

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE ESTRUTURAS



MARIELLA FALCÃO DE LIMA OLIVEIRA SANTOS

**PROCEDIMENTO ADAPTATIVO DE CORREÇÃO DE CONTRA FLECHA
UTILIZANDO PROCESSO ESTOCÁSTICO EM PONTES EM BALANÇOS
SUCESSIVOS CONSIDERANDO FENÔMENO DE FLUÊNCIA**

Recife

2020

MARIELLA FALCÃO DE LIMA OLIVEIRA SANTOS

**PROCEDIMENTO ADAPTATIVO DE CORREÇÃO DE CONTRA FLECHA
UTILIZANDO PROCESSO ESTOCÁSTICO EM PONTES EM BALANÇOS
SUCESSIVOS CONSIDERANDO FENÔMENO DE FLUÊNCIA**

Tese de Doutorado apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Silvana Maria Bastos Afonso Silva

Coorientador: Prof. Dr. Renato de S. Motta

Recife
2020

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

S237p

Santos, Mariella Falcão de Lima Oliveira.

Procedimento adaptativo de correção de contra flecha utilizando processo estocástico em pontes em balanços sucessivos considerando fenômeno de fluência / Mariella Falcão de Lima Oliveira Santos – Recife, 2020.

190 f.: figs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Silvana Maria Bastos Afonso da Silva.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.

Inclui referências e anexos.

1. Engenharia Civil. 2. Balanços Sucessivos. 3. Contra Flecha. 4. Otimização. 5. Incerteza. 6. Monte Carlo. I. Silva, Silvana Maria Bastos Afonso da (Orientadora). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2020-153

MARIELLA FALCÃO DE LIMA OLIVEIRA SANTOS

**PROCEDIMENTO ADAPTATIVO DE CORREÇÃO DE CONTRA FLECHA
UTILIZANDO PROCESSO ESTOCÁSTICO EM PONTES EM BALANÇOS
SUCESSIVOS CONSIDERANDO FENÔMENO DE FLUÊNCIA**

Tese de Doutorado apresentado ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Aprovada em: 28 / 02 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renato de Siqueira Motta (Coorientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Bernardo Horowitz (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Paulo Marcelo Vieira Ribeiro (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira (Examinador Externo)
Universidade Católica de Pernambuco

Prof. Dr. Leonardo Oliveira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

*À Deus,
aos meus pais e à minha família.*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus e a sua equipe espiritual pela vida, pela proteção e as inúmeras oportunidades que me foram dadas para que eu pudesse estar aqui e realizar este trabalho.

Ao meu pai, Guilherme (*in memoriam*), que deve estar muito orgulhoso, agradeço o seu amor e carinho, pois transformei toda a saudade em esforço para trabalhar nessa pesquisa.

À minha mãe, Suely, minha fortaleza, pois todas as vezes que tudo desmoronou, foi ela quem me fez superar as dificuldades e acreditar que tudo é possível.

À minha família, Mirella, Raphael, Tiago e Pedro, que preenchem minha vida de alegria e estão presentes em todos os momentos, com amor sempre torcendo pelo meu sucesso.

À Babua e Leidjane, duas mães que a vida me deu e sempre me amparam nos momentos em que a minha fé em mim mesma fraqueja.

A Universidade Federal de Pernambuco, ao programa de Pós Graduação de Engenharia Civil e ao órgão financiador CNPq, por permitirem o desenvolvimento dessa pesquisa.

À professora Silvana Bastos, pelo aceite em orientar este trabalho, apoiando em muita coisa e me ajudando nessa etapa de dificuldade para a conclusão. Ao meu coorientador, Renato Motta, amigo fiel de longos anos que aceitou a difícil tarefa de me ajudar no desenvolvimento deste trabalho, me pegando pela mão, somente como um amigo faz, meu muito obrigado!

Aos professores da banca de avaliação pelo aceite em examinar e contribuir com melhorias na pesquisa.

Ao professor Bernardo Horowitz, que sempre me orientou pela Engenharia e que sempre demonstrou sua preocupação e carinho por mim. E ao professor Ézio Araújo, por sempre se preocupar com minha saúde e ter me dado o melhor conselho de todos no momento certo.

A todos os professores, pela compreensão e por terem transmitido os conhecimentos para aumentar minha disciplina e necessidade de aprendizado.

As minhas amigas Bárbara Fernanda, Liliane Fonseca, Marília Dantas e Pâmela Santos, por serem anjos na minha vida, cuidando de mim.

Aos meus amigos, que de alguma maneira me auxiliaram, com incentivo ou com uma simples prece.

A todos os profissionais com quem já trabalhei, pois a troca de conhecimentos permitiu aplicar e ampliar meu aprendizado.

E aos meus alunos, que apesar de me darem muito trabalho é o real motivo para que eu obtenha essa titulação, para auxiliar a todos eles.

“[...] pelo menos sei quem eu era quando me levantei hoje de manhã, mas acho que devo ter mudado várias vezes desde então” (CARROLL, 1998, p. 61).

RESUMO

O método construtivo dos Balanços Sucessivos solicita verificações adicionais devido à técnica construtiva, pois os segmentos já executados são responsáveis por suportar as novas cargas de construção, aumentando as deformações à medida que a obra prossegue. Essas deformações atingem valores significativos e, durante a construção, são controladas com a aplicação de contra flechas corretivas para compensar os deslocamentos e atender o perfil vertical. Com os dados dos deslocamentos obtidos em cada etapa executada, associado a um procedimento de otimização, pelo Método dos Mínimos Quadrados, é permitido atualizar o f_{ck} e a umidade relativa do modelo estrutural a cada etapa e minimizar a diferença entre deformações reais e previstas. Um simulador estrutural foi desenvolvido e incorporado ao procedimento de otimização, considerando as incertezas das variáveis de projeto em todas as etapas de cálculo através de análise estocástica, pela simulação de Monte Carlo. O fenômeno da fluência, também, é incorporado estatisticamente com análises em diferentes idades na estrutura. Uma nova configuração deformada é prevista e determinado novos valores para as contra flechas de maneira mais realística para os segmentos que ainda não foram executados. Alguns modelos com a aplicação do método determinam novos valores para as contra flechas obtendo uma configuração de greide próxima ao projetado.

Palavras-chave: Balanços sucessivos. Contra flecha. Otimização. Incerteza. Monte Carlo.

ABSTRACT

In Cantilever Structures, additional checks are realized due to the construction technique, the segments are constructed from the previous ones, thus, the construction loads are supported by previous segments. When the cantilever is moved forward, the deformations increase, and corrections need to be applied still in construction stage. The use of camber is a method which displacements of corrections are applied to compensate the deformations and the vertical profile of the design can be achieved. The monitoring of deformations data obtained in each stage of execution in these structures with an optimization procedure, by the Least Squares Method, to update the f_{ck} and the relative humidity of structural model in each stage, and minimizes the differences between the real and design displacements. A structural simulator was developed and incorporated into the optimization procedure, considering the uncertainties of the design variables at all stages of calculation through stochastic analysis, by Monte Carlo simulation. The creep is used statistically with analyzes at different ages in the structure. Using the new deformation shape is possible to determine new values for the camber, more realistic, and applies them for the next segments. Some models using the proposed method determine new values for the camber, obtaining the vertical profile of the design.

Keywords: Cantilever. Camber. Optimization. Uncertainty. Monte Carlo simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sequência de construção de ponte em Balanços Sucessivos.	27
Figura 2 - Viga com a deformação, y , estimada em projeto (a); Contra flecha, cf , aplicada à viga (b).	28
Figura 3 - Treliça sob o tabuleiro com o vão navegável livre.	29
Figura 4 - Estruturas isoladas isostáticas em balanço (a); Viga contínua hiperestática (b).	29
Figura 5 - Construção de aduelas simétricas, partindo dos pilares.	31
Figura 6 - Construção de aduela com apoio temporário.	31
Figura 7 - Construção de aduela com apoio treliçado temporário.	31
Figura 8 - Fechamento articulado, viga em balanço.	32
Figura 9 - Fechamento com vão suspenso articulado.	32
Figura 10 - Ligação contínua com aduela de fechamento.	33
Figura 11 - Sequência de construção para uma etapa de operação otimizada em 7 dias. .	33
Figura 12 - Diagrama de Momento Fletor da estrutura: fase de construção (1) e fase da ponte em operação com continuidade (2).	34
Figura 13 - Cabos em uma Ponte em Balanços Sucessivos: Cabos de viga em balanço (A – azul) e Cabos integrados (B – preto).	35
Figura 14 - Desnível em obra com a execução final da estrutura (azul) e a diferença de deformação (vermelho).	36
Figura 15 - Desnível na execução entre duas aduelas.	37
Figura 16 - Gráfico esquemático dos Módulos de Elasticidade: Tangente (E _{tg}), Tangente inicial (E _o) e Secante (E _{sec}).	39
Figura 17 - Deformações para estrutura executada em uma única etapa (I) e em etapas de construção (II).	41
Figura 18 - Deformação excessiva a meio vão devido a fluência (I); deformação prevista em projeto e medidas na Ponte de Palau durante a vida útil (II) e Ponte de Palau antes e após a ruptura (III).	42
Figura 19 - Fluência no concreto sob efeito de uma tensão constante.	44
Figura 20 - Diagrama de deformações (a) e diagrama de contra flechas (b).	47
Figura 21 - Esquema com contra flecha absoluta e relativa.	48
Figura 22 - Viga genérica com 4 aduelas executada em Balanços Sucessivos.	49

Figura 23 - Viga genérica determinando a projeção da posição do nó 3, após a execução da aduela 2.	50
Figura 24 - Esquema para a determinação das contra flechas e níveis atingidos fase por fase.	52
Figura 25 - Posição dos segmentos após aplicação das cargas incluindo as contra flechas.	53
Figura 26 - Exemplo do gráfico de contra flecha, fornecido pelo MIDAS/Civil.	54
Figura 27 - Contra flecha corrigida para a aduela A2.	55
Figura 28 - Contra flecha corrigida para a aduela A3.	55
Figura 29 - Etapas para determinar as contra flechas aplicadas às aduelas, considerando os dados obtidos nos levantamentos de campo.	56
Figura 30 - PDF de uma distribuição normal.	62
Figura 31 - PDF de uma distribuição lognormal.	63
Figura 32 - Fluxograma para cálculo das deformações.	70
Figura 33 - Fluxograma do programa desenvolvido.	72
Figura 34 - Discretização de uma malha.	74
Figura 35 - Tipos de elementos finitos: unidimensional, bidimensional e tridimensional.	75
Figura 36 - Graus de liberdade de viga à flexão.	76
Figura 37 - Deformações por estágio com fluência.	77
Figura 38 - Entrada de dados em formato .xlsx para o programa.	80
Figura 39 - Saída de dados no programa.	81
Figura 40 - Geometria, seção transversal e carregamentos.	81
Figura 41 - Coeficientes de fluência em cada estágio para cada barra devido a cada carregamento.	82
Figura 42 - Matriz de rigidez e vetor de força corrigida pelos coeficientes de fluência. ..	82
Figura 43 - Modelo genérico de viga engastada para validação da fundamentação teórica.	83
Figura 44 - Modelo genérico de viga biengastada para validação da fundamentação teórica.	83
Figura 45 - Modelo genérico de viga contínua para validação da fundamentação teórica.	84

Figura 46 - Deformações comparativas com o programa desenvolvido para os modelos 6 (a), 8 (b) e 10 (c).	85
Figura 47 - Curvas de deformações para os modelos 6(a), 8(b) e 10(c), análise incremental simples e em uma única etapa.....	86
Figura 48 - Curvas de deformações para os modelos 6, 8 e 10, análise incremental simples e com fluência.....	87
Figura 49 - Histograma da umidade relativa.	93
Figura 50 - Ajuste de curva de distribuição lognormal para cálculo da umidade relativa.	94
Figura 51 - Modelo genérico de viga engastada para comparação de contra flechas.	95
Figura 52 - Configuração das contra flechas de projeto determinística e estocástica para o modelo 1.	97
Figura 53 - Contra flechas de projeto determinística e estocástica diante da possível dispersão no modelo 1.	97
Figura 54 - Configuração das contra flechas de projeto determinística e estocástica para o modelo 3A.....	98
Figura 55 - Contra flechas de projeto determinística e estocástica diante da possível dispersão no modelo 3A.	99
Figura 56 - Comparação do resíduo final com a deformação acumulada total para o modelo 1 em todos os levantamentos de campo (%).	101
Figura 57 - Contra flechas corrigidas aplicada a estrutura com dados de campo do caso 1 no modelo 1.	102
Figura 58 - Contra flechas corrigidas aplicada a estrutura com dados de campo do caso 2 no modelo 1.	102
Figura 59 - Contra flechas corrigidas aplicada a estrutura com dados de campo do caso 3 no modelo 1.	103
Figura 60 - Contra flechas corrigidas aplicada a estrutura com dados de campo do caso 4 no modelo 1.	103
Figura 61 - Contra flechas corrigidas, projeto e correta para os dois processos do caso 4 no modelo 1. Correção determinística para execução do nó3 (a) e nó4 (b); Correção estocástica para execução do nó3 (c) e nó4 (d).	104
Figura 62 - Comparação do resíduo final com a deformação acumulada total para o modelo 3A em todos os levantamentos de campo (%).	105

Figura 63 - Contra flechas corrigidas, projeto e correta para os dois processos do caso 1 no modelo 3A. Correção determinística para execução do nó3 (a) e nó8 (b); Correção estocástica para execução do nó3 (c) e nó8 (d).....	106
Figura 64 - Contra flechas corrigidas aplicada a estrutura com dados de campo do caso 2 no modelo 3A.	107
Figura 65 - Contra flechas corrigidas aplicada a estrutura para dados de campo do caso 3 no modelo 3A.	107
Figura 66 - Contra flechas corrigidas, projeto e correta para os dois processos do caso 1 no modelo 1. Correção determinística para execução do (a) nó3 e (b) nó4; Correção estocástica para execução do (c) nó3 e (d) nó4.	108
Figura 67 - Seção longitudinal da ponte e detalhe das aduelas.	110
Figura 68 - Seção transversal das aduelas.	111
Figura 69 - Carregamento da forma de concretagem.	112
Figura 70 - Configuração das contra flechas absolutas inicial de projeto estocástico (m).....	115
Figura 71 - Comparativo das contra flechas corrigidas, projeto e correta do caso A.....	117
Figura 72 - Comparativo das contra flechas corrigida, projeto e correta do caso B.	119

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Propriedades do material e informações do estágio de construção	81
Tabela 2 - Modelos aplicados para validação da fundamentação teórica e principal resultado.....	84
Tabela 3 - Tempo de processamento e contra flechas para o modelo 1 pelo processo determinístico	89
Tabela 4 - Tempo de processamento e contra flechas para o modelo 1 em teste de convergência de MC	89
Tabela 5- Parâmetros da distribuição probabilística das variáveis geométricas	90
Tabela 6 - Desvio padrão de acordo com a classe de resistência obtido por ensaio em concreteiras na Suécia.....	92
Tabela 7 - Modelos utilizados para comparação de contra flechas	95
Tabela 8 - Cronograma genérico de execução da obra.....	96
Tabela 9 - Contra flecha de projeto para o modelo 1 (m).....	97
Tabela 10 - Contra flecha de projeto para o modelo 3A (m).....	98
Tabela 11 - Valores de f_{ck} e RH utilizados para os deslocamentos reais.....	100
Tabela 12 - Comportamento das contra flechas na execução de cada nó com o caso 1 no modelo 1	101
Tabela 13 - Comportamento das contra flechas na execução de cada nó com o caso 2 no modelo 1	102
Tabela 14 - Comportamento das contra flechas na execução de cada nó com o caso 3 no modelo 1	103
Tabela 15 - Comportamento das contra flechas na execução de cada nó com o caso 4 no modelo 1	104
Tabela 16 - Comportamento das contra flechas na execução de cada nó com o caso 2 no modelo 3A	107
Tabela 17 - Configuração superior e inferior dos cabos de protensão, longitudinalmente.	111
Tabela 18 - Dados do projeto	112
Tabela 19 - Cronograma de execução da obra	113
Tabela 20 - Cronograma dos elementos e carregamentos da estrutura	114
Tabela 21 - Contra flechas relativa inicial de projeto estocástico (cm).....	115

Tabela 22 - Valores de f_{ck} e RH utilizados para os deslocamentos reais, por Santos (2014).....	115
Tabela 23 - Deslocamentos isolados da estrutura em cada estágio para o caso A (cm)..	116
Tabela 24 - Valores de f_{ck} e RH para o caso A.....	116
Tabela 25 - Contra flechas relativa de projeto e corrigidas para o caso A (cm)	116
Tabela 26 - Deformações residuais para o caso A (cm)	117
Tabela 27 - Comparação das deformações residuais com a deformação acumulada total para o caso A (%)	118
Tabela 28 - Deslocamentos isolados da estrutura em cada estágio para o caso B (cm)..	118
Tabela 29 - Valores de f_{ck} e RH para o caso B	118
Tabela 30 - Contra flechas relativas de projeto e corrigidas para o caso B (cm)	119
Tabela 31 - Deformações residuais para o caso B (cm)	119
Tabela 32 - Comparação das deformações residuais com a deformação acumulada total para o caso B (%).....	120

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	AJUSTE DE CONTRA FLECHAS UTILIZANDO ANÁLISE ESTOCÁSTICA PARA PROCESSO DE CONSTRUÇÃO EM BALANÇOS SUCESSIVOS CONSIDERANDO FLUÊNCIA	20
1.2	METODOLOGIA PROPOSTA.....	22
1.3	OBJETIVOS	23
1.3.1	Objetivo Geral	23
1.3.2	Objetivos Específicos	23
1.4	CONSIDERAÇÕES E LIMITAÇÕES DO TRABALHO	24
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	25
2	COMPORTAMENTO DE PONTES CONSTRUÍDAS POR BALANÇOS SUCESSIVOS	27
2.1	A TÉCNICA CONSTRUTIVA	27
2.1.1	Vantagens e desvantagens do método dos balanços sucessivos	28
2.1.2	Estabilidade Estrutural	29
2.1.3	Execução do Tabuleiro	30
2.1.3.2	Execução do fechamento dos vãos	32
2.1.4	Etapas de Construção	33
2.1.5	Dosagem dos Materiais	34
2.1.6	Protensão	34
2.1.7	Contra Flecha	35
2.2	CONSIDERAÇÕES DE PROJETO	37
2.2.1	Cálculo da deformação pela Norma CEB-FIP (1993)	37
2.2.2	Propriedades do Concreto	38
2.2.2.1	Resistência Característica à Compressão do Concreto	38
2.2.2.2	Módulo de Elasticidade	39
2.2.3	Análise Incremental	40
2.2.4	Análise dos Efeitos dependentes do Tempo	42
2.2.4.1	Fluência.....	42
2.2.4.1.1	<i>Cálculo da Fluência do Concreto</i>	44
2.2.4.1.2	<i>Superposição da Fluência</i>	45
2.2.4.1.3	<i>Cálculo de Fluência segundo a Norma CEB-FIP (1993)</i>	46

2.2.5	Contra Flecha	47
2.2.5.1	Cálculo de Contra Flecha.....	47
2.2.5.1.1	<i>Método de PAIM</i>	52
2.2.5.1.2	<i>Método de PODOLNY e MULLER</i>	52
2.2.5.1.3	<i>Cálculo de Contra Flecha em Simulador Estrutural</i>	53
2.2.5.2.	Controle e correção de contra flecha durante a execução da Obra.....	54
2.2.5.2.1	<i>Método de Correção de Contra Flecha de OYAMADA</i>	54
2.2.5.2.2	<i>Método de Correção de Contra Flecha de SANTOS</i>	55
3	INCERTEZAS NAS VARIÁVEIS DO PROJETO ESTRUTURAL	57
3.1	INCERTEZAS.....	57
3.1.1	Tipos de incerteza	58
3.1.1.1	Incerteza física ou mecânica intrínseca	58
3.1.1.1.1	<i>Incerteza inerente às propriedades dos materiais</i>	58
3.1.1.1.2	<i>Incertezas inerentes às ações externas</i>	59
3.1.1.2	Incertezas do modelo matemático	59
3.1.1.3	Incerteza estatística.....	60
3.2	VARIÁVEIS DETERMINÍSTICAS E ALEATÓRIAS	60
3.2.1	Média	61
3.2.2	Variância	61
3.2.3	Desvio padrão e coeficiente de variação	61
3.3	DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE	62
3.3.1	Distribuição Normal	62
3.3.2	Distribuição Lognormal	63
3.4	AJUSTE DE DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA.....	63
3.4.1	Simulação de Monte Carlo	64
4	ASSIMILAÇÃO DE DADOS E AJUSTE HISTÓRICO	66
4.1	PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO UTILIZANDO O ACOMPANHAMENTO DAS DEFORMAÇÕES.....	66
4.1.1	Algoritmo do Método dos Mínimos Quadrados	67
4.1.2	Otimização utilizando o toolbox do MATLAB	69
4.1.2.1	Função lsqnonlin no MATLAB.....	70
4.2	CÁLCULO DAS CONTRA FLECHAS COM ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES.....	71

