 Fase Elástica

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	39.844,45	31.928,09	24,794	24,665
B	77.937,22	77.365,74	0,739	59,767
C	11.664,33	20.152,17	-42,119	15,568

Tabela 8:184 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo IV - Caso III : Fase Elástica – F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	39.844,45	34.427,33	15,735	26,596
B	77.937,22	82.866,23	5,948	64,016
C	11.664,33	12.152,43	-4,016	9,388

Tabela 8:185 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo IV - Caso III: Fase Elástica - F-X_{G+Q}

8.34.1.2 Fase de Pico

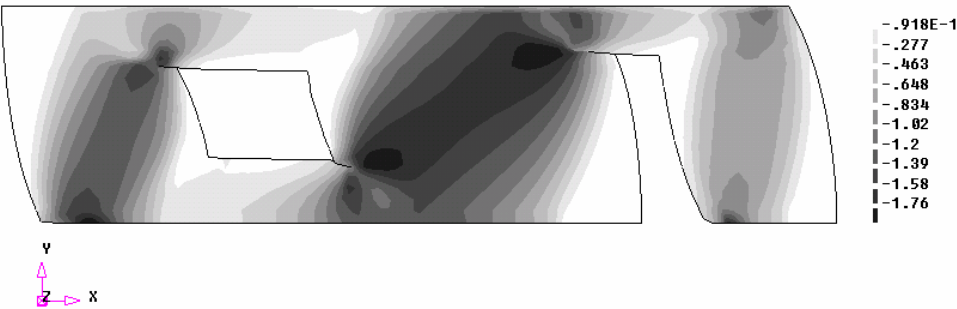


Figura 8:114 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico - Modelo IV - Caso III - F-X - N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	199.420,91	22,870
B	578.068,38	66,294
C	94.494,97	10,837

Tabela 8:186 - Distribuição da força horizontal - Modelo IV - Caso III - Fase de Pico - F-X

8.34.1.3 Fase de Fmax/2

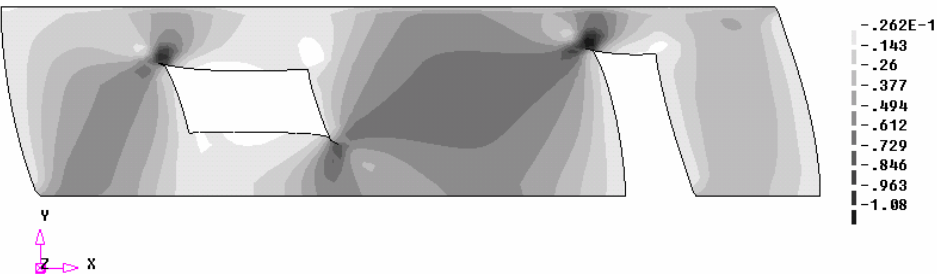


Figura 8:115 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2 - Modelo IV - Caso III - F-X - N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	105.435,24	24,172
B	277.251,48	63,564
C	53.492,95	12,264

Tabela 8:187 - Distribuição da força horizontal - Modelo IV - Caso III : Fase de Fmax/2 - F-X

8.34.1.4 Fase de Pós Pico

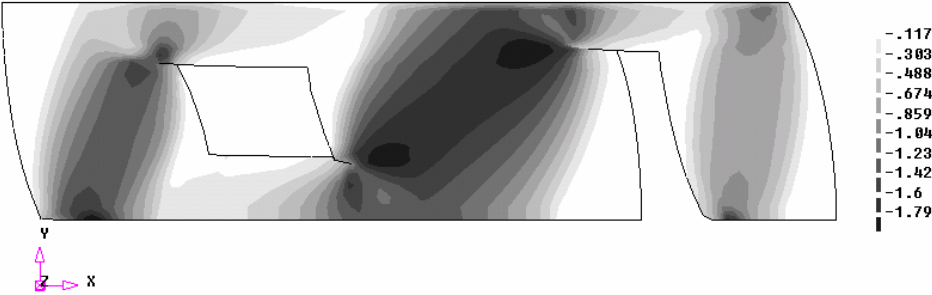


Figura 8:116 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico – Modelo IV -Caso III – F-X
N/mm2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	200.621,36	23,101
B	572.449,87	65,916
C	95.379,12	10,983

Tabela 8:188 - Distribuição da força horizontal – Modelo IV -Caso III : Fase Pós Pico – F-X

8.34.2 Modelo IV Caso III – F-X – Gráficos

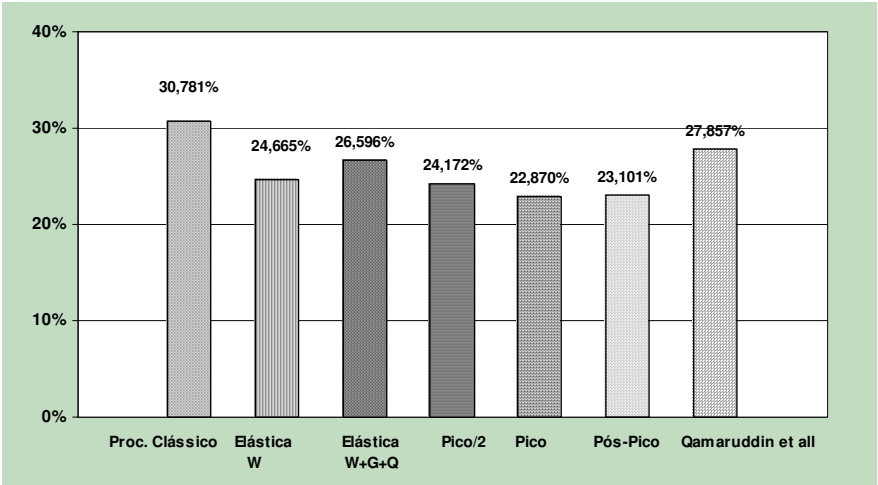


Gráfico 8:76 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV – Caso III: F-X: Membro A

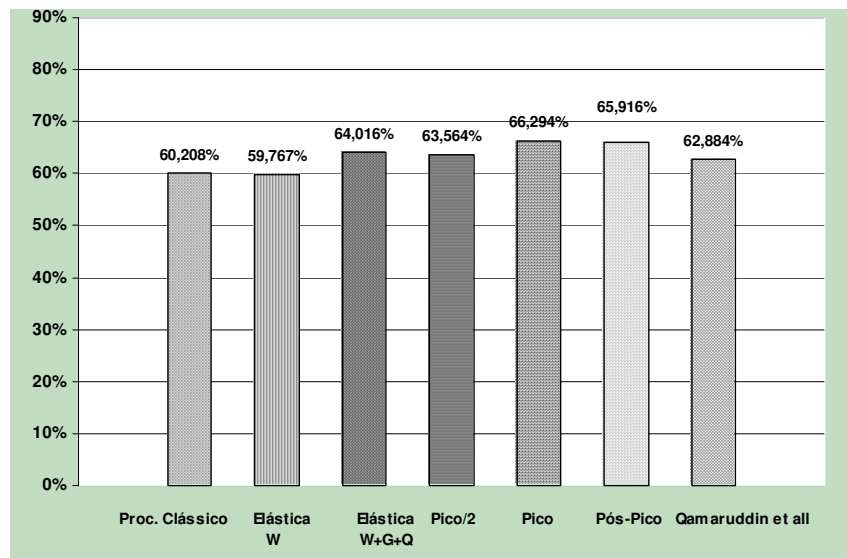


Gráfico 8:77 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV - Caso III: F-X: Membro B