4.2.1	Programa de Análise Estrutural	72
4.2.2	Método dos Elementos Finitos	74
4.2.2.1	Abordagem pelo Método da Rigidez Direta	75
4.2.2.2	Superposição dos Efeitos e Matriz de Rigidez Global	76
4.2.3	Análise Incremental Construtiva no Programa	77
4.2.4	Fluência no Programa	77
4.3	FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA DE ANÁLISE ESTRUTURAL.....	80
4.3.1	Entrada e Saída de Dados	80
4.3.2	Demonstração Básica do Programa – Exemplo Genérico	81
4.4	VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	83
4.4.1	Análise em uma única etapa e Análise Incremental	86
4.4.2	Análise Incremental sem e com Fluência	87
4.4.3	Resumo da validação do Programa	88
5	PROCEDIMENTO DE CORREÇÃO DE CONTRA FLECHA COM	
	INCERTEZA NAS VARIÁVEIS	89
5.1	CÁLCULO DE DEFORMAÇÕES APLICANDO INCERTEZA NAS	
	VARIÁVEIS DE PROJETO COM DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA ATRAVÉS	
	DE MONTE CARLO.....	89
5.1.1	Geometria	90
5.1.2	Material	91
5.1.2.1	Resistência à Compressão do Concreto	91
5.1.2.2	Módulo de Elasticidade	92
5.1.2.3	Coefficiente de Fluência	93
5.1.3	Umidade Relativa	93
5.1.4	Carregamentos	94
5.2	VERIFICAÇÃO DO CÁLCULO DE CONTRA FLECHA ESTOCÁSTICO PARA	
	ESTRUTURAS EM BALANÇOS SUCESSIVOS.....	95
5.2.1	Resultados das contra flechas	96
5.2.1.1	Modelo 1	96
5.2.1.2	Modelo 3A.....	98
5.3	CORREÇÃO DE CONTRA FLECHAS APLICANDO INCERTEZA NAS	
	VARIÁVEIS COM PROCESSO ESTOCÁSTICO	99

5.4	VERIFICAÇÃO DA CORREÇÃO DE CONTRA FLECHA COM PROCESSO ESTOCÁSTICO	100
5.4.1	Obtenção dos dados dos deslocamentos reais	100
5.4.2	Resultados da correção de contra flechas	100
5.4.2.1	Modelo 1	100
5.4.2.2	Modelo 3A	105
5.5	RESUMO DO USO DE INCERTEZA NAS VARIÁVEIS PARA CORREÇÃO DE CONTRA FLECHA	108
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	110
6.1	DESCRIÇÃO DO CASO.....	110
6.1.1	Geometria da ponte	110
6.1.2	Materiais.....	112
6.1.3	Carregamentos.....	112
6.1.4	Estágio de Construção	113
6.2	DADOS DE CAMPO	115
6.2.1	Caso A	115
6.2.2	Caso B	118
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	121
	REFERÊNCIAS.....	123
	ANEXO A – RESULTADOS DOS MODELOS DE VALIDAÇÃO DO PROGRAMA	127
	ANEXO B - RESULTADOS DOS MODELOS DE VALIDAÇÃO PARA AI E FLUÊNCIA.....	137
	ANEXO C - VERIFICAÇÃO DO CÁLCULO DE CONTRA FLECHA ESTOCÁSTICO	140
	ANEXO D – DADOS DAS LEITURAS DE CAMPO.....	142
	ANEXO E - RESULTADOS DA CORREÇÃO DE CONTRA FLECHAS.....	145
	ANEXO F – CÓDIGOS DE PROGRAMAÇÃO	151

1 INTRODUÇÃO

Os principais subsídios necessários para compreensão da pesquisa proposta são apresentados abaixo:

1.1 AJUSTE DE CONTRA FLECHAS UTILIZANDO ANÁLISE ESTOCÁSTICA PARA PROCESSO DE CONSTRUÇÃO EM BALANÇOS SUCESSIVOS CONSIDERANDO FLUÊNCIA

A elaboração de um projeto depende das características da estrutura a ser construída e o seu comportamento durante a vida útil. Porém, verificações adicionais podem ser solicitadas devido à existência de um carregamento específico durante o período de construção ou do uso de uma técnica construtiva que modifique o sistema estrutural, caracterizando um diferencial na elaboração do projeto. É o caso das construções pelo método dos Balanços Sucessivos.

Além disso, ainda no desenvolvimento de projetos de estruturas, são comuns análises baseadas em metodologias determinísticas, que utilizam fatores de segurança para considerar a incerteza nos problemas. Entretanto, existe uma maneira mais adequada para que as incertezas sejam incluídas, que é através de uma análise estocástica para considerar a aleatoriedade das variáveis de projeto (GHALI et al, 2014b). Assim, a análise estocástica é incorporada a um projeto de construção em Balanços Sucessivos possibilitando projetar uma estrutura com conhecimento estatístico, sendo essencial para prever seu comportamento no período pretendido.

O método construtivo em Balanços Sucessivos é realizado com cada novo trecho sendo executado a partir do anterior. Os segmentos já executados são responsáveis por suportar as novas cargas de construção, aumentando as deformações à medida que a obra prossegue (MATHIVAT, 1983). Como essas deformações atingem valores significativos, é necessário que ainda durante a etapa construtiva elas sejam controladas com aplicação de contra flechas na estrutura de modo a compensar os deslocamentos e, assim, atender o perfil vertical de projeto. O valor da contra flecha a ser aplicado na estrutura é determinado através do cálculo das deformações previstas para cada fase da obra e da deformada final. Este cálculo das deformações pode ser feito através de modelos computacionais de análise estrutural.

Como esse tipo de obra apresenta inúmeras variáveis de projeto que influenciam no comportamento da estrutura, a incerteza sobre essas variáveis é um fator importante a ser

avaliado, já que elas caracterizam ações e propriedades do material, que estão submetidas a parâmetros estatísticos do problema estrutural. Outro fator importante é a execução realizada em etapas sendo um diferencial para este tipo de análise, o que necessita considerar, também, as deformações diferidas no tempo. Além disso, os deslocamentos verticais ocorridos apresentam um valor residual em relação ao greide de projeto, mesmo com a aplicação das contra flechas de correção, pois é durante a execução da obra que as incertezas atuam sobre as variáveis, sendo necessário verificar se o perfil de projeto foi atingido.

Para essas análises serem realizadas, é obtido o valor das deformações considerando as incertezas no projeto e, assim, calcular as contra flechas que deverão ser aplicadas à estrutura. O cálculo do deslocamento total é utilizado por Paim (1983) e Podolny e Muller (1982) para determinar os valores de contra flecha de maneira a obter a configuração final estabelecida em projeto. Mathivat (1983) também utiliza uma técnica com o uso do deslocamento total.

No objetivo de diminuir as deformações residuais em relação à configuração final mesmo com a aplicação das contra flechas, as deformações previstas em projeto precisam ser obtidas com maior precisão. Berger et al (2009) recomendam que o controle desses valores de contra flecha devam ser feitos em cada segmento ainda não executado, para eliminar o acúmulo de erros ao longo da execução. Oyamada (2004) propõe uma correção geométrica não considerando as propriedades do material na obra e nem as variáveis que proporcionaram as deformações, pois as aduelas seguintes são posicionadas para atingir uma concordância com o projeto inicial.

Como esse tipo de obra possui acompanhamento em campo com levantamento das deformações ocorridas em cada etapa de execução, é possível comparar esses dados com as deformações estimadas para o projeto. Como já dito, os valores são diferentes, devido às incertezas do concreto utilizado em obra, a dosagem dos materiais, tipo de agregado e outros fatores da sua composição. Os fenômenos influenciados pelo tempo, como a fluência, também surgem no problema, porém de forma determinística. Entretanto, é possível observar a existência de muitas variáveis sujeitas as incertezas para o cálculo do coeficiente de fluência.

Com isso, a utilização dessas informações permite o uso de outros métodos que integram simulação computacional e construção. Lai e Wang (2010) utilizam os dados de controle de deformação para verificar e estimar as curvas reais de construção, com o uso de método de análise de regressão linear, e assim, ajustar as contra flechas durante a execução. Jung (2004) utiliza os deslocamentos medidos e aplica um modelo de material através do uso de redes

neurais caracterizando o comportamento dependente do tempo para o concreto em campo. A ideia de caracterizar o material em campo também é utilizada por Santos (2014) que realiza esse processo através da otimização entre os resíduos dos deslocamentos estimados e medidos e define assim, um procedimento para aplicação das contra flechas de ajuste do perfil da obra.

1.2 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste trabalho, é proposto um procedimento para o controle e ajuste de contra flechas durante o período de construção que assegure o alinhamento final da estrutura atendendo as exigências de projeto. A proposta difere dos métodos convencionais, pois é considerada a fluência em cada etapa executiva e as incertezas das variáveis do problema.

Baseado no método de Santos (2014), os dados obtidos na leitura de cada etapa executada são submetidos ao método dos Mínimos Quadrados Não Linear, minimizando as diferenças entre as deformações reais e previstas e tendo como variáveis de otimização de projeto o f_{ck} , que determina o módulo de elasticidade, e a umidade relativa, influenciando nas parcelas das deformações imediatas e por fluência. O programa de simulação utilizado para minimizar as deformações realiza este processo indiretamente, com o auxílio de um programa de própria autoria para as análises estruturais, que além de considerar as etapas construtivas e a fluência, avalia também as incertezas inerentes ao problema.

Através do método de Monte Carlo, as curvas de distribuição estatística permitem considerar as incertezas nas variáveis sendo possível encontrar uma melhor representação das propriedades do material aplicado na obra. As leituras de campo continuam sendo realizadas após a execução de cada segmento, mantendo o processo iterativo e permitindo que os novos dados sejam assimilados a cada fase de acordo com o tempo de execução e incluindo o efeito da fluência. Assim como Santos (2014), as características do material utilizado no projeto se aproximam gradualmente das características do material utilizado na obra e podem ser aplicados para prever as novas deformações de projeto, ajustando a configuração deformada para que os deslocamentos calculados sejam mais próximos dos valores reais.

Esse novos deslocamentos obtidos após a execução de cada aduela, permitem refazer o cálculo das contra flechas para que se adaptem a realidade dos deslocamentos medidos e assim, as deformadas residuais sejam menores possíveis para atender a configuração de projeto.

1.3 OBJETIVOS

Os objetivos gerais e específicos da pesquisa:

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é propor um procedimento para controle e correção das contra flechas aplicadas nas obras executadas pelo método dos Balanços Sucessivos, utilizando a leitura dos dados de campo dos deslocamentos ocorridos na estrutura durante a fase construtiva, considerando o fenômeno da fluência e às incertezas nas variáveis do problema.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para realização desse estudo são:

- Baseado no processo, com algoritmos de otimização, desenvolvido por Santos (2014), realizar a caracterização das propriedades do concreto utilizado na obra e aplicar essas novas propriedades em um simulador estrutural integrado ao processo, para estimar a nova curva de deformações do projeto.
- Desenvolver um simulador estrutural – um Programa – que consiste no cálculo das deformações em cada fase construtiva em elementos submetidos ao fenômeno de fluência e com a atuação das incertezas envolvidas nas variáveis do problema, através de um processo estocástico de Monte Carlo.
- Estudar as curvas estatísticas das variáveis para determinar o tipo de distribuição e os parâmetros estatísticos, com as recomendações encontradas na literatura e com dados experimentais.
- Avaliar a deformação decorrente da fluência aplicando as incertezas calculadas pelo método de Monte Carlo no cálculo de seu coeficiente, para que a consideração do fenômeno de fluência deixe de ser um evento determinístico, como se aplicam nos estudos atuais.
- Com as deformadas obtidas com o uso do Programa de análise estrutural, realizar o cálculo dos ajustes nas contra flechas a serem aplicadas de maneira a atender o perfil solicitado em projeto.

1.4 CONSIDERAÇÕES E LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Para elaboração deste trabalho, algumas restrições foram impostas para caracterizar as análises, considerando as dificuldades encontradas ao longo do desenvolvimento do trabalho.

- O estudo está restrito a fase construtiva, pois os modelos matemáticos utilizados são para determinação das contra flechas somente considerando as deformações construtivas.
- O estudo das deformações para o cálculo de contra flechas não considera as deformações ocorridas na treliça da forma de concretagem, visto que esta informação seria um dado informado pelo fornecedor do equipamento. Entretanto, a aplicação do peso do conjunto treliça-forma é considerada no cálculo dos deslocamentos que ocorrerão na estrutura de concreto, pois a existência desta carga implica no surgimento de uma deformação por fluência.
- As análises realizadas no Programa de simulação estrutural estão restritas às vigas biengastadas ou em balanço, visto que essas são as configurações estruturais mais encontradas no estudo de Ponte em Balanços Sucessivos, apesar de um modelo de viga contínua ser apresentado na Tabela 02.
- Os boletins sobre a análise de efeitos dependentes do tempo divulgados pelo CEB-FIP são baseados na versão da norma de 1993, fazendo com que muitos programas comerciais, como o SAP2000, continuem utilizando esta versão. Como algumas análises do trabalho proposto foram realizadas em comparação com estudos realizados no SAP2000, a versão CEB-FIP (1993) foi adotada.
- A realização da análise de sensibilidade caracteriza a influência de cada variável nos resultados, entretanto, esta etapa será realizada em trabalhos futuros que envolvam a análise de confiabilidade em projetos.
- Segundo CEB-FIP (1993), a energia de hidratação do concreto é influenciada pelo tipo de cimento, sendo necessário considerar as alterações neste material devido à temperatura. Porém o estudo proposto considerou a temperatura constante e no valor médio adotado na norma (20 °C). A análise de sensibilidade em estudos futuros pode demonstrar a relevância dessa variação de temperatura no problema.
- O aumento das deformações foi o objeto principal do estudo da fluência, não sendo analisadas as perdas de protensão ocasionadas por este fenômeno.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para melhor compreensão da análise e dos resultados, este trabalho foi estruturado em sete capítulos:

Neste presente *Capítulo*, são apresentadas informações sobre estruturas construídas em Balanços Sucessivos, o cálculo de deformações e contra flechas, variáveis aleatórias no projeto estrutural, um resumo da metodologia que será utilizada no desenvolvimento deste estudo, os objetivos e limitações da pesquisa e a organização dos capítulos deste documento.

Para o *Capítulo 2*, é abordada em detalhes a técnica da construção de uma estrutura pelo método dos Balanços Sucessivos, como no caso das pontes. São apresentadas as considerações de projeto, de execução e de controle necessárias para esse tipo de obra, associado com a revisão na literatura para melhor compreensão dos aspectos que influenciam essas estruturas, como análise incremental e a fluência.

É apresentado no *Capítulo 3*, o cálculo de incerteza nas variáveis de um projeto de estruturas, as distribuições estatísticas e a simulação de Monte Carlo, utilizada para definir a curva do histograma das variáveis.

Para o *Capítulo 4*, o processo de otimização utilizando a assimilação de dados e o método dos Mínimos Quadrados Não Linear, utilizado por Santos (2014) é apresentado, porém com a implantação do cálculo de incerteza nas variáveis estruturais, além da utilização do coeficiente de fluência como uma variável aleatória. Nessa etapa do trabalho o Programa de análise estrutural desenvolvido é apresentado com suas possibilidades de análises e validação de seus resultados. Também, é mostrada a interação do Programa para o cálculo das deformadas e a determinação das contra flechas.

Com a fundamentação teórica apresentada, o *Capítulo 5* apresenta o processo de otimização para corrigir as contra flechas associado ao Programa de análise estrutural mediante ao uso de variáveis aleatórias e não com o método determinístico. Com isso, são realizadas as validações do processo e suas comparações com os resultados determinísticos.

No *Capítulo 6*, o procedimento proposto é aplicado durante a fase construtiva do estudo de uma Ponte em Balanços Sucessivos, definindo as contra flechas de projeto, realizando as devidas correções mediante a utilização proposta. Comparações com a metodologia utilizada por Santos (2014) e Oyamada (2004) são realizadas e os resultados apresentados.

As conclusões desse estudo são mostradas no *Capítulo 7*, destacando as contribuições dessa tese e os próximos passos para continuidade da pesquisa.

2 COMPORTAMENTO DE PONTES CONSTRUÍDAS POR BALANÇOS SUCESSIVOS

Nas estruturas construídas por Balanços Sucessivos, é necessário compreender o comportamento estrutural e os fatores que influenciam o projeto e a execução dessas obras. Essa técnica de construção é comumente aplicada em algumas pontes, conforme é apresentado por Mathivat:

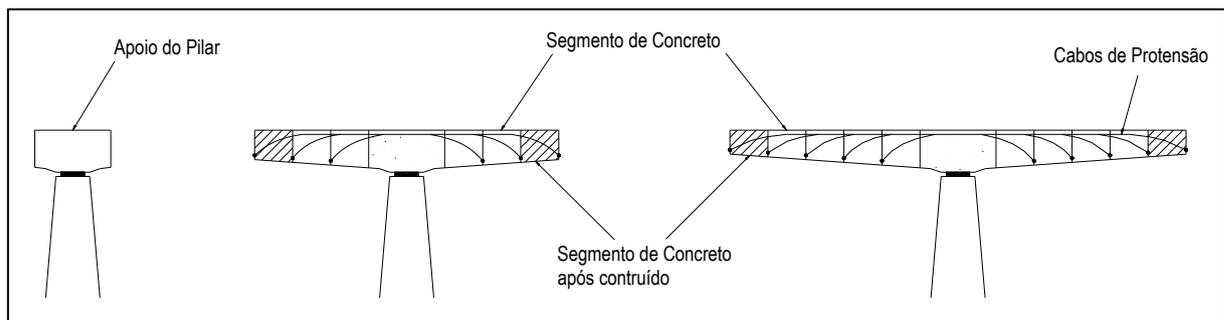
A construção de pontes em balanços sucessivos consiste em um tabuleiro executado por uma sucessão de segmentos, onde cada trecho é influenciado pelo peso próprio do segmento, e em alguns casos, pelo peso da forma ou da carga de construção (MATHIVAT, 1983, p.1).

Com o estudo do comportamento de pontes construídas por esse método, é possível entender a aplicação dessa metodologia para outros tipos de estruturas, por exemplo, marquises em que seja utilizado o mesmo método executivo.

2.1 A TÉCNICA CONSTRUTIVA

Esse tipo de estrutura é definido como uma ponte em viga contínua, que durante sua execução possui o sistema estrutural em balanço, fazendo da instabilidade na fase construtiva uma característica desse tipo de obra. A existência dos balanços nas duas extremidades necessita que o mesmo peso seja aplicado em ambos os lados, de maneira a tornar a superestrutura autossustentável. Uma ferramenta utilizada para auxiliar na estabilidade estrutural é a colocação de cabos protendidos na parte superior da seção transversal após a execução de cada segmento. (Figura 1).

Figura 1 – Sequência de construção de ponte em Balanços Sucessivos.

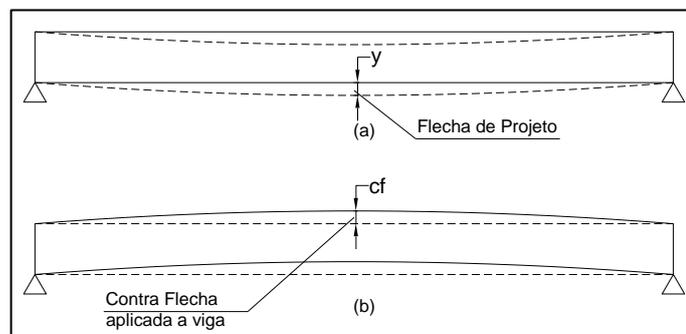


Fonte: Mathivat, 1983.

Durante todas as fases da construção, são realizados acompanhamentos de campo associados à análise do projeto, a fim de evitar deformações excessivas devido à execução de cada aduela. O cálculo das deformações considera os carregamentos permanentes e de construção, normalmente não é considerado o fenômeno de fluência do concreto, pois é de difícil aplicação em alguns modelos estruturais, mas pode ser de grande relevância como será mostrado posteriormente.

Ao determinar as deformações imediatas, provenientes da aplicação dos carregamentos, e as deformações progressivas, considerando os efeitos do tempo no projeto, é possível efetuar o controle dos deslocamentos excessivos. Com o objetivo de obter a configuração do greide, ou seja, o nivelamento da ponte solicitado em projeto, esse controle é realizado através da compensação das deformações previstas utilizando contra flechas que são os deslocamentos verticais intencionais aplicados à estrutura durante a montagem das formas no sentido contrário à flecha (Figura 2).