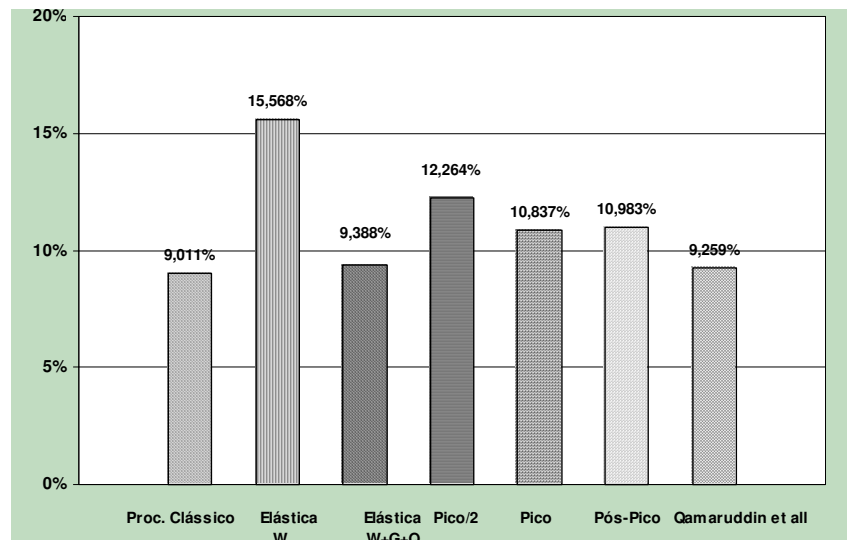


Gráfico 8:78 - Distribuição da força horizontal: Modelo IV - Caso III: F-X: Membro C

8.35 Modelo V - Caso III - F+X e F-X

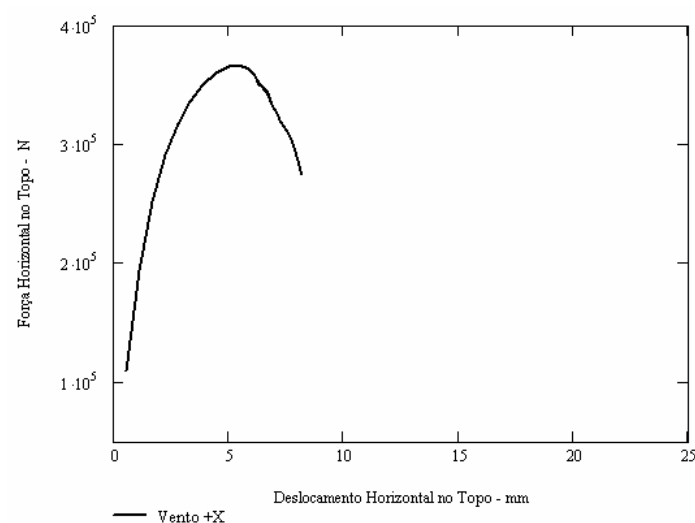


Figura 8:117 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal - Modelo V: Caso III - F+X e F-X

O deslocamento horizontal máximo obtido foi de 5,558 mm, correspondente a uma força horizontal máxima de 366 kN, o que perfaz um fator de carga de 2,83.

8.35.1 Distribuição da Força Horizontal

8.35.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.100	1.400	1,273	205.755,91	33,333	43.148,67
B	1.100	1.400	1,273	205.755,91	33,333	43.148,67
C	1.100	1.400	1,273	205.755,91	33,333	43.148,67

Tabela 8:189 - Distribuição de força cortante-Modelo V- Caso III: Fase Elástica-F+X e F-X-Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	43.148,67	38.559,26	11,902	29,788
B	43.148,67	53.681,56	-19,621	41,470
C	43.148,67	37.205,18	15,975	28,742

Tabela 8:190 - Comparação de distribuição de força cortante-Modelo V-Caso III: Fase Elástica-F+X e F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	43.148,67	36.534,87	18,103	28,224
B	43.148,67	53.681,56	-19,621	41,470
C	43.148,67	39.229,57	9,990	30,306

Tabela 8:191 - Comparação de distribuição de força cortante - Modelo V - Caso III: Fase Elástica - F+X_₊G+Q e F-X_₊G+Q

8.35.1.2 Fase de Pico

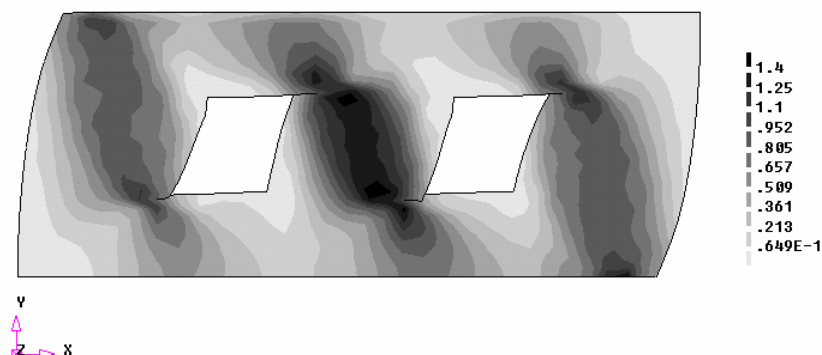
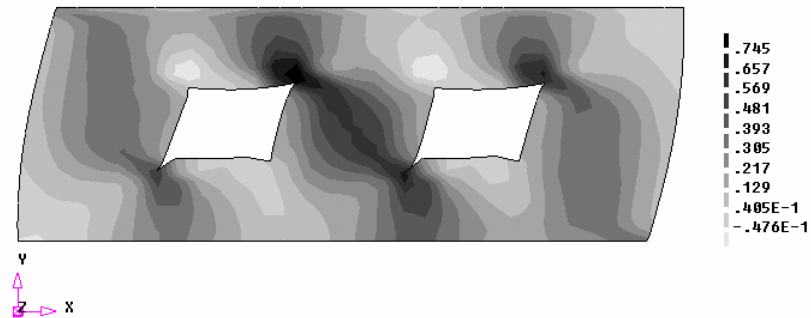


Figura 8:118 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico-Modelo V-Caso III-F+X e F-X- N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	103.035,90	28,149
B	158.694,95	43,354
C	104.309,74	28,497

Tabela 8:192 - Distribuição da força horizontal – Modelo V – Caso III - Fase de Pico – F+X e F-X

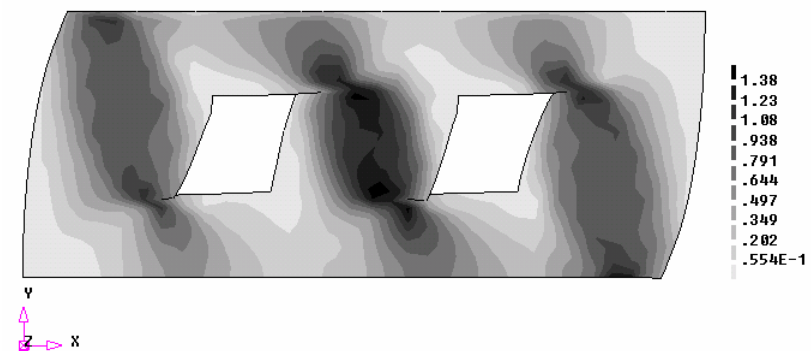
8.35.1.3 Fase de $F_{max}/2$

Figura 8:119 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de $F_{max}/2$ -Modelo V-Caso III- F+X e F-X- N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	50.182,40	27,365
B	82.255,73	44,856
C	50.941,16	27,779

Tabela 8:193 - Distribuição da força horizontal – Modelo V – Caso III : Fase de $F_{max}/2$ – F+X e F-X

8.35.1.4 Fase de Pós Pico

Figura 8:120 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico-Modelo V-Caso III-F+X e F-X- N/mm^2

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	104.432,76	29,663
B	142.300,93	40,419
C	105.327,57	29,917

Tabela 8:194 - Distribuição da força horizontal – Modelo V – Caso III : Fase Pós Pico – F+X e F-X