Figura 2 – Viga com a deformação, y , estimada em projeto (a); Contra flecha, cf , aplicada à viga (b).



Fonte: Santos, 2014.

2.1.1 Vantagens e desvantagens do método dos balanços sucessivos

A principal vantagem na utilização desse método é a eliminação de formas e escoramentos, pois a concretagem é realizada através de treliças instaladas no tabuleiro da ponte deixando livre o espaço abaixo dela. Com isso, a construção é realizada sem interferências nas condições locais, por exemplo, não interrompendo vias navegáveis (Figura 3).

Outra vantagem na utilização desse tipo de execução é a redução da quantidade de pilares e pontos de fundação, pois esse método permite a construção de vãos extensos, sendo utilizado para transpor vales e vias em que a execução de vários trechos de infraestrutura seria inviável.

Figura 3 – Treliça sob o tabuleiro com o vão navegável livre.



Fonte: ulmaconstruction apud Santos, 2014.

Entretanto, o custo da superestrutura é elevado. Segundo Menn (1990), para pontes com vãos entre 70 m e 250 m, os custos são da ordem de 25% a 35% do total da obra. Outro diferencial é a necessidade de mão de obra qualificada, porém o rendimento das frentes de trabalho melhora com o avanço da estrutura, já que é uma obra com ciclos de repetição de execução, o que torna a equipe mais eficiente e apta, possibilitando uma maior rapidez na construção.

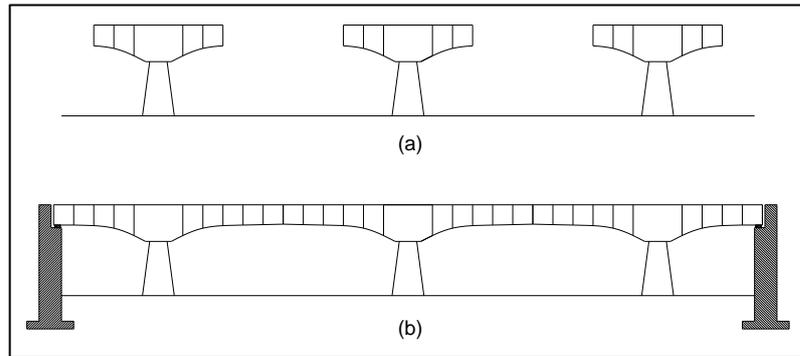
2.1.2 Estabilidade Estrutural

Em uma análise estrutural, o objetivo é relacionar, com hipóteses simplificadoras, os sistemas estruturais físicos com materiais, ações externas atuantes, deslocamentos, reações de apoio e tensões. Desta forma, é possível identificar algum problema de comportamento do material ou da estrutura. O importante é que a concepção de um modelo expresse o comportamento real desenvolvido pela estrutura.

Para isso, os elementos considerados na análise estrutural são: geometria, condições de contorno, detalhes estruturais, propriedade dos materiais e cargas. Além disso, outros fatores podem influenciar diretamente na análise, é o caso das condições ambientais, tais como umidade, e os efeitos provenientes do tempo no fenômeno de fluência.

No caso de uma ponte em Balanços Sucessivos, duas condições estruturais diferentes precisam ser analisadas. A primeira, durante a fase da obra em que a estrutura possui uma característica isostática e está executada em balanço, e a segunda, após a fase de fechamento, em que a ligação da ponte pode assumir a configuração de uma viga contínua hiperestática (Figura 4).

Figura 4 – Estruturas isoladas isostáticas em balanço (a); Viga contínua hiperestática (b).



Fonte: Santos, 2014.

A estabilidade do tabuleiro durante a execução é um estudo fundamental, pois a obra evolui e as aduelas são acrescentadas não só no tamanho do balanço, mas também com o aumento das cargas aplicadas. O peso próprio é o principal carregamento a ser considerado, porém as formas, guinchos e materiais utilizados na execução, que apesar de temporários, também, são aplicados à estrutura.

2.1.3 Execução do Tabuleiro

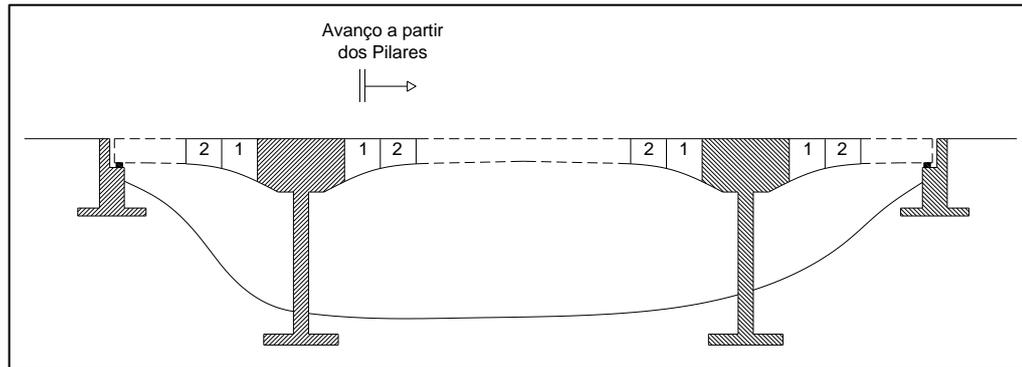
Uma ponte em Balanços Sucessivos é construída a partir dos pilares, em que trecho a trecho é executado de maneira simétrica com realização da protensão de maneira contínua, para garantir o equilíbrio mediante a atuação dos esforços na estrutura em balanço.

O processo da execução do tabuleiro pode ser realizado de várias maneiras a fim de obter a consolidação dos segmentos, por isso, algumas considerações específicas precisam ser feitas durante a análise estrutural, principalmente em relação ao fechamento dos vãos.

2.1.3.1 Execução das Aduelas

As aduelas são construídas simetricamente a partir dos pilares, de maneira a formar um balanço duplo e garantir que não surjam momentos capazes de rotacionar e desestabilizar a estrutura (Figura 5). Para que o equilíbrio seja atingido, Paim (1983) recomenda que a ligação entre tabuleiro e pilar seja monolítica.

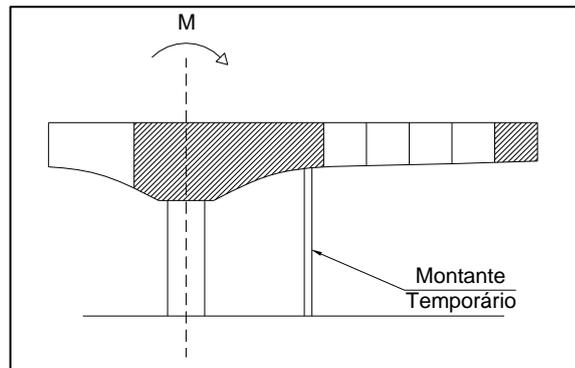
Figura 5 – Construção de aduelas simétricas, partindo dos pilares.



Fonte: Paim, 1983.

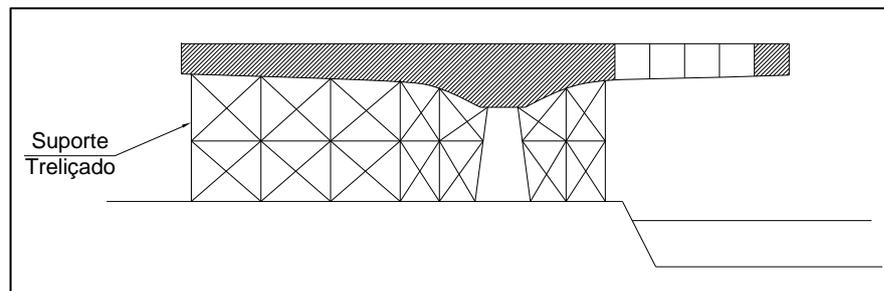
Quando essa condição de equilíbrio não puder ser obtida, algumas medidas são tomadas para garantir a estabilidade a fim de que o conjunto seja resistente aos momentos. Esse é o caso das aduelas construídas assimetricamente, onde são utilizadas ferramentas de apoio, como o uso de suportes temporários para manter o equilíbrio da estrutura durante a execução (Figuras 6 e 7).

Figura 6 – Construção de aduela com apoio temporário.



Fonte: Santos, 2009.

Figura 7 – Construção de aduela com apoio treliçado temporário.

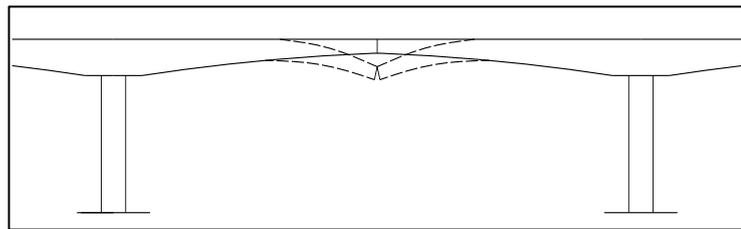


Fonte: Santos, 2009.

2.1.3.2 Execução do fechamento dos vãos

O comportamento estrutural da ponte, após o fechamento dos vãos, é afetado diretamente pelo tipo de método de conexão adotado. Menn (1990) e Paim (1983) mostram que esse fechamento pode ocorrer mediante uma ligação com rótulas. Neste caso, as últimas aduelas em balanço no centro do vão são conectadas por uma ligação em articulação e o tabuleiro continuará a funcionar como uma viga em balanço e não como viga contínua durante a vida útil da obra (Figura 8).

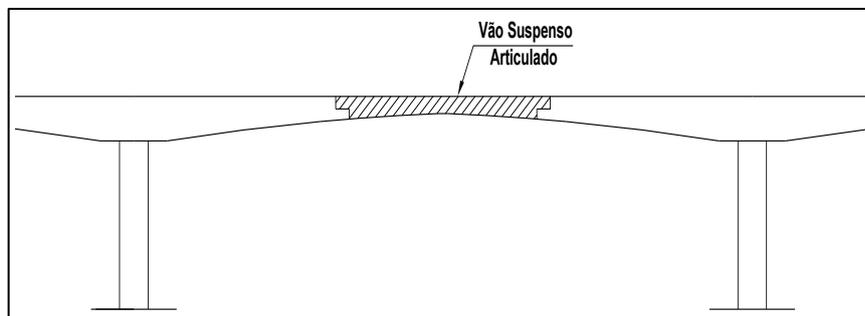
Figura 8 – Fechamento articulado, viga em balanço.



Fonte: Santos, 2009.

A colocação dos cabos de protensão é uma vantagem nesse tipo de ligação, pois o diagrama de momento fletor é negativo ao longo de toda vida útil da obra, o que resulta em um único conjunto de cabos. Por outro lado, a flecha ocorrida devido às deformações progressivas alcança grandes valores que causam alterações no greide e desconforto ao usuário. Esse tipo de ligação também pode ser executado com mais de um ponto de articulação (Figura 9).

Figura 9 – Fechamento com vão suspenso articulado.

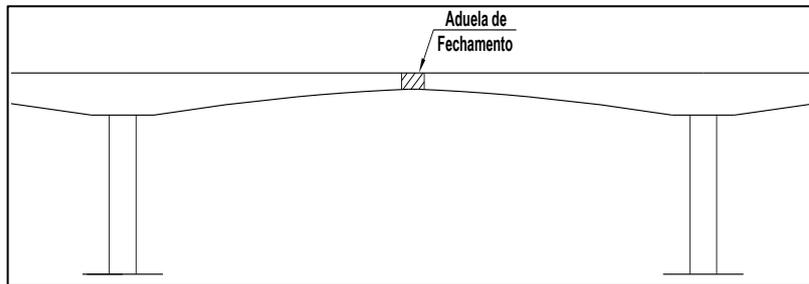


Fonte: Santos, 2009.

Outro tipo de ligação apresentado por Menn (1990) e Paim (1983), é o sistema contínuo na qual a viga é solidarizada através da concretagem de um pequeno elemento chamado de aduela de fechamento. Esse elemento é protendido e incorporado à estrutura que se torna contínua (Figura 10). O sistema se torna contínuo e hiperestático, solicitando mais um conjunto no traçado de

cabos de protensão do que no sistema articulado, devido à existência de um momento fletor positivo que atua na ponte após a ligação. Esse sistema apresenta uma estrutura de melhor qualidade e resistência.

Figura 10 – Ligação contínua com aduela de fechamento.

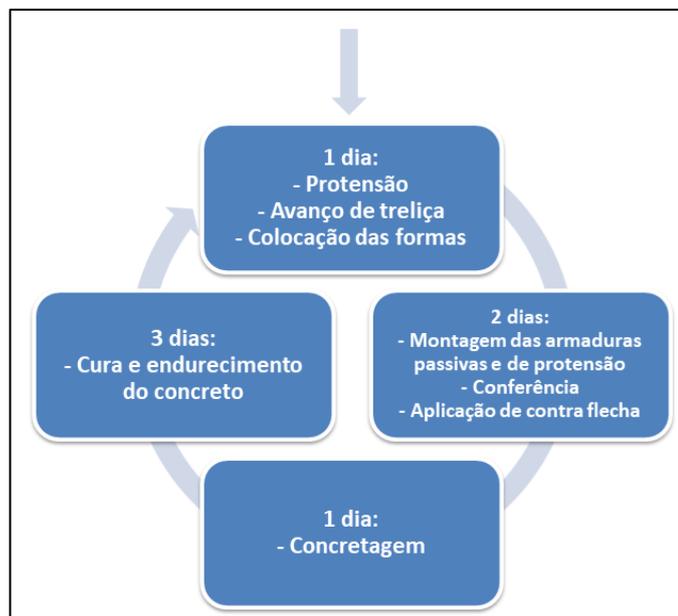


Fonte: Santos, 2009.

2.1.4 Etapas de Construção

A execução de cada segmento é uma etapa de construção nesse tipo de obra e ocorre, normalmente, com duração mínima de 7 dias. A etapa inicia com a concretagem, seguida da protensão aplicada na peça após o terceiro ou quarto dia, com isso, a estabilidade é garantida e caracteriza a aduela como autoportante, o que servirá de apoio à execução do elemento posterior. Porém a sequência de construção é definida de maneira a melhor atender as necessidades da obra. Menn (1990) sugere um caso de sequência construtiva e Paim (1983) exemplifica uma etapa de operações otimizada, conforme a Figura 11:

Figura 11 – Sequência de construção para uma etapa de operação otimizada em 7 dias.



Fonte: A autora, 2020.

2.1.5 Dosagem dos Materiais

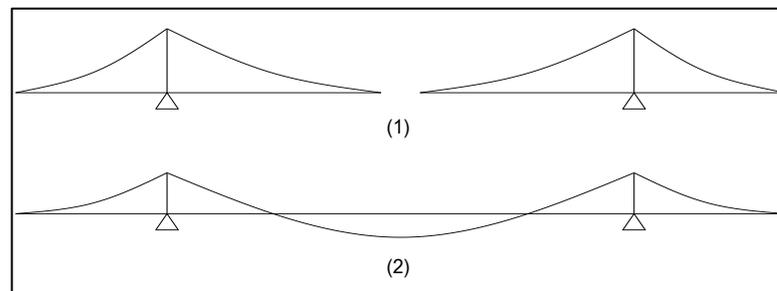
A resistência à compressão característica do concreto (f_{ck}) determinada em projeto deve ser atendida durante a execução da obra, sendo necessário conhecer os materiais utilizados, pois a dosagem para fabricação do concreto precisa ser estabelecida e mantida durante toda a execução. O controle da resistência do concreto é realizado com a moldagem de corpos de prova, posteriormente, submetidos a ensaios de resistência à compressão, que permite determinar as características do concreto utilizado. Esse processo é importante para configurar o projeto estrutural de forma adequá-lo a obra.

2.1.6 Protensão

Nas pontes em Balanços Sucessivos, a existência de grandes vãos e a estrutura em balanço, acarretam na presença de momentos negativos de grande valor e a protensão é a principal ferramenta para combater esses esforços.

Como visto, um dos sistemas de fechamento do vão da ponte é a articulação. Nele, os momentos se mantêm negativos durante toda a vida da obra. O mesmo não acontece para o fechamento contínuo, em que os esforços se redistribuem e ocorrem momentos positivos no centro do vão (Figura 12).

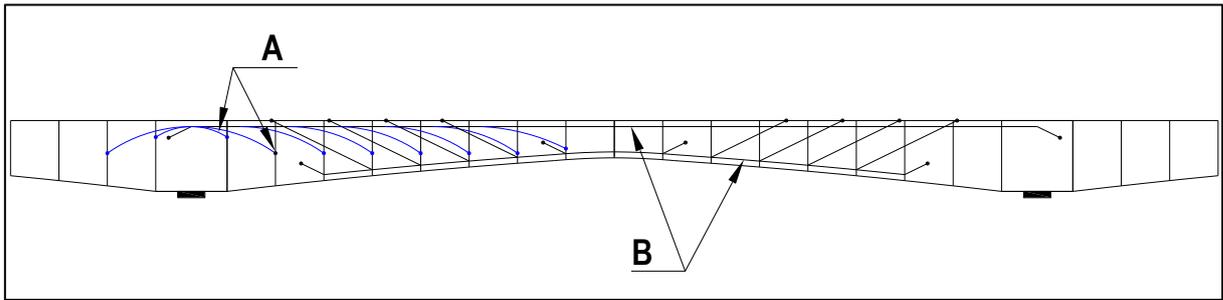
Figura 12 – Diagrama de Momento Fletor da estrutura: fase de construção (1) e fase da ponte em operação com continuidade (2).



Fonte: Santos, 2009.

Diante do sistema de fechamento, o conjunto de cabos pode se apresentar de várias formas. Segundo Mathivat (1983) e Menn (1990), os cabos longitudinais de protensão podem ser de dois tipos numa ponte em Balanços Sucessivos (Figura 13).

Figura 13 – Cabos em uma Ponte em Balanços Sucessivos: Cabos de viga em balanço (A – azul) e Cabos integrados (B – preto).



Fonte: Mathivat, 1983.

- Cabos de viga em balanço (A – azul): são posicionados na parte superior da viga e tem como função combater os momentos negativos que crescem rapidamente nos apoios devido ao peso próprio acrescido durante a fase construtiva. Esses cabos também são solicitados pela estrutura em serviço nos fechamentos por articulação. E mesmo no fechamento contínuo, apesar da redução dos momentos negativos nos pilares, eles continuam atuando com a conexão dos balanços.
- Cabos integrados (B – preto): estes se localizam no meio do vão na parte inferior da viga, na continuidade do tabuleiro. Sua função é promover a solidarização dos trechos em balanço, além de combater os esforços positivos que são decorrentes das cargas impostas durante o funcionamento da estrutura. Também, podem ser posicionados no topo da seção transversal e, neste caso, sua principal função é controlar as deformações ocorridas após o fechamento dos balanços; normalmente, passam sob os pilares e ancoram nas almas da seção caixão da viga.

2.1.7 Contra Flecha

As deformações atingem valores significativos nesse tipo de construção sendo necessário compensá-las com a aplicação de contra flechas para garantir que o perfil da ponte seja atingido ao final da execução. O valor da contra flecha deve ser igual à deformação total devido ao carregamento de peso próprio e cargas permanentes (MENN, 1990).

Segundo Podolny e Muller (1982), o problema mais crítico da construção “in loco”, é o controle das deformações que podem ser de cinco tipos:

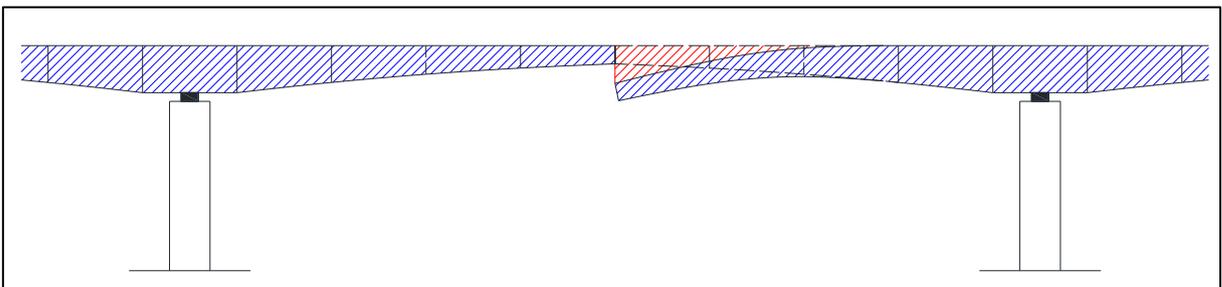
- Deformação nas treliças: é devido ao peso das aduelas durante a concretagem nas treliças de escoramento. Por ser temporária, essa deformação não é considerada no cálculo de

deslocamentos para a aplicação da contra flecha, entretanto ao considerar a fluência, mesmo com a retirada da carga, a tensão exercida sobre a estrutura não deve ser desprezada.