8.35.2 Modelo V - Caso II - F+X e F-X - Gráficos

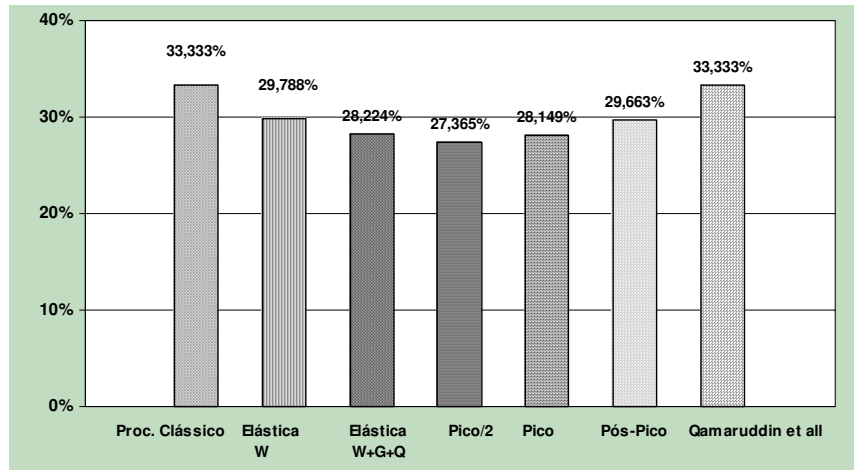


Gráfico 8:79 - Distribuição da força horizontal: Modelo V - Caso III: F+X e F-X: Membro A

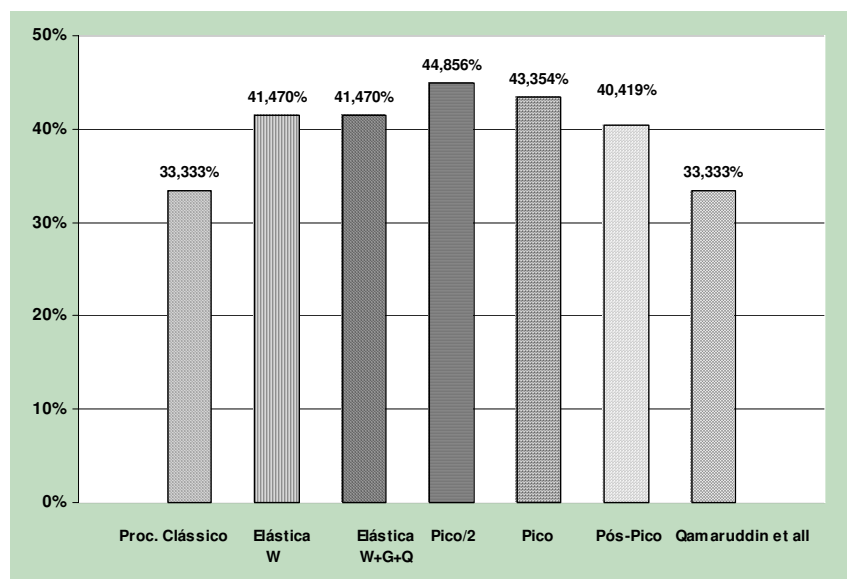


Gráfico 8:80 - Distribuição da força horizontal: Modelo V - Caso III: F+X e F-X: Membro B