- Deformação das aduelas em balanço durante a construção: ocorre na execução de cada segmento que impõe uma nova curva de deformação devido ao peso da aduela concretada e a força de protensão aplicada.
- Deformação das aduelas em balanço após a construção antes do fechamento: a retirada das treliças de construção provoca um diferencial de deformação que precisa ser considerado.
- Deformações imediatas e progressivas da estrutura contínua: são as deformações ocasionadas pelo efeito das cargas permanentes e móveis.
- Deformações imediatas e progressivas na infraestrutura: são as deformações que ocorrem nos pilares e elementos de fundação.

O acompanhamento e controle das deformações, durante a execução, devem ser rigorosos, para que o vão da ponte que será ligado posteriormente, não possua diferenças de nível ocasionando problemas na obra (Figura 14).

Figura 14 – Desnível em obra com a execução final da estrutura (azul) e a diferença de deformação (vermelho).



Fonte: Santos e Ribeiro, 2015.

O controle de flechas durante a fase construtiva é realizado através de planilhas de medição. As leituras são realizadas em todas as aduelas ao longo do tabuleiro, no início da manhã e ao final do dia, pois os efeitos térmicos nas aduelas em balanço são significativos. A utilização desses dados permite realizar as correções necessárias, nos casos que ocorram diferenças de nível durante a execução, a fim de evitar os problemas executivos (Figura 15).

Figura 15 – Desnível na execução entre duas aduelas.



Fonte: Santos, 2014.

2.2 CONSIDERAÇÕES DE PROJETO

O cálculo das deformações é realizado não só utilizando o conceito da mecânica dos materiais, mas também com o auxílio de modelos matemáticos obtidos através de estudos experimentais. As Normas são resultados desses estudos aplicados para determinar de maneira empírica as deformações, principalmente, nas situações em que a estrutura está submetida aos fenômenos influenciados pelo tempo.

Alguns programas computacionais de modelagem estrutural dimensionam as estruturas e calculam as deformações baseados nas Normas. Essas ferramentas computacionais facilitam a análise e permitem desenvolver estudos sobre o comportamento estrutural. Uma das normas utilizadas é a CEB-FIP (1993), desenvolvida pelo Comité Euro-Internacional do Concreto (Euro-International Committee for Concrete – CEB) associado com a Federação Internacional do Concreto (The International Federation for Structural Concrete – FIP). Por ser de conhecimento internacional, a sua utilização possui abrangência e boa aceitação na área de cálculo estrutural, sendo presente em muitos simuladores computacionais para realização do estudo da estrutura.

2.2.1 Cálculo da deformação pela Norma CEB-FIP (1993)

Utilizando a CEB-FIP (1993), é possível determinar a deformação total através da equação (1). O cálculo é composto de uma parcela referente à deformação imediata, ocorrida na aplicação do carregamento; parcelas de deformação diferida, decorrentes dos efeitos de fluência e retração; e uma parcela devido à variação de temperatura.

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_{ci}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t) + \varepsilon_{cT}(t) \quad (1)$$

Onde: ε_{ci} é a deformação inicial devido à aplicação do carregamento.

ε_{cc} é a deformação de fluência a partir do momento em que a carga é aplicada.

ε_{cs} é a deformação de retração.

ε_{cT} é a deformação devido a variação da temperatura.

t_0 e t são as idades do concreto em que a tensão inicial é aplicada e onde a deformação será considerada.

2.2.2 Propriedades do Concreto

Na análise de uma estrutura, principalmente no cálculo das deformações, é importante caracterizar as propriedades do material estudado de maneira que a representação do comportamento do modelo se aproxime da estrutura real. Na fase de projeto, esses parâmetros são estipulados, pois ainda não está definida a dosagem dos materiais aplicados à obra, de maneira que permita definir as propriedades do concreto utilizado. Por isso, as Normas auxiliam na determinação dessas propriedades através de modelos matemáticos obtidos a partir de resultados de ensaios experimentais.

2.2.2.1 Resistência Característica à Compressão do Concreto

A resistência característica à compressão do concreto (f_{ck}) é determinada através de ensaios padronizados na idade padrão de 28 dias, convencionando que esta é a idade em que a estrutura deverá entrar em carga. A resistência característica (f_{ck}) é um valor probabilístico, resultante da possibilidade de que 5% do concreto ensaiado possua resistência inferior a ele.

A resistência característica à compressão do concreto aumenta ao longo do tempo e vários fatores influenciam, como o fator água/cimento, o tipo de cimento, a umidade relativa e a idade do concreto são alguns deles.

- Fator água/cimento: é o principal parâmetro para caracterizar a resistência do concreto. Quanto menor essa relação, maior é a resistência da peça.
- Tipo de cimento: a composição química e a finura influenciam na relação água/cimento, que pode repercutir em uma maior necessidade de água ou não na mistura.
- Umidade relativa do ar: a baixa umidade relativa acarreta em perda excessiva de água da peça de concreto, que aumenta o fenômeno da retração e aparecimento de fissuras alterando as distribuições dos esforços ao longo da peça.

- Idade do concreto: concretos com pouca idade são mais flexíveis, menos resistentes e ao serem submetidos a um carregamento estão sujeitos ao fenômeno de fluência com maior intensidade. Isso ocorre, pois o grau de hidratação ainda é pequeno e a reação água-cimento não ocorreu por completa.

A resistência característica do concreto utilizada na elaboração de um projeto considera as variações que o material pode apresentar. Por isso, a CEB-FIP (1993) orienta que a resistência utilizada obedeça à equação (2).

$$f_{cm} = f_{ck} + \Delta f \quad (2)$$

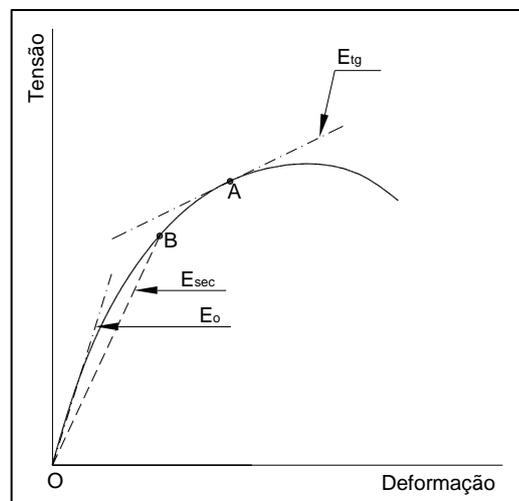
Onde: f_{ck} é a resistência média do concreto à compressão e, na falta de valores experimentais, é recomendado utilizar a devida equação (MPa).

$$\Delta f = 8 \text{ MPa.}$$

2.2.2.2 Módulo de Elasticidade

O gráfico tensão-deformação do concreto considera o material elástico-linear para os valores de tensão comumente adotados, mas com uma suave curvatura para tensões mais elevadas (Figura 16).

Figura 16 – Gráfico esquemático dos Módulos de Elasticidade: Tangente (E_{tg}), Tangente inicial (E_o) e Secante (E_{sec}).



Fonte: Santos, 2014.

O módulo de elasticidade tangente (E_{tg}) é obtido através da determinação do coeficiente angular tangente à curva, para um valor de tensão, como exemplificado, no ponto A da Figura 16. O módulo de elasticidade da tangente inicial (E_0) passa pela origem e é observado somente para valores baixos de tensão. O módulo de elasticidade secante (E_{sec}) é obtido pela reta que parte da origem até um ponto de tensão na curva, como exemplificado para o ponto B.

O módulo de elasticidade é influenciado diretamente pela resistência característica do material, assim os fatores que modificam a resistência também alteram o módulo de elasticidade, quando a resistência aumenta o módulo de elasticidade também aumenta, porém de forma não linear.

O cálculo do módulo de elasticidade tangente, em MPa, para concreto aos 28 dias, é chamado pela norma CEB-FIP (1993) de E_{Ci} e é estimado de acordo com a equação (3):

$$E_{Ci} = E_{Co} \left[\frac{(f_{ck} + \Delta f)}{f_{cmo}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Onde: f_{ck} é a resistência característica do concreto (MPa), de acordo com ensaio de compressão uniaxial, em corpo cilíndrico com 15 mm de diâmetro e 30 mm de altura, aos 28 dias e temperatura de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$.

$$\Delta f = 8 \text{ MPa.}$$

$$f_{cmo} = 10 \text{ MPa.}$$

$$E_{Co} = 2,15 \times 10^4 \text{ MPa.}$$

2.2.3 Análise Incremental

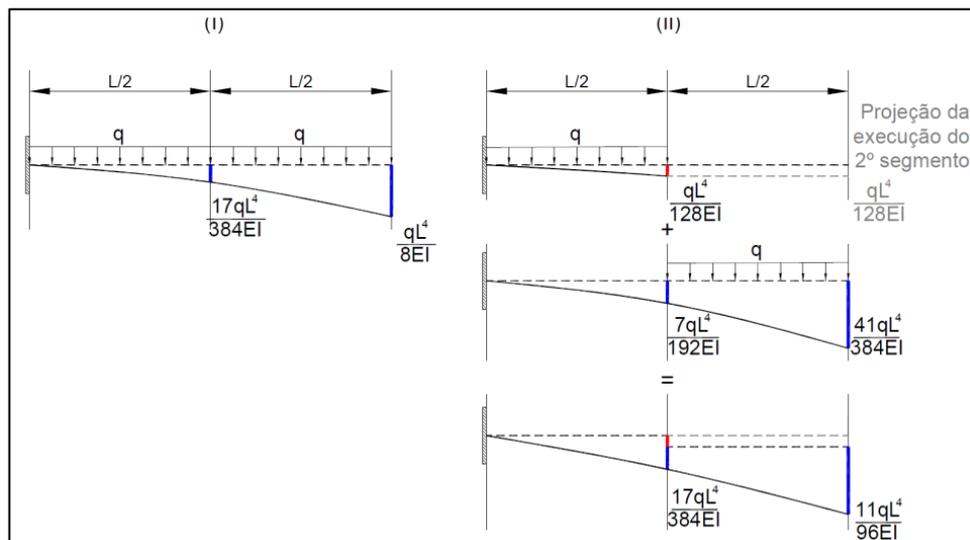
A análise de uma estrutura convencional é realizada com a aplicação de todos os carregamentos ocorrendo simultaneamente na estrutura. Entretanto, nas obras em Balanços Sucessivos os principais carregamentos são aplicados à medida que a obra avança, necessitando assim de uma análise para cada etapa de execução. Outros tipos de obras também realizam esse tipo de análise, é o caso da construção de edifícios de múltiplos pavimentos, conforme é apresentado por Gorza (2000).

No método construtivo dos Balanços Sucessivos, os elementos anteriormente executados não produzem esforços e deformações imediatas nos novos segmentos. Mas a introdução de um novo segmento na estrutura e seus carregamentos repercute sobre uma estrutura que já sofreu solicitação e assim, os resultados são diferentes quando comparados com análises em que o carregamento é aplicado simultaneamente na estrutura completa.

Se a análise de estruturas desse tipo for realizada em uma única etapa de construção e carregamento, resulta em deslocamentos incorretos. Assim, o procedimento incremental é o mais adequado, pois permite obter a deformada real da estrutura, as quais são consideradas a cada etapa que os elementos estão sendo executados e assim, caracterizar de maneira correta a deformação final. Kripka (1990) apresenta a relevância deste tipo de análise em edificações de maneira geral, pois as deformações residuais não consideradas na análise convencional proporcionam uma altura de topo da edificação maior do que na análise incremental já que as peças passam por um encurtamento dos pilares à medida que as deformações ocorrem em cada etapa.

Dependendo da maneira como a análise é realizada, os deslocamentos verticais são diferentes de acordo com a sequência construtiva e a aplicação dos carregamentos nas estruturas. Na Figura 17, uma viga com dois segmentos é executada em uma única etapa e comparada suas deformações com a execução em duas fases, em que o segundo segmento é executado na horizontal sem influência das deformações ocorridas anteriormente.

Figura 17 – Deformações para estrutura executada em uma única etapa (I) e em etapas de construção (II).



Fonte: Santos e Ribeiro, 2015.

As vigas executadas em etapas construtivas influenciam nas deformações verticais do novo segmento que será executado, pois seu posicionamento em eixo reto depende diretamente da deformação ocorrida no segmento anterior. Demonstrando, assim, a importância da análise incremental.

2.2.4 Análise dos Efeitos dependentes do Tempo

Para os efeitos que dependem do tempo, as propriedades do material estudado precisam ser bem caracterizadas. Com isso, a representação das deformações ao longo do tempo é calculada com o auxílio das Normas.

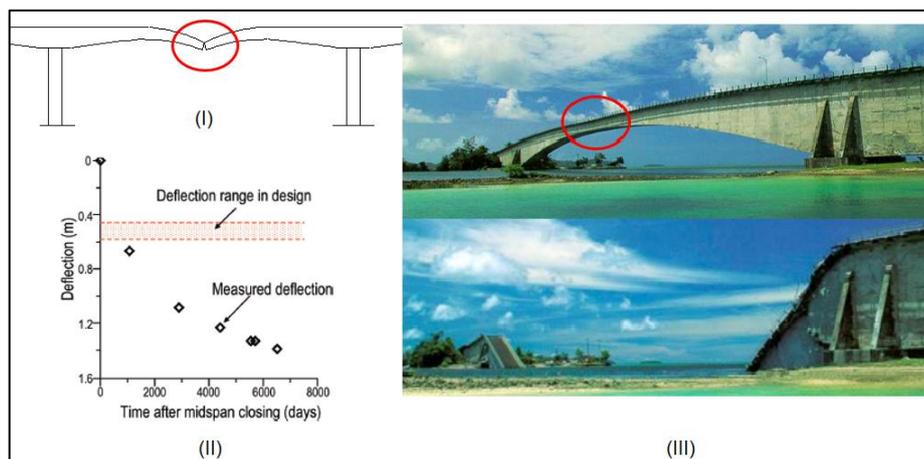
2.2.4.1 Fluência

“Fluência é o aumento contínuo das deformações que ocorrem em uma peça devido a uma tensão aplicada constantemente” (ARAUJO, 2014, p.27).

A presença da fluência nas peças de concreto acarreta em efeitos como: aumento de flechas e perdas de protensão em estruturas protendidas, mesmo que não ocorra acréscimo de carga. O aumento decorrente da tensão constante pode resultar em deformações extremamente elevadas ao longo do tempo, sendo essencial a consideração da fluência em alguns tipos de estruturas, como os Balanços Sucessivos. Com isso, os modelos matemáticos que representam este fenômeno precisam caracterizar bem o problema.

Bazant et al (2011) apresentam estudos que alertam para a necessidade de aplicar a fluência nas análises com a utilização de modelos mais precisos. A Ponte de Palau é um caso conhecido em que o fenômeno da fluência ocasionou deformações excessivas que levaram a ruptura da estrutura 18 anos após sua execução (Figura 18).

Figura 18 – Deformação excessiva a meio vão devido a fluência (I); deformação prevista em projeto e medidas na Ponte de Palau durante a vida útil (II) e Ponte de Palau antes e após a ruptura (III).



Fonte: Yu et al, 2012

Silva et al (2003) destacam que a construção por partes necessita que os fenômenos progressivos devido a fluência produz modificações importantes nos esforços solicitantes e nas deformações ao longo do tempo.

Assim, conhecer os fatores que influenciam o efeito da fluência nas peças de concreto auxilia na determinação do modelo matemático para calcular as deformações. São esses fatores: a idade do carregamento, as dimensões da peça estrutural, a umidade relativa do ar, a resistência do concreto e o tipo de cimento. Segundo Kuperman (2007), esses fatores influenciam da seguinte maneira:

- Idade do carregamento: em concretos com pouca idade, o grau de hidratação ainda não possibilitou que a reação água-cimento acontecesse e, assim, o consequente aumento da resistência. Por essa razão, ao serem submetidos a um carregamento nas primeiras semanas esse material apresenta uma maior deformação por fluência.
- Dimensões da peça estrutural: quanto maior forem as dimensões da peça, maior será a resistência ao transporte da água no interior desta. Assim, a fluência por secagem é menor nas peças com dimensões maiores.
- Umidade relativa do ar: em ambientes cuja umidade relativa é menor ou em torno de 50%, a fluência do concreto pode ser duas ou três vezes maior do que em ambientes úmidos (99%). Isto ocorre porque quanto menor a umidade, maior a perda de água para o ambiente o que aumenta a fluência por secagem.
- Resistência do concreto: o concreto apresenta mais fluência quanto maior a tensão aplicada. Entretanto, concretos de maior resistência, possuem menos fluência.
- Tipo de cimento: a pasta de cimento endurecida é a principal causa de deformações relacionadas à umidade do concreto, pois quanto maior a relação água/cimento, maior será a fluência. As propriedades do cimento que merecem maior atenção são: a finura, a resistência à compressão e a composição química.
- Técnicas construtivas: alguns fatores construtivos estão relacionados ao aparecimento da fluência. Por exemplo, o carregamento que atua na estrutura durante a construção, ainda numa fase em que o concreto não atingiu sua resistência, contribui para o surgimento de tensões que resultam em maior deformação por fluência.

2.2.4.1.1 Cálculo da Fluência do Concreto

A curva tensão-deformação para o concreto é resultado da proporção entre as tensões aplicadas e a deformação ocorrida. Assim, as deformações imediatas, $\varepsilon_c(t_0)$, são expressas pela equação (4):

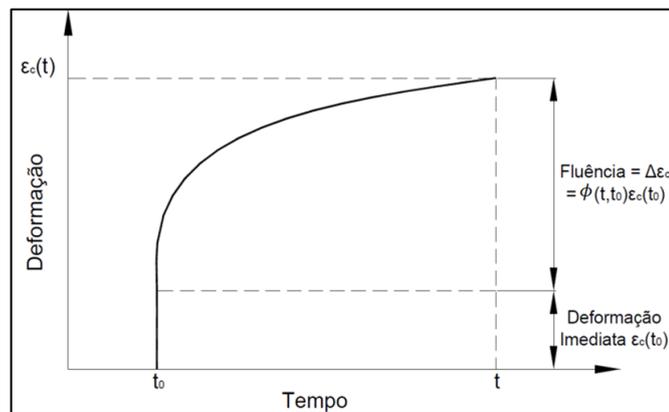
$$\varepsilon_c(t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} \quad (4)$$

Onde: $\sigma_c(t_0)$ é a tensão no concreto.

$E_c(t_0)$ é o módulo de elasticidade do concreto na idade t_0 , em que ocorreu a aplicação da tensão.

Após a aplicação da tensão, as deformações aumentam com o tempo devido ao fenômeno da fluência. A deformação total corresponde à soma das deformações imediatas com as deformações por fluência, conforme o gráfico da Figura 19.

Figura 19 – Fluência no concreto sob efeito de uma tensão constante.



Fonte: Yu et al, 2012.

A razão entre a deformação por fluência e a deformação imediata é o coeficiente de fluência, sendo calculado por modelos matemáticos que caracterizem o fenômeno. Essa deformação é aplicada linearmente e expressa no cálculo como na equação (5).

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_c(t_0) + \phi(t, t_0)\varepsilon_c(t_0) = \varepsilon_c(t_0)[1 + \phi(t, t_0)] = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_c(t_0)} [1 + \phi(t, t_0)] \quad (5)$$

Onde: $\phi(t, t_0)$ é o coeficiente de fluência que é função da idade de carregamento t_0 e da idade t ao qual a deformação será determinada.

As normas apresentam modelos baseados em ensaios experimentais que permitem calcular esses coeficientes, como no caso da CEB-FIP conforme será apresentado adiante.

2.2.4.1.2 Superposição da Fluência

Assim como ocorre na análise incremental, a deformação total envolvendo fluência é uma relação linear dos acréscimos de deformação devido aos incrementos de tensão que ocorram na peça, conforme apresentado por Ghali et al (2014a) e descrito abaixo:

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_c(t_0) \frac{1 + \phi(t, t_0)}{E_c(t_0)} + \int_0^{\Delta\sigma_c(t)} \frac{1 + \phi(t, \tau)}{E_c(\tau)} d\sigma_c(\tau) \quad (6)$$

Onde: t_0 e t são as idades do concreto em que a tensão inicial é aplicada e onde a deformação será considerada.

τ é uma idade intermediária entre t_0 e t .

$\sigma_c(t_0)$ é a tensão inicial aplicada na idade t_0 .

$d\sigma_c(\tau)$ é o incremento de tensão aplicado na idade τ .

$E_c(\tau)$ é o módulo de elasticidade do concreto na idade τ .

$\phi(t, t_0)$ é o coeficiente de fluência na idade t para um carregamento ocorrido na idade t_0 .

O acréscimo de tensão corresponde à introdução de um novo carregamento na estrutura, por isso haverá uma deformação imediata e uma por fluência ao longo do tempo. Sendo a deformação reescrita da seguinte forma:

$$\varepsilon_c(t) = \sigma_c(t_0) \frac{1 + \phi(t, t_0)}{E_c(t_0)} + \frac{\Delta\sigma_c(t)}{\bar{E}_c(t, t_0)} \quad (7)$$

Onde: $\Delta\sigma_c(t)$ é o incremento de tensão

$\bar{E}_c(t, t_0)$ é o módulo de elasticidade ajustado apresentado por Bazant (1972) e Ghali et al (2014b).

A correção do módulo de elasticidade é realizada, devido ao incremento de tensão ocorrer em uma nova idade, necessitando ajustar o módulo de elasticidade para essa nova idade devido ao ganho de resistência do material ao longo do tempo.

$$\bar{E}_c(t, t_0) = \frac{E_c(t_0)}{1 + \phi(t, t_0)} \quad (8)$$

O acréscimo de deformação no período $(t - t_0)$ causado por um incremento de tensão de $\Delta\sigma_c(t)$, de acordo com a equação (7), pode ser escrito como:

$$\Delta\varepsilon_c(t) = \frac{\Delta\sigma_c(t)}{E_c(t,t_0)} \quad (9)$$

2.2.4.1.3 Cálculo de Fluência segundo a Norma CEB-FIP (1993)

Obedecendo a CEB-FIP (1993), o cálculo do coeficiente de fluência está submetido a uma função linear.

$$\varepsilon_{cc}(t,t_0) = \frac{\sigma_c(t_0)}{E_{ci}} \phi(t,t_0) \quad (10)$$

Onde: ϕ é o coeficiente de fluência, equação (11):

$$\phi(t,t_0) = \phi_0 \beta_c(t - t_0) \quad (11)$$

Onde: ϕ_0 é o coeficiente de fluência teórico, equação (12).

β_c é o coeficiente que determina o incremento de fluência com o tempo após o início do carregamento, equação (13).

$$\phi_0 = \phi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (12)$$

$$\beta_c(t - t_0) = \left[\frac{\frac{(t-t_0)}{t_1}}{\beta_H + \frac{(t-t_0)}{t_1}} \right]^{0.3} \quad (13)$$

Onde: ϕ_{RH} é o coeficiente da influência da umidade relativa, equação (14).

$\beta(f_{cm})$ é o coeficiente da influência da resistência característica do concreto, equação (15).

$\beta(t_0)$ é o coeficiente de influência do tempo inicial de carregamento, equação (16).

β_H é o coeficiente da influência da umidade relativa ao longo do tempo, equação (17).

$$\phi_{RH} = 1 + \frac{1 - \frac{RH}{RH_0}}{0.46 \left(\frac{h}{h_0}\right)^{1/3}} \quad (14)$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{5.3}{\left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}}\right)^{0.5}} \quad (15)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0.1 + \left(\frac{t_0}{t_1}\right)^{0.2}} \quad (16)$$

$$\beta_H = 150 \left\{ 1 + \left(1.2 \frac{RH}{RH_0} \right)^{18} \right\} \frac{h}{h_0} + 2 \leq 1500 \quad (17)$$

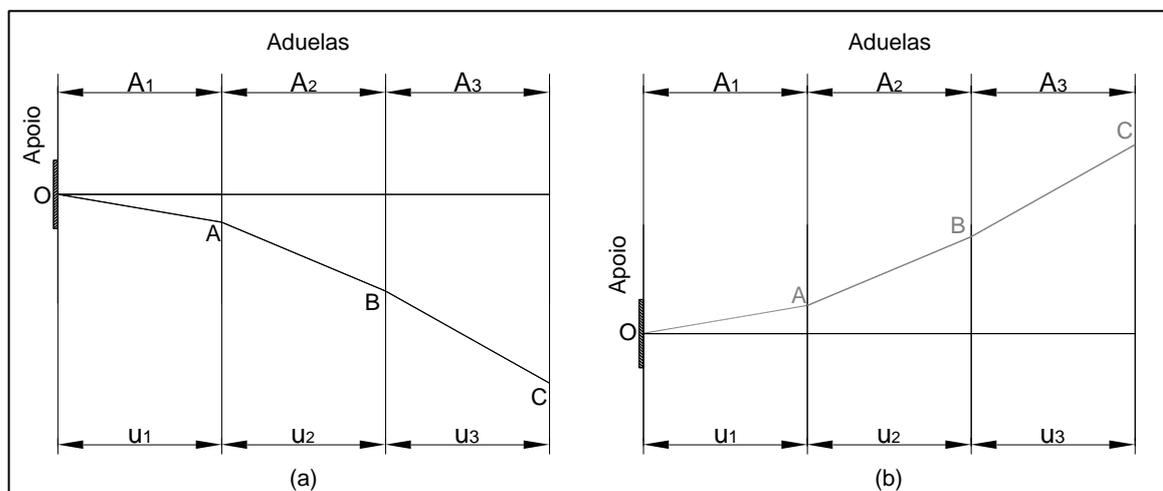
2.2.5 Contra Flecha

O controle das deformações é importante para garantir as condições de utilização de qualquer estrutura. As obras executadas pelo método dos Balanços Sucessivos necessitam atender o perfil final solicitado em projeto, para isso, são aplicadas as contra flechas que impõem deslocamentos contrários de modo a compensar as deformações ocorridas devido às cargas permanentes da estrutura.

2.2.5.1 Cálculo de Contra Flecha

Vários métodos de cálculo podem ser utilizados para determinar os valores das contra flechas a serem aplicados à estrutura. Para a utilização desses métodos, é necessário estimar as deformações previstas para estrutura ainda na fase de projeto.

Figura 20 – Diagrama de deformações (a) e diagrama de contra flechas (b).



Fonte: Santos, 2014.

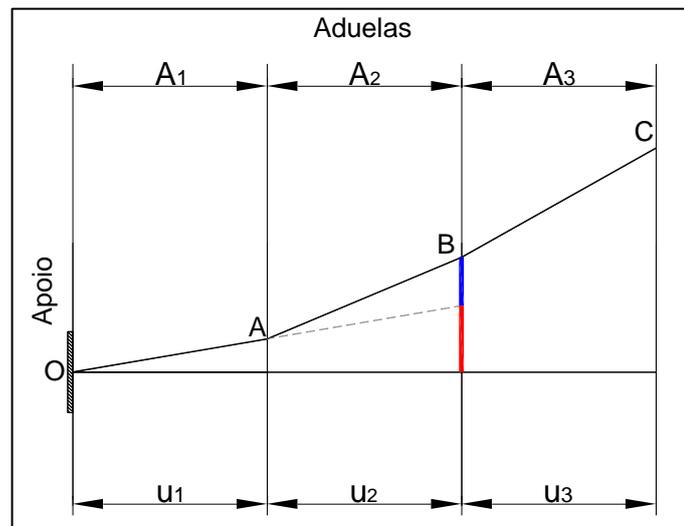
Podolny e Muller (1982) definem que o diagrama de contra flechas é formado pela soma dos valores de deformação das sucessivas aduelas executadas, ou seja, o rebatimento da curva de deformações total da estrutura é o valor de contra flecha a ser aplicado (Figura 20).

A obtenção do diagrama de contra flechas é simples, mas pode acarretar em alguns problemas, pois depende da experiência do construtor na sua utilização. Os métodos de cálculo de contra flecha consideram que o greide da obra é retilíneo e por isso, nos casos contrários precisam ser especificados, para ajustar o eixo de referência no alinhamento correto. Mas a principal dificuldade é a não existência de coordenadas absolutas, pois o sistema muda a cada estágio de

construção, o eixo da aduela executada modifica a cada etapa. Assim, Podolny e Muller (1982), Paim (1983) e Mathivat (1983) sugerem o uso de contra flechas relativas que são os deslocamentos impostos em relação à aduela anteriormente executada. Por esta razão, é que se define a deformação ocorrida após cada estágio construtivo.

O conceito de contra flecha relativa é demonstrado na Figura 21. A contra flecha relativa aplicada ao ponto B, na execução da aduela A2 corresponde ao comprimento azul. A contra flecha relativa está posicionada sobre a projeção da aduela A1, delimitada pelo comprimento vermelho. A contra flecha absoluta é o soma desses dois comprimentos, azul e vermelho, e totaliza o somatório de todos os deslocamentos ocorridos no ponto B.

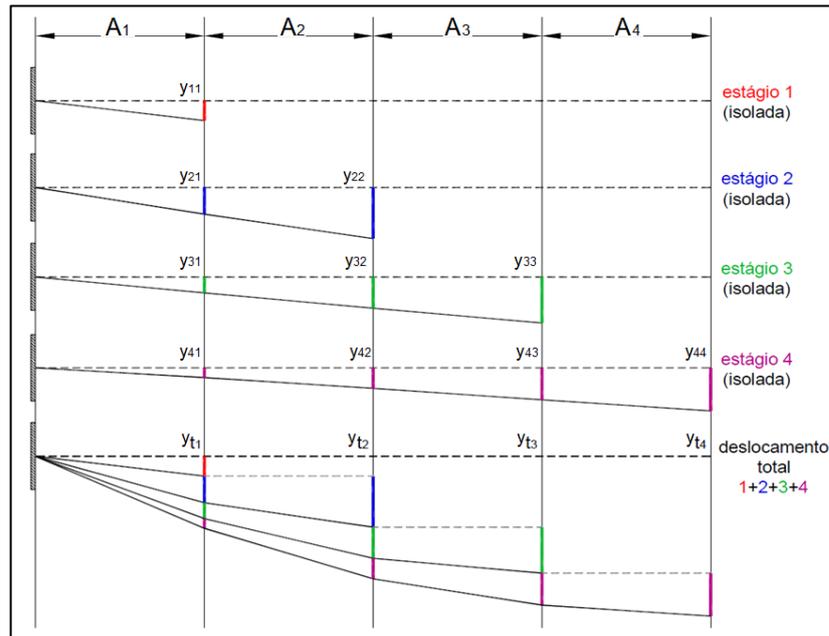
Figura 21 – Esquema com contra flecha absoluta e relativa.



Fonte: Santos, 2014.

Santos (2014) apresenta uma adaptação da metodologia de cálculo apresentada por Paim (1983). Quando as aduelas ainda não foram executadas, os deslocamentos são obtidos pelo prolongamento tangencial da linha elástica em cada estágio, como pode ser visto no caso genérico apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Viga genérica com 4 aduelas executada em Balanços Sucessivos.



Fonte: A autora, 2020.

Os deslocamentos isolados e seu prolongamento em cada estágio permite calcular os deslocamentos acumulados no nó j (ponto extremo da aduela), a cada estágio de construção i , com a equação (18).

$$Y_{a_{ij}} = \sum_{k=1}^i y_{kj} \quad (18)$$

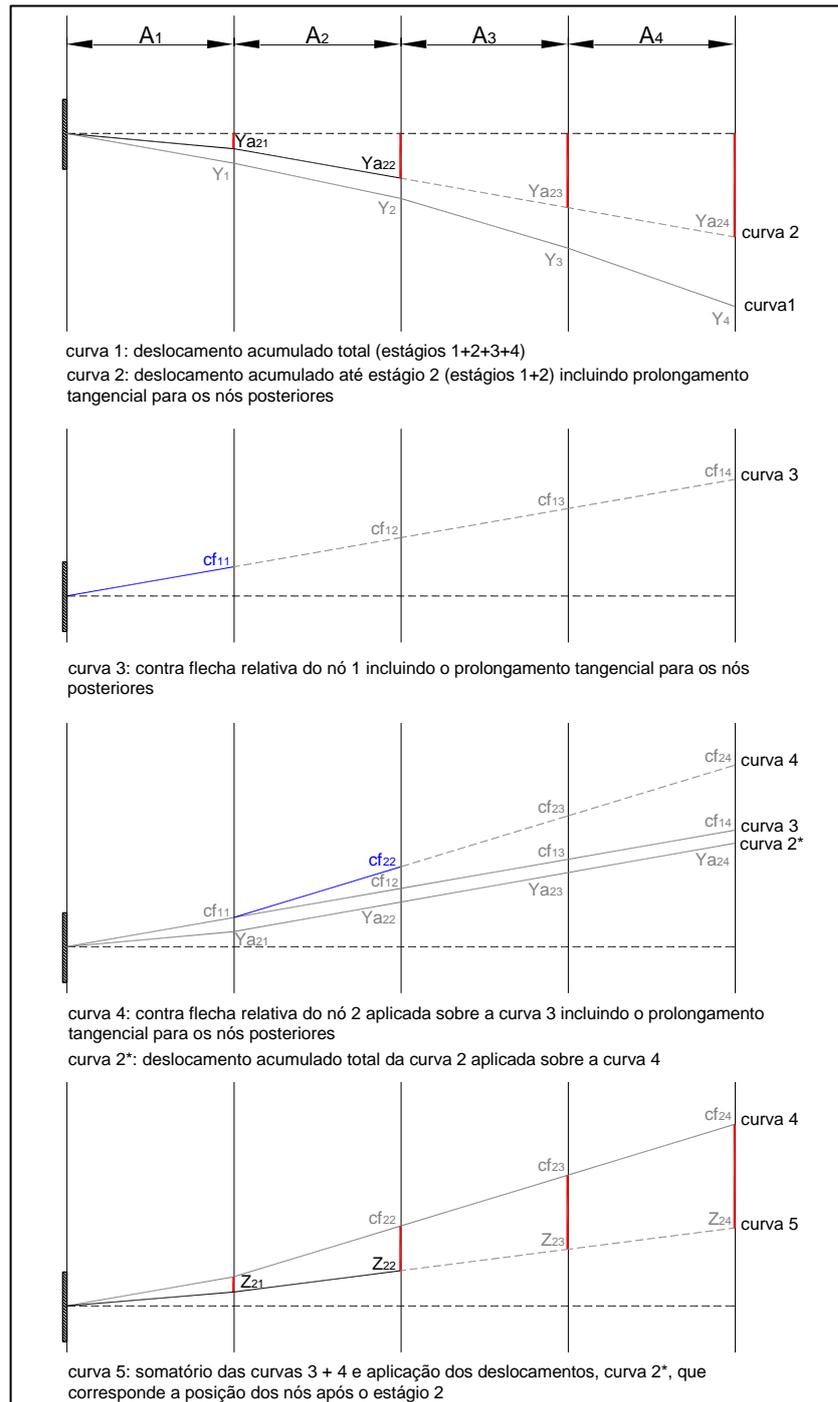
Onde: $Y_{a_{ij}}$ é o deslocamento acumulado no nó j , até a execução do estágio i .

O somatório de todos os deslocamentos isolados na execução do último estágio de construção (n) é o deslocamento acumulado total, Y_j , a última configuração de viga mostrada na Figura 22 e conforme calculado abaixo.

$$Y_j = \sum_{k=1}^n y_{kj} \quad (19)$$

A contra flecha absoluta de cada nó é o deslocamento acumulado total rebatido. Porém, a mudança de eixo da aduela após cada estágio é a dificuldade de aplicação desse diagrama de contra flecha, por isso é recomendado o uso da contra flecha relativa em cada estágio.

Figura 23 – Viga genérica determinando a projeção da posição do nó 3, após a execução da aduela 2.



Fonte: Santos, 2014.

Considerando o conceito de contra flecha relativa para a execução de uma nova aduela, é necessário conhecer a posição do nó j a ser executado, de acordo com o prolongamento tangencial da posição da aduela anterior. Por isso, deve-se calcular a projeção da posição do nó j até a execução do estágio anterior. Assim, a posição das aduelas durante a execução de cada estágio é a curva do deslocamento acumulado incluindo a aplicação das contra flechas relativas,

Z_{ij} . Na Figura 23, é possível determinar a projeção da posição do nó 3, após a execução da aduela 2 para uma viga genérica.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Deslocamento acumulado} \\ \text{incluindo contra flechas} \\ \text{relativas para o estágio (i-1)} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Deslocamento acumulado} \\ \text{até o estágio (i-1)} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Contra flecha relativa} \\ \text{acumulada até a execução} \\ \text{do estágio (i-1)} \end{array} \right)$$

$$Z_{(i-1)j} = Ya_{(i-1)j} + \sum_{k=1}^{(i-1)} cf_{kj} \quad (20)$$

Onde: $Z_{(i-1)j}$ é o deslocamento acumulado no nó j, incluindo contra flechas relativas até a execução do estágio (i-1): estágio anterior ao que se deseja calcular.

$Ya_{(i-1)j}$ é o deslocamento acumulado no nó j, até a execução do estágio (i-1): estágio anterior ao que se deseja calcular.

$\sum_{k=1}^{(i-1)} cf_{kj}$ é a contra flecha relativa acumulada no nó j, até a execução do estágio (i-1): estágio anterior ao que se deseja calcular.

Na execução da primeira aduela não existem dados referentes ao estágio anterior, dessa forma, a posição dos nós no estágio 1 é igual a 0, $Z_{1j} = 0$. Conhecendo a posição do nó j, é possível determinar que a contra flecha relativa a ser aplicada neste nó na execução do estágio i, juntamente com os deslocamentos que ainda ocorrerão na estrutura para atender o perfil vertical de projeto. Assim, a contra flecha relativa a ser aplicada em um nó j, para a execução do estágio i, é definida por (21), e a projeção dos nós subsequentes é dado por (22):

$$\left(\begin{array}{c} \text{Contra flecha relativa} \\ \text{do estágio i} \end{array} \right) = - \left[\left(\begin{array}{c} \text{Prolongamento tangencial} \\ \text{das contra flechas relativas} \\ \text{até o estágio (i-1)} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{Deslocamento} \\ \text{acumulado total} \end{array} \right) \right]$$

$$cf_{ij} = - \left(\sum_{k=1}^{(i-1)} cf_{kj} + Y_j \right) \quad (21)$$

$$cf_{ij} = \frac{cf_{ii}}{u_i} \cdot \sum_{k=i}^j u_k \quad \text{se } j > i \quad (22)$$

Onde: cf_{ij} é a contra flecha relativa no nó executado, no estágio de construção i.

$\sum_{k=1}^{(i-1)} cf_{kj}$ é o prolongamento tangencial das contra flechas relativas até o estágio (i-1).

Y_j é o deslocamento acumulado total.

cf_{ii} é a contra flecha relativa no nó executado, no estágio de construção em que $i=j$.

u_i é o comprimento da aduela do nó executado.

$\sum_{k=i}^j u_k$ é o comprimento total referente à aduela executada até a aduela que se deseja saber o nó projetado.

2.2.5.1.1 Método de PAIM

A metodologia original do método de Paim (1983), baseada nas projeções tangenciais das contra flechas, apresenta o cálculo através de um quadro resumo em que cada linha representa uma etapa de cálculo, conforme pode ser visto na Figura 24.

Figura 24 – Esquema para a determinação das contra flechas e níveis atingidos fase por fase.