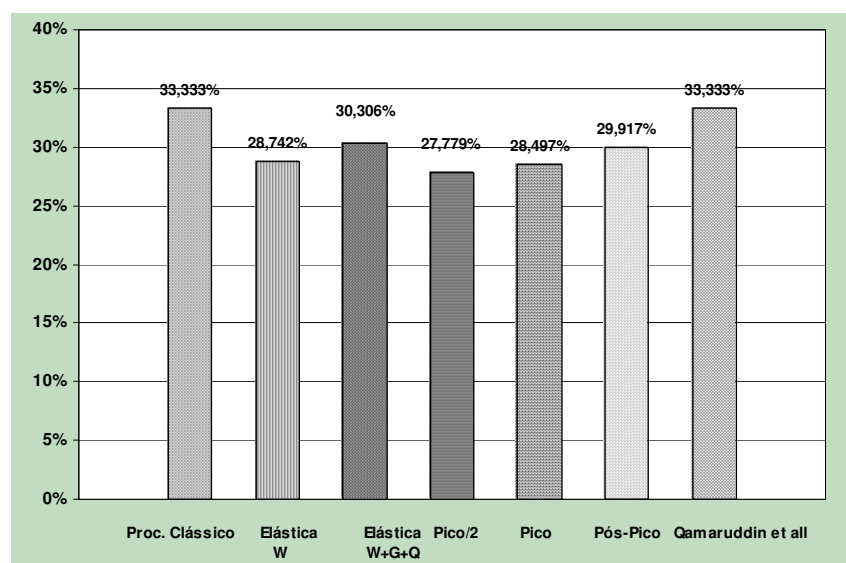


Gráfico 8:81 - Distribuição da força horizontal: Modelo V - Caso III: F+X e F-X: Membro C

8.36 Modelo VI – Caso III – F+X e F-X

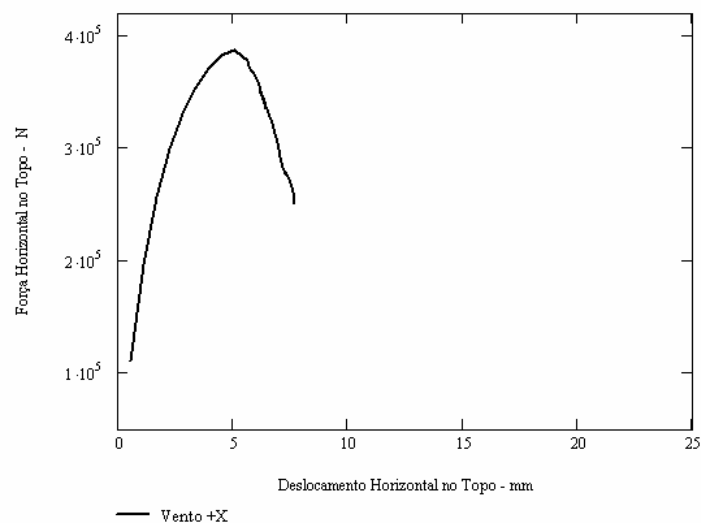


Figura 8:121 - Força Horizontal x Deslocamento Horizontal – Modelo VI: Caso III – F+X e F-X

O deslocamento horizontal máximo obtido foi de 5,06 mm, correspondente a uma força horizontal máxima de 387 kN, o que perfaz um fator de carga de 2,99.

8.36.1 Distribuição da Força Horizontal

8.36.1.1 Fase Elástica

Membro	Altura (h, mm)	Comprimento (L, mm)	Relação h/L	Rigidez Relativa (N/mm)	Percentual (%)	Força Cortante (N)
A	1.100	1.000	1,100	125.028,62	21,774	28.185,45
B	1.100	2.000	0,550	324.155,84	56,452	73.075,10
C	1.100	1.000	1,100	125.028,62	21,774	28.185,45

Tabela 8:195 - Distribuição de força cortante-Modelo VI- Caso III: Fase Elástica-F+X e F-X-Proc. Clássico

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	28.185,45	22.514,36	25,189	17,393
B	73.075,10	85.172,83	-14,204	65,798
C	28.185,45	21.758,81	29,536	16,809

Tabela 8:196 - Comparação de distribuição de força cortante-Modelo VI-Caso III: Fase Elástica-F+X e F-X

Membro	Força Cortante (N)		Diferença Relativa (%)	Percentual MEF (Relativo à força aplicada)
	Procedimento Clássico	MEF		
A	28.185,45	21.201,10	32,943	16,378
B	73.075,10	85.172,83	-14,204	65,798
C	28.185,45	23.072,07	22,163	17,824

Tabela 8:197 - Comparação de distribuição de força cortante – Modelo VI – Caso III: Fase Elástica – F+X₊G+Q e F-X₊G+Q