ESQUEMA PARA A DETERMINAÇÃO DAS CONTRA FLECHAS E NÍVEIS ATINGIDOS FASE POR FASE					
1	y11	(y21)	(y31)	(y41)	estágio 1 isolada
2	y12	y22	(y32)	(y42)	estágio 2 isolada
3	y13	y23	y33	(y43)	estágio 3 isolada
4	y14	y24	y34	y44	estágio 4 isolada
5	y1	y2	y3	y4	$y_i = \sum_{j=1}^4 y_{ij}$ = deformação total sem contra flecha
6	cf11	(cf21)	(cf31)	(cf41)	1ª contra flecha $f11 + y1 = 0$
7	Z11	(Z21)	(Z31)	(Z41)	nível na estágio 1: (7) = (6) + (1)
8	-	cf22	(cf32)	(cf42)	2ª contra flecha $f22 + Z21 + y22 + y23 + y24 = 0$
9	Z12	Z22	(Z32)	(Z42)	nível na estágio 1+2: (9) = (8) + (7) + (2)
10	-	-	cf33	(cf43)	3ª contra flecha $f33 + Z32 + y33 + y34 = 0$
11	Z13	Z23	Z33	(Z43)	nível na estágio 1+2+3: (11) = (10) + (9) + (3)
12	-	-	-	cf44	4ª contra flecha $f44 + Z43 + y44 = 0$
13	Z14	Z24	Z34	Z44	nível final: (13) = (12) + (11) + (4)

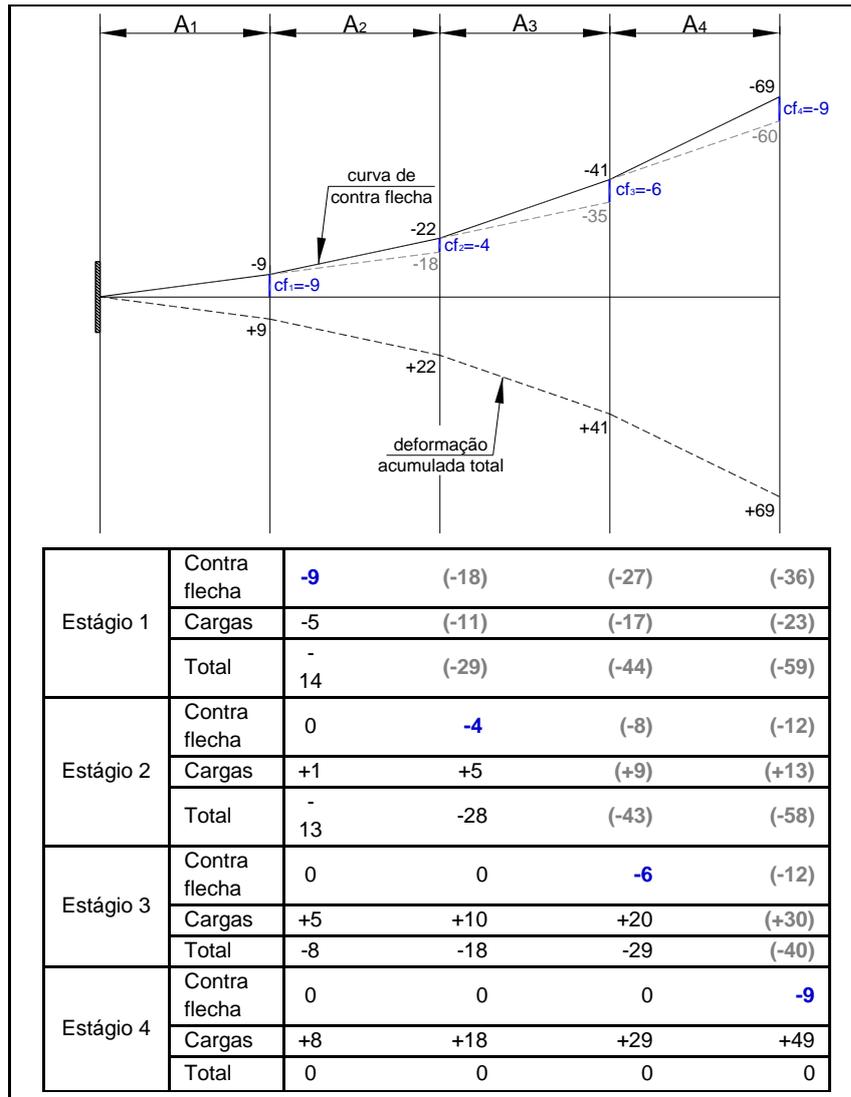
Fonte: Paim, 1983.

2.2.5.1.2 Método de PODOLNY e MULLER

O cálculo da contra flecha realizado pela equação (22), pode ser encontrado também na metodologia apresentada por Podolny e Muller (1982), e chega-se aos mesmos valores para as contra flechas do método de Paim. Uma apresentação da aplicação do método é mostrada na Figura 25.

É possível encontrar outros autores, como Mathivat (1983) que também utiliza a mesma metodologia para esse cálculo.

Figura 25 – Posição dos segmentos após aplicação das cargas incluindo as contra flechas.

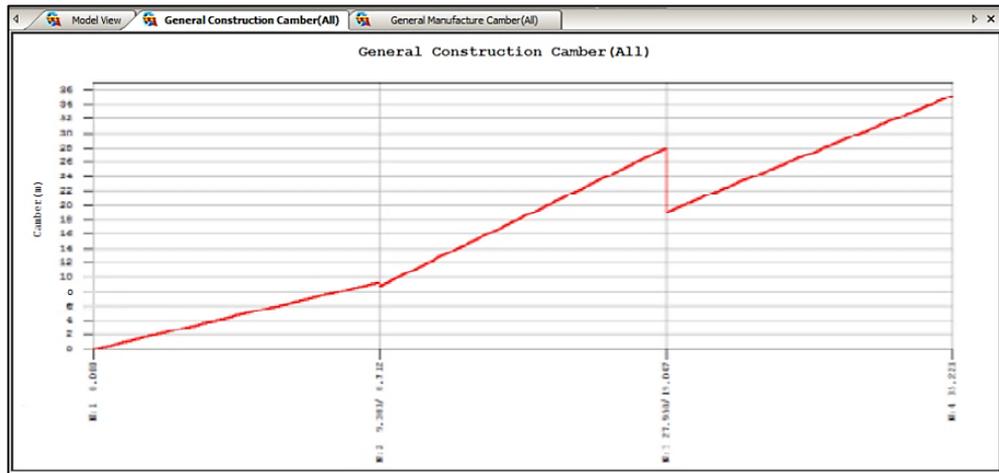


Fonte: Podolny e Muller, 1983.

2.2.5.1.3 Cálculo de Contra Flecha em Simulador Estrutural

A utilização de programas de análise estrutural, também, permite determinar as contra flechas. Uma dessas ferramentas é o MIDAS/Civil (2006), que modela a estrutura executada em Balanços Sucessivos com todas as etapas executivas, calculando as deformações ocorridas e determinando os valores de contra flechas que devem ser aplicados durante a construção. O gráfico de resultado do programa com esses valores é apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Exemplo do gráfico de contra flecha, fornecido pelo MIDAS/Civil.



Fonte: Santos, 2014.

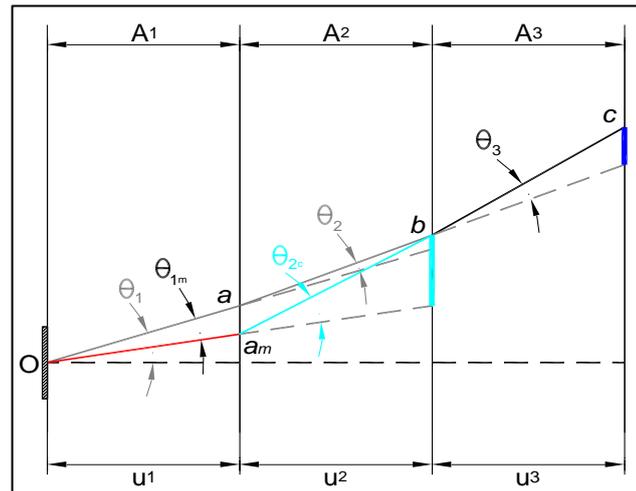
2.2.5.2. Controle e correção de contra flecha durante a execução da Obra

As deformações residuais em relação à configuração final ocorrem mesmo com a aplicação das contra flechas. Problemas na execução ou má caracterização das propriedades do material utilizado durante a fase de análise do projeto ocasionam essas diferenças de deformação em que a estrutura estará submetida. A utilização dos dados levantados em campo permite identificar a necessidade de correção nos valores das contra flechas para os segmentos que ainda não foram executados. Estes mesmos dados são utilizados na adaptação do modelo estrutural para que seja compatível com a construção real (BERGER et al, 2009; BERGER et al, 2010; FARIA, 2009). Com isso, métodos corretivos ajustam os valores das contra flechas dos elementos subsequentes.

2.2.5.2.1 Método de Correção de Contra Flecha de OYAMADA

Esta correção de contra flecha é realizada considerando a posição geométrica dos segmentos. Oyamada (2004) propõe que os ajustes realizados permitam posicionar as aduelas seguintes em concordância com o projeto original. Inicialmente, são avaliados os dados de posição vertical levantados em campo, a_m , em relação à posição da aduela estimada em projeto, a (Figura 27).

Figura 27 – Contra flecha corrigida para a aduela A2.

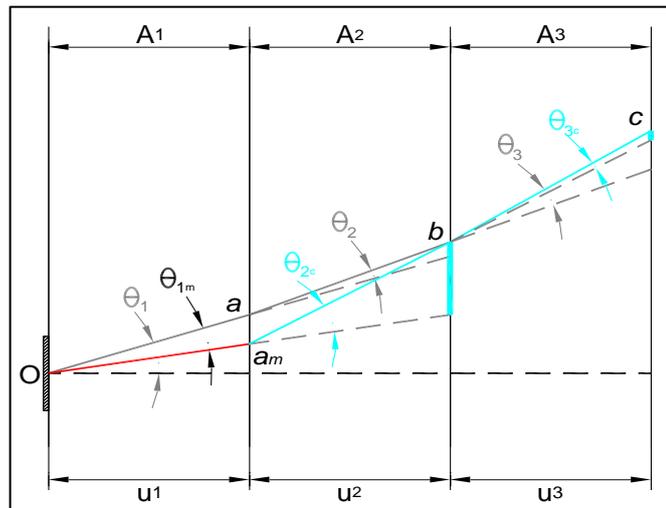


Fonte: Santos, 2014.

Se $a_m = a$, as contra flechas calculadas serão mantidas. Caso contrário, se $a_m \neq a$, as contra flechas deverão ser corrigidas. Essa correção será na aduela subsequente, compensando no ângulo da nova aduela (θ_2) a diferença ocorrida na aduela anterior, conforme Figura 27.

Como a nova inclinação (θ_2) provoca uma nova projeção na aduela seguinte a este trecho, a contra flecha também deverá ser corrigida para que se possa seguir com o mesmo plano de contra flechas inicialmente admitido (Figura 28).

Figura 28 – Contra flecha corrigida para a aduela A3.



Fonte: Santos, 2014.

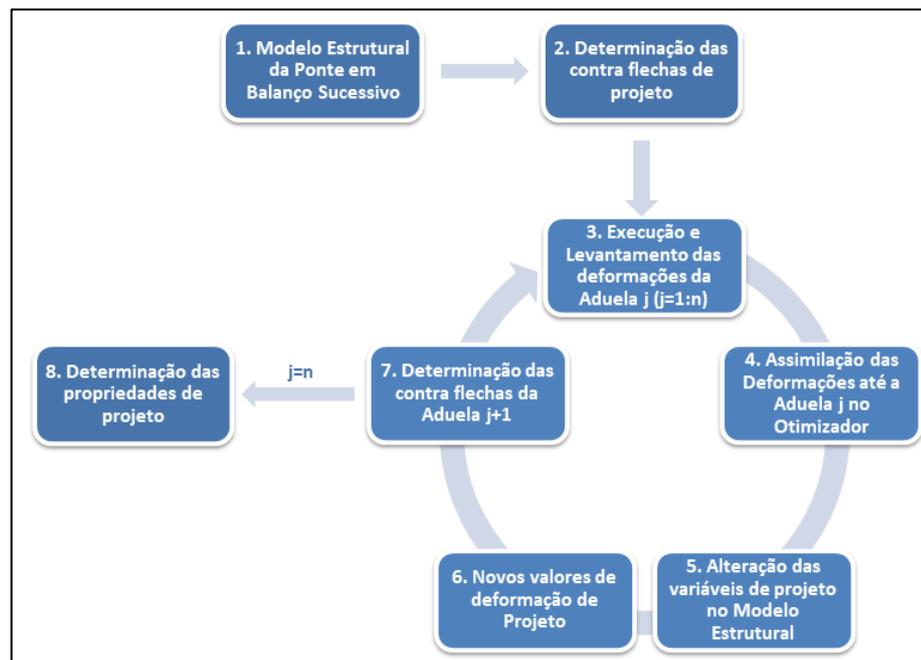
2.2.5.2.2 Método de Correção de Contra Flecha de SANTOS

Métodos computacionais para a correção das contra flechas também podem ser aplicados. Podem ser através de análise de regressão linear (LAI e WANG, 2010), uso de redes neurais

caracterizando o concreto em campo (JUNG, 2004) e otimização das deformações de projeto com as reais.

Santos (2014) propõem o procedimento para correção das contra flechas através do método dos Mínimos Quadrados, que será apresentado adiante. Com os dados dos levantamentos de campo, as características do concreto utilizado na obra são redefinidas e as novas deformações para o projeto são estimadas, readequando as contra flechas a nova configuração. A sequência das etapas do processo pode ser vista na Figura 29:

Figura 29 – Etapas para determinar as contra flechas aplicadas às aduelas, considerando os dados obtidos nos levantamentos de campo.



Fonte: A autora, 2020.

As etapas de 3 à 7 compõem um processo iterativo, para correção das contra flechas após a execução de cada aduela, por isso o número de etapas de cálculo depende do número total de aduelas da estrutura.

3 INCERTEZAS NAS VARIÁVEIS DO PROJETO ESTRUTURAL

A existência de incertezas deve ser considerada nas análises dos problemas de engenharia, porém muitas vezes os estudos são simplificados para obter uma solução mais prática. Por isso, no desenvolvimento de projetos de estruturas são comuns análises baseadas em metodologias semi-probabilísticas, que consideram as incertezas através do uso de fatores de segurança.

De acordo com Ghali et al (2014b), as incertezas que compõem o projeto estrutural podem ter suas principais causas em fatores humanos ou naturais. Os fatores humanos são aqueles em que há interferência humana no resultado final de maneira intencional ou não. Por exemplo, durante o projeto pode ocorrer influência nos cálculos ou na aproximação de valores. Outro caso é durante a construção, as incertezas surgem através dos materiais utilizados ou pelo método construtivo empregado. Nos fatores naturais, as incertezas ocorrem na atuação de algum carregamento, como vento, terremoto, pressão da água e cargas móveis.

Como já dito, nos problemas de engenharia, as análises são abordadas como determinísticas e fatores de segurança são utilizados para consideração das incertezas. Entretanto, a maneira mais adequada para que as incertezas sejam incorporadas ao problema, é através do emprego de análise probabilística das variáveis de projeto. O estudo probabilístico permite projetar e fazer o gerenciamento de estruturas existentes com um conhecimento estatístico, o que é essencial para uma previsão do seu comportamento no período pretendido (MUSTAFA, 2014; MOTTA e AFONSO, 2016).

O desenvolvimento de pesquisas nessa área é de grande interesse, devido às dificuldades que ainda são encontradas na identificação das distribuições dos parâmetros de incerteza de algumas variáveis e da sua aplicação nos problemas de engenharia, principalmente nos problemas com simulações numéricas mais complexas.

3.1 INCERTEZAS

Os problemas de engenharia apresentam diversos graus de incertezas que funcionam nos modelos como variáveis aleatórias associadas ao modelo estudado. Esse conjunto de variáveis caracteriza ações e influências ambientais, propriedades do material e do solo e seções geométricas, sendo definidas por parâmetros como média e desvio padrão que determinam as

variações possíveis da estrutura e suas probabilidades. Com isso, é importante que as incertezas sejam avaliadas e integradas ao modelo através de variáveis aleatórias.

Segundo o Joint Committee on Structural Safety (JCSS, 2001), os tipos de incertezas podem ser classificados em:

- Incerteza física ou mecânica intrínseca;
- Incerteza do modelo;
- Incerteza estatística, quando as decisões de projeto são baseadas em amostras de observações.

O tipo de distribuição de probabilidade das variáveis precisa ser definido de acordo com o problema estudado no projeto estrutural.

3.1.1 Tipos de incerteza

As incertezas podem ser apresentadas de três formas:

3.1.1.1 Incerteza física ou mecânica intrínseca

Esse tipo de incerteza é dividido em dois grupos: um devido às propriedades dos materiais e outro ocasionado por ações externas, como um conjunto de forças.

3.1.1.1.1 Incerteza inerente às propriedades dos materiais

As propriedades de um material são definidas por um modelo matemático (modelo elástico-plástico ou modelo de fluência) e um conjunto de variáveis aleatórias (módulo de elasticidade ou coeficiente de fluência).

Uma modelagem é uma representação simplificada da realidade, por isso, os modelos devem conter os dados que representem as condições ambientais e de carregamento da melhor forma possível, além de considerar as incertezas inerentes às propriedades dos materiais que são aplicadas aos projetos. A variabilidade das propriedades do material pode estar relacionada à heterogeneidade dele e até ao processo de fabricação.

As informações sobre as propriedades dos materiais de construção são obtidas através de resultados de ensaios realizados. Para novos materiais, os modelos probabilísticos devem ser definidos com ensaios e estudos mais criteriosos.

No caso das estruturas de concreto, o valor da resistência é encontrado com a realização do ensaio de compressão, e a variabilidade dos valores apresentados ocorre devido aos diversos materiais utilizados na sua fabricação, e também pela maneira como esse concreto é produzido, devido ao adensamento e cura. Outras propriedades, como a elasticidade é determinada por funções matemáticas desenvolvidas com estudos anteriores que os relacionam com os valores de outras propriedades. O uso de funções matemáticas consideram a natureza do material e as incertezas do próprio modelo matemático, que será visto mais adiante.

3.1.1.1.2 Incertezas inerentes às ações externas

As ações externas são aquelas que produzem sobre a estrutura esforços internos e deformações, sendo de ações diretas (cargas atuantes nas estruturas) ou indiretas (efeitos diferidos no tempo, como tensão de fluência). O modelo estatístico das incertezas de ações externas possui um caráter aleatório, ou seja, é definido por uma função de distribuição de probabilidade, estando sujeita também as incertezas do modelo matemático.

3.1.1.2 Incertezas do modelo matemático

Para prever um determinado evento, os modelos matemáticos devem ser uma aproximação da realidade, de maneira a determinar as propriedades dos materiais, a estimativa do carregamento atuante e o comportamento mecânico da estrutura. Por isso, o modelo de cálculo é uma relação física ou empírica entre as variáveis aleatórias, expresso pela equação:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (23)$$

Onde: Y é o resultado do modelo de cálculo.

$f()$ é a função do modelo de cálculo.

x_i são as variáveis aleatórias.

Os valores de x_i são obtidos com a realização de experimentos, o que pode tornar o modelo da função incompleto e inexato, pois uma simplificação do modelo pode levar a perda de precisão

dos resultados. Para evitar este problema, a diferença entre previsão do modelo e o resultado real deve ser a menor possível, e a equação (23) é modificada para:

$$Y = f(x_1, \dots, x_n, \theta_1, \dots, \theta_m) \quad (24)$$

Onde: θ_i são parâmetros que contêm as incertezas matemáticas do modelo de cálculo.

Esses parâmetros, também, são tratados como variáveis aleatórias, que possuem suas propriedades estatísticas derivadas de experimentos e observações.

3.1.1.3 Incerteza estatística

As variáveis aleatórias dos modelos consideram o comportamento probabilístico, cujos parâmetros estatísticos são determinados através da observação de amostras. Por isso, a incerteza estatística de um modelo está relacionada ao tamanho das amostras para determinar quais os parâmetros estatísticos.

3.2 VARIÁVEIS DETERMINÍSTICAS E ALEATÓRIAS

É comum durante um estudo a repetição de experimentos para validação das análises. Caso os resultados encontrados apresentem os mesmos valores, significa que as variáveis do problema são de natureza determinística. Porém, os experimentos, em geral, não produzem os mesmos resultados, estando sujeitos às incertezas inerentes ao problema. Neste caso, as variáveis são aleatórias (FURST, 2017).

As variáveis aleatórias que regem os problemas estruturais são caracterizadas por alguns parâmetros que descrevem o comportamento da função da variável e possui uma função de densidade associada (Probability Density Function ou PDF). Melchers e Beck (2018) apresentam estes parâmetros, suas médias e variâncias.

3.2.1 Média

A média de uma variável aleatória é a tendência central do valor da variável e é definida pela equação (25), conforme Melchers e Beck (2018):

$$E[x] = \mu_x = \int_{-\infty}^{\infty} x f_x(x) dx \quad (25)$$

Onde: $f_x(x)$ é a função de densidade de probabilidade da variável aleatória x .

3.2.2 Variância

É a medida de dispersão dos valores encontrados em torno da média. Segundo Melchers e Beck (2018), é expresso pela equação (26):

$$Var(x) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu_x)^2 \cdot f_x(x) dx \quad (26)$$

Onde: μ_x é a média da variável aleatória x .

$f_x(x)$ é a função de densidade de probabilidade da variável aleatória x .

3.2.3 Desvio padrão e coeficiente de variação

O desvio padrão é outra medida da dispersão e é definido em função da variância, conforme a equação (27).

$$\sigma_x = \sqrt{Var(x)} \quad (27)$$

Onde: $Var(x)$ é a variância da variável aleatória x .

Para comparar a dispersão de variáveis diferentes, é utilizado o coeficiente de variação por ser adimensional e normalizado pela média (FURST, 2017). De acordo com a equação (28), o coeficiente de variação (CV) é dado pela divisão do desvio padrão pela média.

$$CV = \frac{\mu_x}{\sigma_x} \quad (28)$$

3.3 DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

A PDF possibilita descrever estatisticamente as variáveis aleatórias, sendo possível representar a geometria das estruturas, as características dos materiais, os carregamentos aplicados, entre outros, de forma probabilística.

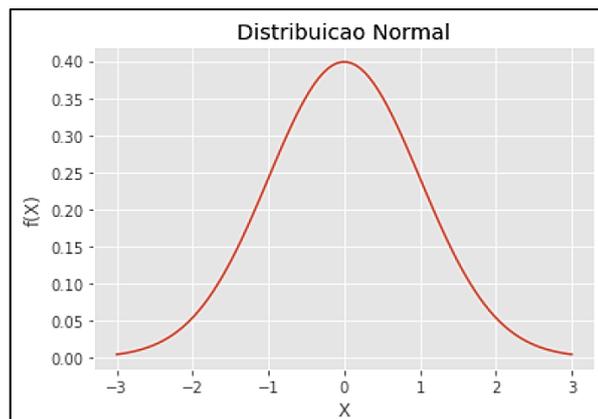
JCSS (2001), Ghali et al (2014b) e Melchers e Beck (2018) apresentam várias funções de distribuição de probabilidade. As mais usuais são a normal e a lognormal.

3.3.1 Distribuição Normal

A distribuição normal é muito utilizada em análises estocásticas para descrever as variáveis aleatórias. A PDF dessa distribuição é dada por uma curva com representação semelhante à Figura 30 e pela seguinte função:

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right] \quad (29)$$

Figura 30 – PDF de uma distribuição normal.



Fonte: Alves, 2018.

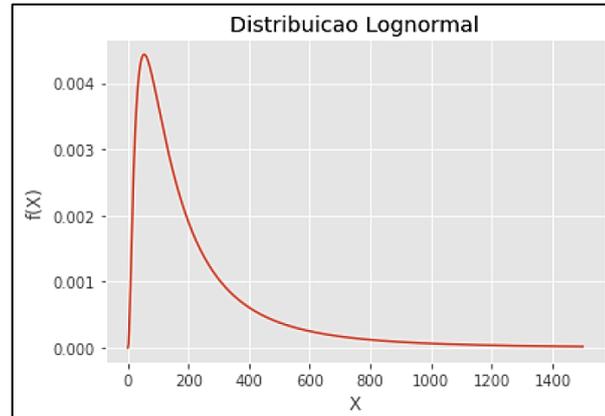
A variável x descrita por distribuição normal é transformada em distribuição normal padronizada z (com média igual a zero e desvio padrão unitário), devido à complexidade da PDF original (ALVES, 2018), sendo escrita da seguinte forma:

$$z = \frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \quad (30)$$

3.3.2 Distribuição Lognormal

A distribuição lognormal aparece em muitos problemas de engenharia. É utilizada quando os valores estatísticos apresentam somente um único sinal, positivo ou negativo, apresentando uma curva de acordo com a figura abaixo.

Figura 31 – PDF de uma distribuição lognormal.



Fonte: Alves, 2018.

Nesta distribuição, a variável aleatória x é substituída pelo logaritmo da variável x , cuja função da PDF é a equação (31) (MELCHERS e BECK, 2018).

$$f_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x \epsilon}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln(x) - \lambda}{\epsilon} \right)^2 \right] \quad (31)$$

Onde: λ é dada pela equação (32).

ϵ^2 é dada pela equação (33).

$$\lambda = E(\ln(x)) = \mu_{\ln(x)} \quad (32)$$

$$\epsilon^2 = Var(\ln(x)) = \sigma_{\ln(x)}^2 \quad (33)$$

Onde: $\mu_{\ln(x)}$ é a média do logaritmo da variável aleatória x

$\sigma_{\ln(x)}$ é o desvio padrão do logaritmo da variável aleatória x

3.4 AJUSTE DE DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA

A curva de distribuição estatística é ajustada ao histograma da variável aleatória para que represente o comportamento da variável. Os dados para realização desse processo podem ser

obtidos experimentalmente, porém alguns casos não são possíveis realizar um procedimento prático. Por isso o conjunto de amostras pode ser obtido através de uma simulação de Monte Carlo, para isto basta ter um modelo matemático que a descreva em função de outras variáveis de PDF conhecida e a distribuição de probabilidade destas variáveis (BECK, 2008).

3.4.1 Simulação de Monte Carlo

O método Monte Carlo (MC) é utilizado em várias análises estatísticas, bem como na avaliação numérica de integrais através do estudo da função de interesse. É muito utilizado em análises quantitativas e em problemas relacionados à propagação de incertezas. A ideia do método é simular estocasticamente o comportamento do sistema modelado (CARDOSO et al, 2008).

Repetidas simulações são realizadas, utilizando em cada uma delas um conjunto particular de valores de variáveis aleatórias geradas de acordo com as correspondentes distribuições de probabilidade conjunta. As variáveis aleatórias possuem um tamanho de amostra N , que corresponde à quantidade de simulações realizadas para obter um conjunto de soluções. Por isso, a amostragem gerada pelo MC é considerada uma amostra de observações experimentais, fazendo deste método uma análise estatística (ANG e TANG, 1984).

Por essa razão, ao ser conhecida a função de distribuição de probabilidade conjunta das variáveis aleatórias, o método MC pode ser aplicado para cálculos aproximados de várias respostas estatísticas, desde que haja pontos amostrados em número suficiente, ou seja, o tamanho da amostra (N) represente com acuidade do problema (BUCHER, 1988).

O procedimento para utilização do MC requer uma distribuição uniforme aleatória de números entre 0 e 1, para gerar uma distribuição de números normais padrão $\{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ (GHALI et al, 2014b). Os pontos de amostra para uma distribuição normal padrão são obtidos através da equação (34).

$$x_i = \mu_x + z_i \sigma_x \quad (34)$$

No caso da distribuição lognormal, um conjunto z de números também é utilizado para gerar valores da variável. Como visto anteriormente, na distribuição lognormal a variável é substituída pelo logaritmo da variável, assim, os pontos de amostra desse tipo de distribuição obedecem à equação (35).

$$x_i = \exp(\mu_y + z_i \sigma_y) \quad (35)$$

Onde: $\mu_y = \mu_{\ln(x)}$ é a média do logaritmo da variável aleatória x , equação (36).

$\sigma_y = \sigma_{\ln(x)}$ é o desvio padrão do logaritmo da variável aleatória x , equação (37)

$$\mu_y = \ln(\mu_x) - \frac{1}{2} \sigma_y^2 \quad (36)$$

$$\sigma_y^2 = \ln(1 + \text{Var}_x^2) \quad (37)$$

4 ASSIMILAÇÃO DE DADOS E AJUSTE HISTÓRICO

O procedimento de otimização requer o uso de dados assimilados em campo e o ajuste através do avanço das etapas construtivas.

4.1 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO UTILIZANDO O ACOMPANHAMENTO DAS DEFORMAÇÕES

O acompanhamento das deformações ocorridas na estrutura permite caracterizar as propriedades do concreto utilizado na obra. Algumas características do concreto podem apresentar parâmetros diferentes dos que foram utilizados para o cálculo das deformações de projeto devido à dosagem dos materiais, o tipo de agregado e questões operacionais de lançamento. Com isso, os deslocamentos ocorridos na estrutura são diferentes dos valores estimados.

Santos (2014) propõe que a diferença entre as deformações estimadas e ocorridas precisam ser minimizada de maneira a atender ao greide de projeto. Por isso, os dados dos deslocamentos ocorridos são associados a um processo de otimização, para determinar os valores dos parâmetros incertos, de forma que as alterações nos deslocamentos em todos os nós da estrutura, após a execução de cada aduela, sejam as menores possíveis. Com esses novos parâmetros, novas contra flechas são estimados para o restante da estrutura. No presente trabalho, devido ao processo ser estocástico, pretende-se encontrar os valores dos parâmetros que na média melhor se adapta aos valores de deslocamentos medidos.

Para essa metodologia, o cálculo das deformações é realizado utilizando a Norma CEB-FIP, com o auxílio de um simulador estrutural autoral adequado ao problema de pontes em Balanços Sucessivos considerando o fenômeno da fluência, que não foi considerado em pesquisas anteriores. A distribuição de probabilidade dos deslocamentos é calculada utilizando várias simulações através do método MC. As variáveis de otimização são a resistência característica do concreto (f_{ck}), como parcela que influencia a deformação imediata e a média da umidade relativa (RH), para as deformações diferidas. Como constatado por Santos (2014), estes parâmetros apresentam grande influência para o cálculo das deformações.

As variáveis de projeto e o problema de otimização são formulados segundo a equação (39):

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f(x) = \sum_{i=1}^n f_i^2(x) \\ \text{Sujeito a:} \quad & x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1 \dots n \end{aligned} \quad (39)$$

Onde x são variáveis de projeto, f_{ck} e RH.

x_i^L e x_i^U são seus limites mínimo e máximo admissíveis.

Os limites das variáveis de projeto são determinados através da possibilidade de ocorrência real desses parâmetros. O f_{ck} com valores encontrados entre 20 MPa e 70 MPa e, no caso da RH, baseando-se no cálculo da influência da umidade que a Norma CEB-FIP (1993) apresenta com valores compreendidos entre 40% e 99%.

A função $f_i(x)$, a ser aplicada ao problema de otimização, é o cálculo do erro ocorrido entre as deformações estimadas e as reais da estrutura, em cada ponto, a cada etapa executada, equação (40). A eliminação da compensação dos erros positivos e negativos faz a função $f_i(x)$ aparecer de maneira quadrática na função objetivo.

$$f_i(x) = \frac{y_{iP}(x) - y_{iR}}{y_{iR}} = \frac{y_{iP}(x)}{y_{iR}} - 1 \quad (40)$$

Onde: $y_{iP}(x)$ são os deslocamentos estimados em projeto.

y_{iR} são os deslocamentos ocorridos na estrutura, obtidos em levantamento topográfico.

A utilização de dados de campo permite a aplicação do método dos Mínimos Quadrados Não Linear, por ser um problema de ajuste de função com levantamento de dados com característica não linear.

4.1.1 Algoritmo do Método dos Mínimos Quadrados

O Método dos Mínimos Quadrados, em geral, é utilizado para encontrar um vetor x minimizador de uma função que é uma soma de quadrados, conforme foi apresentado na equação (39). É muito útil na aplicação de problemas práticos, pois encontra parâmetros para um modelo matemático que melhor descreva um conjunto de dados numéricos de um experimento. Esse método é um caso particular da aplicação do método de Newton, não sendo necessário calcular as derivadas segundas, que podem ser custosas de se obter (MARQUARDT, 1963).

Dado o seguinte problema de otimização da equação (41):

$$\begin{aligned} \text{Minimize} \quad & f(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [r_i(x)]^2 \\ \text{Sujeito a:} \quad & x_i^L \leq x_i \leq x_i^U \quad i = 1 \dots n \end{aligned} \quad (41)$$

Aplicando o método de Newton, para solucionar o problema, a função é desenvolvida até a segunda ordem da série de Taylor em cada ponto iterado, \bar{x} , como pode ser visto na equação (42). Para isso, é necessário obter as derivadas da função que são o Gradiente, $\nabla f(x)$, e a Hessiana, $\nabla^2 f$.

$$f(x) = f(\bar{x}) + \nabla f(\bar{x})^T (x - \bar{x}) + \frac{1}{2} (x - \bar{x})^T \nabla^2 f(\bar{x}) (x - \bar{x}) \quad (42)$$

A função escrita de maneira matricial, $R(x)$, é apresentada na equação (43):

$$f(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [r_i(x)]^2 = \frac{1}{2} R(x)^T R(x) \quad (43)$$

Assim, o Gradiente da função é calculado através da equação (44), em que $J(x)$ é o Jacobiano de $R(x)$:

$$\nabla f(x) = \sum_{i=1}^n r_i(x) \nabla r_i(x) = [J(x)]^T R(x) \quad (44)$$

O cálculo da segunda derivada, a Hessiana, $H(x)$, é realizado pela equação (45):

$$\nabla^2 f(x) = \sum_{i=1}^n \nabla r_i(x) \nabla r_i(x) + \sum_{i=1}^n r_i(x) \nabla^2 r_i(x) \quad (45)$$

Em problemas com ajuste de parâmetros, a função $r_i(x)$ aproxima-se de zero, dessa forma, é possível desprezar as parcelas em que a função $r_i(x)$ aparece. Com a característica desse tipo de problema é possível obter derivadas de segunda ordem com as informações de derivadas de primeira ordem, como na equação (46).

$$\nabla^2 f(x) = \sum_{i=1}^n \nabla r_i(x) \nabla r_i(x) = [J(x)]^T J(x) = H(x) \quad (46)$$

Usando Taylor em $f(\bar{x})$, substituimos (43), (44) e (46) em (42), temos:

$$f(x) = \frac{1}{2} R(\bar{x})^T R(\bar{x}) + (x - \bar{x})^T [J(\bar{x})]^T R(\bar{x}) + \frac{1}{2} (x - \bar{x})^T [J(\bar{x})]^T J(\bar{x}) (x - \bar{x}) \quad (47)$$

Pela condição ótima, calculando o Gradiente e utilizando x^* , como o vetor minimizador da função, obtém-se:

$$\begin{aligned} \nabla f(x^*) &= [J(\bar{x})]^T R(\bar{x}) + (x^* - \bar{x})^T [J(\bar{x})]^T J(\bar{x}) \\ [J(\bar{x})]^T R(\bar{x}) + (x^* - \bar{x})^T [J(\bar{x})]^T J(\bar{x}) &= 0 \\ (x^* - \bar{x})^T [J(\bar{x})]^T J(\bar{x}) &= -[J(\bar{x})]^T R(\bar{x}) \end{aligned} \quad (48)$$

Substituindo a equação (46) em (48):

$$\begin{aligned} (x^* - \bar{x})^T H(\bar{x}) &= -[J(\bar{x})]^T R(\bar{x}) \\ x^* &= \bar{x} - H(\bar{x})^{-1} [J(\bar{x})]^T R(\bar{x}) \end{aligned} \quad (49)$$

Desta forma, podemos dizer que a próxima iteração pode ser definida por:

$$x_{k+1} = x_k - H(x_k)^{-1} [J(x_k)]^T R(x_k) \quad (50)$$

O acréscimo no iterando é igual ao valor de d_k , que utiliza somente as primeiras derivadas da função, o Jacobiano, inclusive para o cálculo da Hessiana, $H(x_k) = [J(x_k)]^T J(x_k)$, assim:

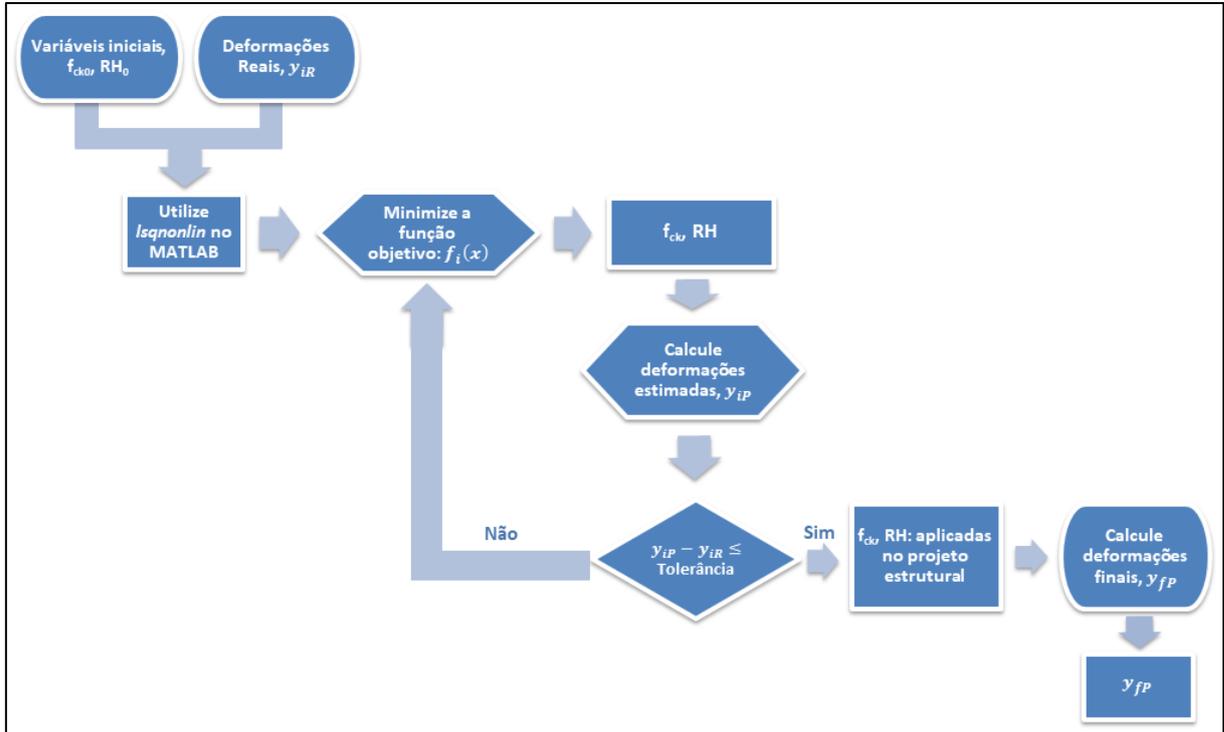
$$d_k = -H(x_k)^{-1} [J(x_k)]^T R(x_k) \quad (51)$$

4.1.2 Otimização utilizando o toolbox do MATLAB

Da mesma forma que Santos (2014), o processo de otimização foi desenvolvido através da função `lsqnonlin` do toolbox de otimização disponível no ambiente do MATLAB (2019) (CHAPMAN, 2003; ARORA, 2004). As novas variáveis de projeto são obtidas através da minimização das diferenças entre os deslocamentos estimados da estrutura, utilizando o simulador desenvolvido para o problema, e as deformações ocorridas. Com esse processo iterativo, um novo f_{ck} e uma nova RH são caracterizados e aplicados ao projeto estrutural,

estimando a nova curva de deformações de projeto que se adeque ao comportamento real. O processo pode ser visto no fluxograma abaixo (Figura 32).

Figura 32 – Fluxograma para cálculo das deformações.



Fonte: A autora, 2020.

4.1.2.1 Função lsqnonlin no MATLAB

No toolbox de otimização do MATLAB (2019) existe uma ferramenta adequada a este problema, é a função lsqnonlin. Esse código consiste em uma implementação do método dos Mínimos Quadrados Não Linear, utilizando ajuste de dados, exatamente como o problema proposto (CHAPMAN, 2003; ARORA, 2004; HIGHAM e HIGHAM, 2005). O código resolve problemas em que a função a ser minimizada pode ser escrita da seguinte forma:

$$\min_x \sum_i f_i^2(x) = \min_x \|F(x)\|^2 \quad (52)$$

A soma dos quadrados não deve ser formada explicitamente, pois o comando lsqnonlin requer a função definida pelo usuário para calcular a função vetorial, $f_i(x)$, retornando um vetor de valores da função.

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} \quad (53)$$

A sintaxe utilizada na função é:

$$[x, \text{resnorm}, \text{residual}, \text{exitflag}, \text{output}] = \text{lsqnonlin}(\text{fun}, x_0, \text{lb}, \text{ub}, \text{options});$$

Onde: x é a variável de projeto (f_{ck} e RH);

resnorm é o resíduo da função otimizada, nesse caso o somatório do valor da função ao quadrado;

residual é o resíduo de cada parcela da função, ou seja, o resíduo vetorial;

exitflag, descreve o valor da condição de saída da solução;

output é uma estrutura de saída com informações sobre a otimização, nesse caso, o número de iterações necessárias;

fun é uma função objetivo a ser otimizada;

x_0 é a variável inicial de projeto;

lb, ub é o conjunto de limites inferior e superior da variável de projeto em x , em que a solução é sempre na faixa $lb \leq x \leq ub$;

options são as especificações de opções para a minimização.

A função objetivo utilizada corresponde ao erro ocorrido entre as deformações estimadas e reais da estrutura em cada ponto a cada etapa executada, conforme já mostrado na equação (40).

$$f_i(x) = \frac{y_{iP}(x) - y_{iR}}{y_{iR}} = \frac{y_{iP}(x)}{y_{iR}} - 1$$

Os dados de entrada fornecidos para a aplicação da função objetivo são as variáveis de projeto e os deslocamentos medidos em obra. O uso da função para o cálculo das deformações estimadas é realizado com o simulador estrutural desenvolvido.