8.36.1.2 Fase de Pico

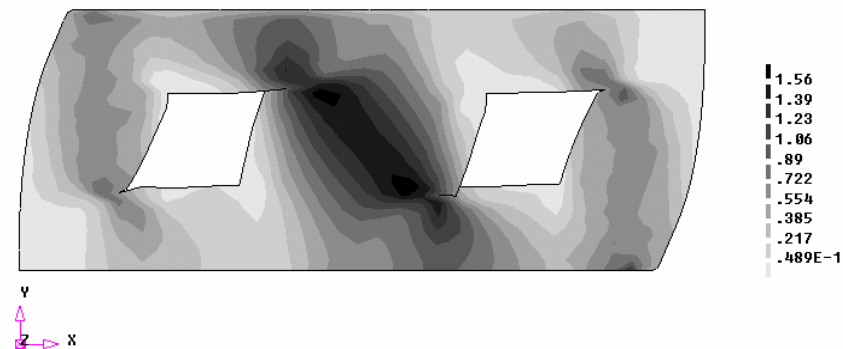


Figura 8:122 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pico-Modelo VI-Caso III-F+X e F-X- N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	57.760,85	14,925
B	270.793,74	69,972
C	58.452,37	15,104

Tabela 8:198 - Distribuição da força horizontal - Modelo VI - Caso III - Fase de Pico - F+X e F-X

8.36.1.3 Fase de Fmax/2

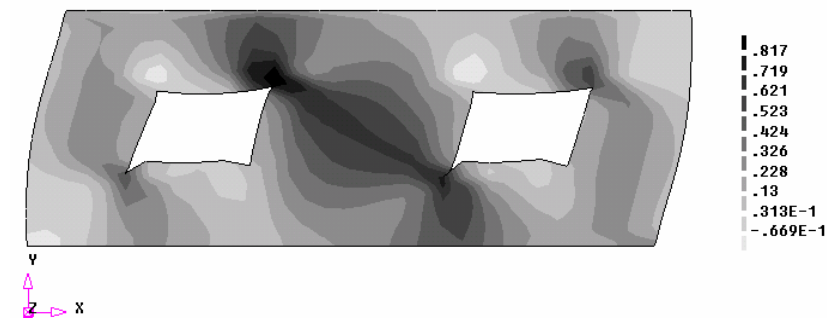


Figura 8:123 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de Fmax/2-Modelo VI-Caso III- F+X e F-X- N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	29.216,50	15,095
B	135.095,13	69,798
C	29.239,81	15,108

Tabela 8:199 - Distribuição da força horizontal - Modelo VI - Caso III : Fase de Fmax/2 - F+X e F-X

8.36.1.4 Fase de Pós Pico

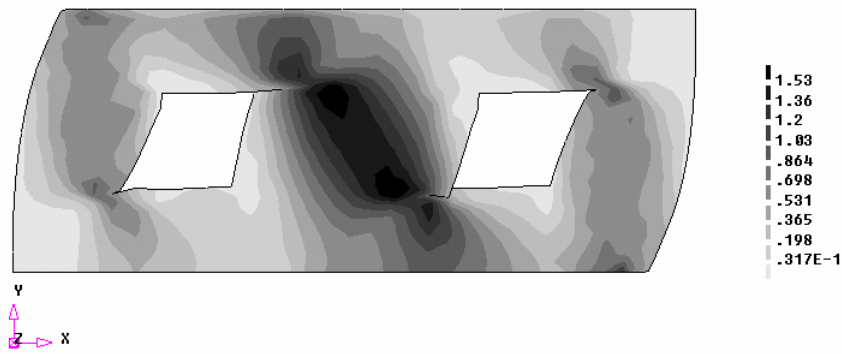


Figura 8:124 - Distribuição das tensões de cisalhamento na fase de pós pico-Modelo VI-Caso III-F+X e F-X- N/mm²

Membro	Força Cortante (N)	% Relativo da Força Aplicada
A	58.485,10	15,726
B	254.221,44	68,358
C	59.191,00	15,916

Tabela 8:200 - Distribuição da força horizontal - Modelo V - Caso III : Fase Pós Pico - F+X e F-X