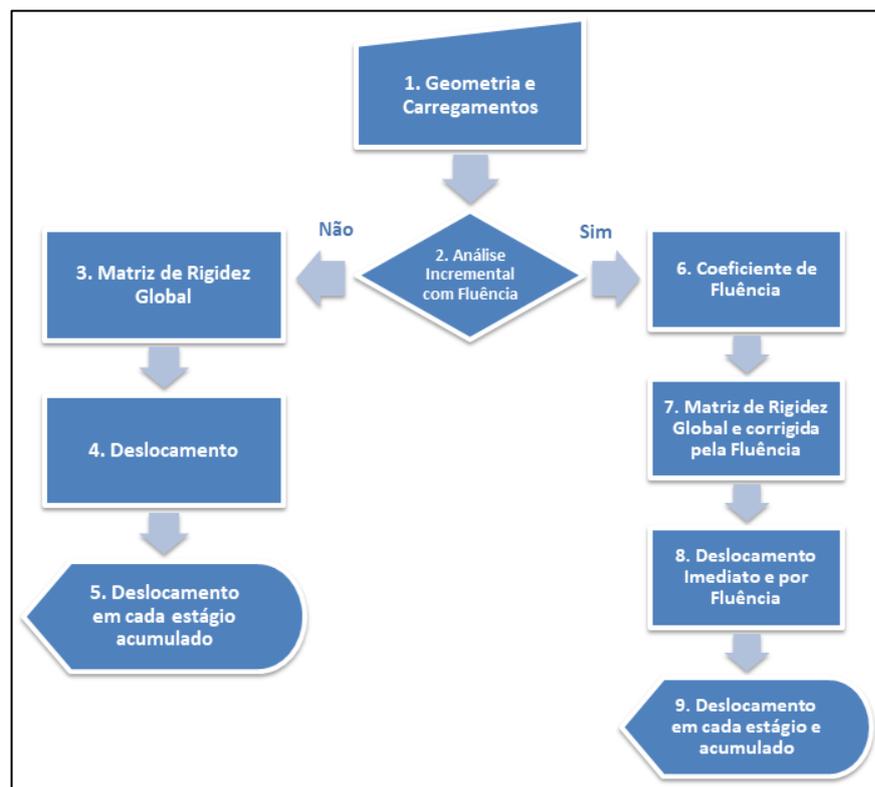
4.2 CÁLCULO DAS CONTRA FLECHAS COM ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES

Para o cálculo das contra flechas e suas correções é necessário desenvolver um modelo do projeto para o cálculo das deformações, por isso o simulador estrutural utilizado permite a integração com as próximas etapas.

4.2.1 Programa de Análise Estrutural

O código da ferramenta desenvolvida foi criado com o auxílio do programa MATLAB (2019) (HIGHAM e HIGHAM, 2005) e calcula os deslocamentos ocorridos através do Método dos Elementos Finitos. Uma versão inicial do programa realiza análises em vigas engastadas ou biengastadas, pois são aplicáveis em problemas de engenharia executados por Balanços Sucessivos. Como a execução desse tipo de obra é realizada em etapas, a Análise Incremental Construtiva está implementada no código, assim como, o efeito do tempo devido ao fenômeno de Fluência. E uma versão final do programa realiza a análise para vigas contínuas.

Figura 33 – Fluxograma do programa desenvolvido.



Fonte: A autora, 2020.

O fluxograma da Figura 33 mostra o funcionamento das etapas de cálculo. A validação de cada etapa do Programa foi realizada com o auxílio de ferramentas acessórias, através de modelos comparativos nos programas SAP2000 (2009) e implementadas no Mathcad. Abaixo tem-se uma descrição das etapas ilustradas na Figura 33.

1. Geometria e Carregamentos: é solicitada a entrada dos dados que definem a geometria e os carregamentos da estrutura, assim como as etapas construtivas que serão realizadas.

2. Análise Incremental com Fluência: o Programa possibilita dois tipos de processamento, através somente da Análise Incremental ou desta com o efeito da Fluência.

No caso da opção para Análise Incremental sem fluência:

3. Matriz de Rigidez Global: a cada estágio a estrutura modifica sua geometria, assim em cada estágio de construção é definida uma matriz de rigidez global para o estágio.

4. Deslocamento: com as matrizes de rigidez, é possível calcular os deslocamentos que ocorrem a cada estágio devido às modificações da geometria e carregamentos aplicados em cada estágio.

5. Deslocamento em cada estágio e acumulado: Os resultados encontrados na etapa anterior são apresentados. Além disso, considerando a superposição dos efeitos, é possível obter o deslocamento acumulado em cada estágio com a soma acumulada dos deslocamentos ocorridos anteriormente.

Caso a opção seja a realização com Análise Incremental considerando o fenômeno de Fluência:

6. Coeficiente de Fluência: com a consideração do fenômeno de fluência, é necessário calcular os coeficientes de cada elemento de barra devido à aplicação de cada carga para cada estágio.

7. Matriz de Rigidez Global e corrigida pela Fluência: assim como ocorre na análise por carregamentos imediatos, a cada estágio a estrutura também modifica sua geometria, sendo definida uma matriz de rigidez global para o estágio. Entretanto, com a mudança do espaço temporal, a fluência solicita da estrutura uma mudança na sua rigidez que deverá ser corrigida através dos coeficientes de fluência calculados na etapa anterior. Desta forma, em cada estágio são definidas matrizes de rigidez para o carregamento imediato e para cada carga aplicada no estágio devido à ação da fluência.

8. Deslocamento Imediato e por Fluência: da mesma forma que a Análise Incremental simples, após obtida as matrizes de rigidez, é possível calcular os deslocamentos que ocorrem a cada estágio devido as modificações da geometria e carregamentos aplicados. Além dos deslocamentos que ocorrem sob a atuação da fluência.

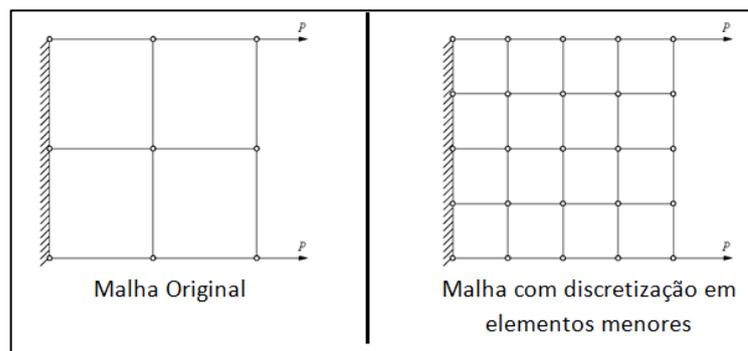
9. Deslocamento em cada estágio acumulado: Os resultados encontrados na etapa anterior também são apresentados. No fenômeno da fluência pode considerar a superposição dos efeitos, e é possível obter o deslocamento acumulado em cada estágio com a soma acumulada dos deslocamentos ocorridos anteriormente submetidos à fluência.

4.2.2 Método dos Elementos Finitos

O programa de análise estrutural aqui desenvolvido utiliza o Método dos Elementos Finitos (MEF), pois é um método numérico aproximado aplicado em problemas de engenharia quando não é possível obter soluções satisfatórias por métodos analíticos.

A solução consiste em dividir a peça estrutural em diversos elementos de dimensões menores com as mesmas propriedades do original. A estrutura original é o domínio de integração do problema que é discretizado nos elementos menores de dimensões finitas, caracterizando os chamados elementos finitos que é a formação de uma malha de elementos menores (Figura 34). Cada elemento finito mantém a uniformidade do conjunto através dos nós que os ligam aos elementos adjacentes (LOGAN, 2017).

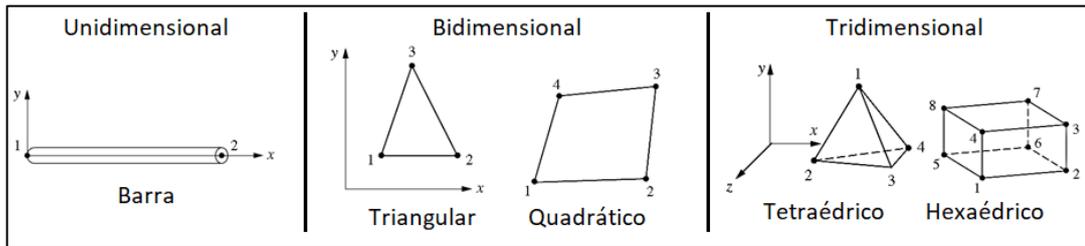
Figura 34 – Discretização de uma malha.



Fonte: Logan apud Autor, 2020.

Esses elementos podem assumir as mais diversas formas para permitir uma melhor aproximação do problema. Podem ser unidimensionais de eixo reto ou curvo; bidimensional sendo triangulares, retangulares ou circulares; e ainda, tridimensionais como os tetraedros e os hexaedros (Figura 35).

Figura 35 – Tipos de elementos finitos: unidimensional, bidimensional e tridimensional.



Fonte: Logan apud Autor, 2020.

Cada nó é solucionado através das equações de equilíbrio atendendo aos graus de liberdade do nó com compatibilização dos deslocamentos nodais. A convergência dos resultados depende da formulação dos elementos, assim como, da escolha da malha e do tipo de elemento utilizado na discretização. Malhas bastante refinadas possuem muitos elementos de pequenas dimensões e os resultados obtidos são mais precisos, devido à proximidade dos nós.

4.2.2.1 Abordagem pelo Método da Rigidez Direta

A rigidez direta aplica as condições de equilíbrio (forças e momentos) ao Método dos Elementos Finitos, e a discretização dos elementos tem como incógnitas principais do problema os deslocamentos de translação e rotação nodais.

Segundo Martha (2010), a ideia básica é determinar deformações dentro de um conjunto de soluções que satisfazem as condições de compatibilidade e que também satisfaz as condições de equilíbrio. A equação de compatibilidade é obtida com a expressão da deformação linear na equação (54):

$$\{F\} = [K]\{\varepsilon\} \quad (54)$$

Onde: $\{F\}$ é a força aplicada.

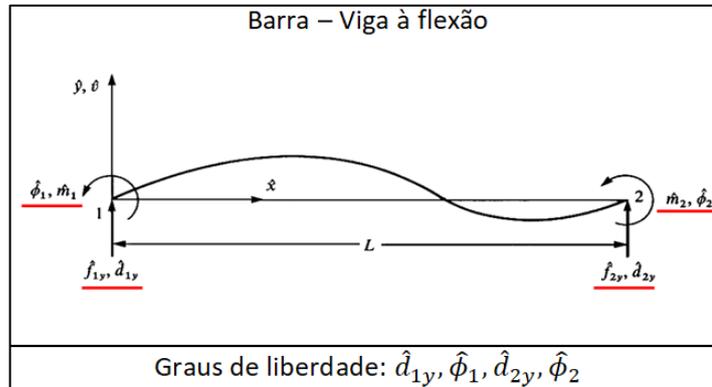
$[K]$ é a matriz de rigidez da barra.

$\{\varepsilon\}$ é o deslocamento vertical.

Através dos valores de momento de engastamento perfeito é possível compor a matriz de rigidez conforme apresentado na equação (54) para uma barra a flexão com graus de liberdade contidos num plano mostrado na Figura 36.

$$K_{\text{elemento}} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad (55)$$

Figura 36 – Graus de liberdade de viga à flexão.



Fonte: Timoshenko apud Autor, 2020.

4.2.2.2 Superposição dos Efeitos e Matriz de Rigidez Global

Ainda segundo Martha (2010), a superposição dos efeitos de deslocamentos provocados por vários sistemas de forças que atuando isoladamente corresponde ao mesmo deslocamento provocado pelos sistemas de forças atuando em conjunto.

Como cada elemento de barra irá compor a estrutura completa, cada estágio possui uma matriz global composta pelas barras existentes nos estágios e a soma dos nós globais coincidentes das barras, em destaque na equação (56) para o caso de duas barras.

$$K = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & 0 \\ \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & 0 \\ -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad (56)$$

Porém, para utilizar esse princípio é necessário que a estrutura tenha um comportamento linear baseado em duas condições: o material trabalhe no regime elástico-linear e a hipótese de pequenos deslocamentos seja válida, consideração realizada para as análises em Balanços Sucessivos.

4.2.3 Análise Incremental Construtiva no Programa

Para este tipo de análise, é considerada que a estrutura executada em Balanços Sucessivos é uma sucessão de diferentes estruturas analisadas em sequência. Assim, no Programa, cada estágio construtivo é uma estrutura e a deformação total corresponderá ao somatório de todas as deformações a cada estágio, conforme já mostrado na equação (19).

$$Y_j = \sum_{k=1}^n y_{kj}$$

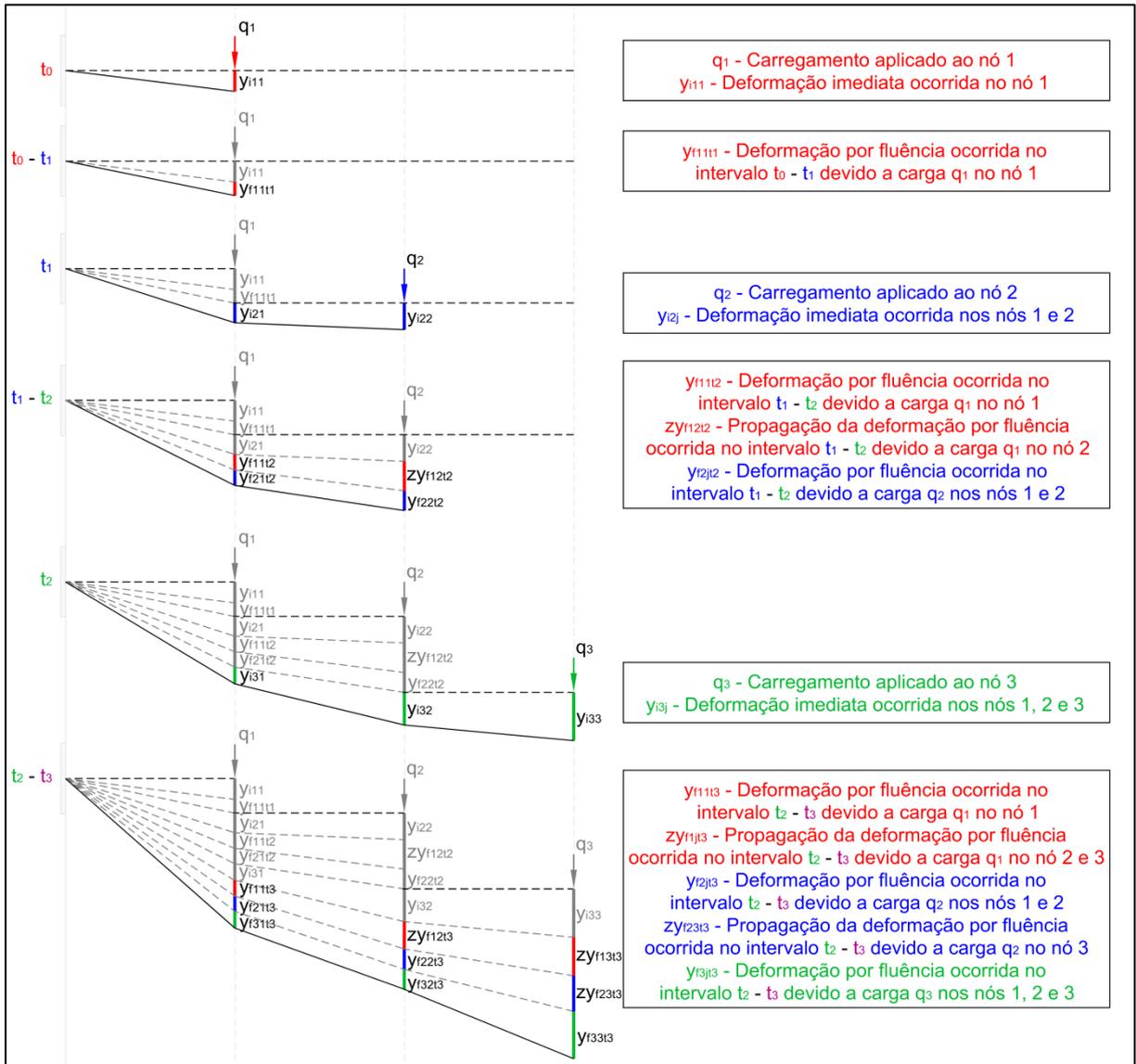
Esta análise independe do efeito de fluência, pois quando este fenômeno é incorporado à estrutura, uma análise linear também é realizada permitindo a superposição dos efeitos.

4.2.4 Fluência no Programa

O princípio da superposição utilizado para calcular a matriz de rigidez de cada estágio é válido para as deformações imediatas e também para as deformações por fluência. Por isso, é preciso compreender o comportamento da fluência em cada estágio e a sua superposição em cada etapa. A verificação de cada etapa de aplicação das cargas e deformações é mostrada no exemplo genérico da Figura 37.

Em cada estágio será considerado um carregamento aplicado e uma deformação imediata ocorre. Esse carregamento também repercute em uma deformação por fluência ao longo da vida da estrutura. É possível ver que o carregamento q_1 produz uma deformação por fluência nos estágios seguintes, entretanto ela só atua diretamente no nó 1, pois este era o único nó executado no momento de aplicação da carga. Para os nós posteriores essa deformação por fluência devido ao carregamento é a propagação da deformação ocorrida no nó 1. Isto é válido para todos os nós e a deformação total acumulada em um nó, y_{tj} , pode ser expressa conforme a equação (57):

Figura 37 – Deformações por estágio com fluência.



Fonte: A autora, 2020.

$$y_{t_j} = \sum_{i=j}^n y_{i_{ij}} + \sum_{i=j}^n \sum_{k=1}^{j-1} zy_{f_{kj}t_i} + \sum_{i=j}^n y_{f_{ij}t_i} \quad (57)$$

Onde: j é o nó de interesse e o estágio em que o respectivo nó foi executado.

$y_{i_{ij}}$ é a deformação imediata no nó j no estágio i .

$zy_{f_{kj}t_i}$ é a projeção das deformações por fluência no nó j devido a fluência dos carregamentos dos nós anteriores.

$y_{f_{ij}t_i}$ é a deformação por fluência no nó j devido a fluência dos carregamentos do próprio nó e dos nós posteriores.

Como cada barra é executada em um estágio diferente, serão definidos para cada barra um coeficiente de fluência diferente para cada carregamento que foi aplicado. E desta maneira, as

correções no módulo de elasticidade das barras são realizadas em cada estágio devido a cada carregamento, conforme já mostrado na equação (8).

$$\bar{E}_c(t, t_0) = \frac{E_c(t_0)}{1 + \phi(t, t_0)}$$

A deformação por fluência ocorrida durante um intervalo de tempo é proporcional à deformação imediata ocorrida sendo aplicados os coeficientes desse espaço temporal, conforme apresentado por Ghali et al (2014a):

$$\{\Delta\varepsilon\} = \{\varepsilon(t_0)\}[\phi(t_2, t_0) - \phi(t_1, t_0)] \quad (58)$$

Onde: $\Delta\varepsilon$ é o acréscimo de deformação que ocorre no intervalo de tempo t_1 até t_2 que é proporcional a deformação $\varepsilon(t_0)$ devido ao carregamento estático aplicado
 $\phi(t_i, t_j)$ são os coeficientes de fluência para a idade t_i com carregamento aplicado na idade t_j .

Como o módulo de elasticidade é corrigido, isso repercute diretamente na matriz de rigidez para o devido intervalo de tempo como apresentado na equação (59).

$$[\bar{K}] = [K] \frac{1}{1 + \phi(t_2, t_1)} \quad (59)$$

A equação de compatibilidade, equação (54), pode ser aplicada para este acréscimo de força devido à tensão de fluência e apresentado abaixo:

$$\{\Delta F\} = [\bar{K}]\{\Delta\varepsilon\} \quad (60)$$

Com isso, aplicando as equações (58) e (59) na equação (60) podemos reescrever o acréscimo de força ΔF ocorrido no intervalo de tempo entre t_1 e t_2 , da seguinte maneira:

$$\{\Delta F\} = \frac{[\phi(t_2, t_0) - \phi(t_1, t_0)]}{1 + \phi(t_2, t_1)} \{F\} \quad (61)$$

Assim a fluência é representada de forma equivalente por uma modificação do vetor de forças.

4.3 FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA DE ANÁLISE ESTRUTURAL

O programa desenvolvido apresenta uma série de etapas para a execução.

4.3.1 Entrada e Saída de Dados

De acordo com a fundamentação teórica, o Programa desenvolvido utilizando a plataforma MATLAB (2019) obedece ao fluxograma da Figura 33. Os dados de entrada são informados com o preenchimento de um arquivo em formato .xlsx como apresentado na Figura 38. Os dados requeridos são: Geometria, Propriedades do Concreto, Condição de Contorno, Carregamentos, Etapas Construtivas.

Figura 38 – Entrada de dados em formato .xlsx para o programa.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with the following data tables:

Dados dos Segmentos da Estrutura											
Segmento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Comprimento	3	3	3								
Area	0.24	0.24	0.24								
Perimetro	2.2	2.2	2.2								
Iy	0.0128	0.0128	0.0128								
fck	35	35	35								
RH	80	80	80								
Densidade	2.5	2.5	2.5								
Idade	28	28	28								

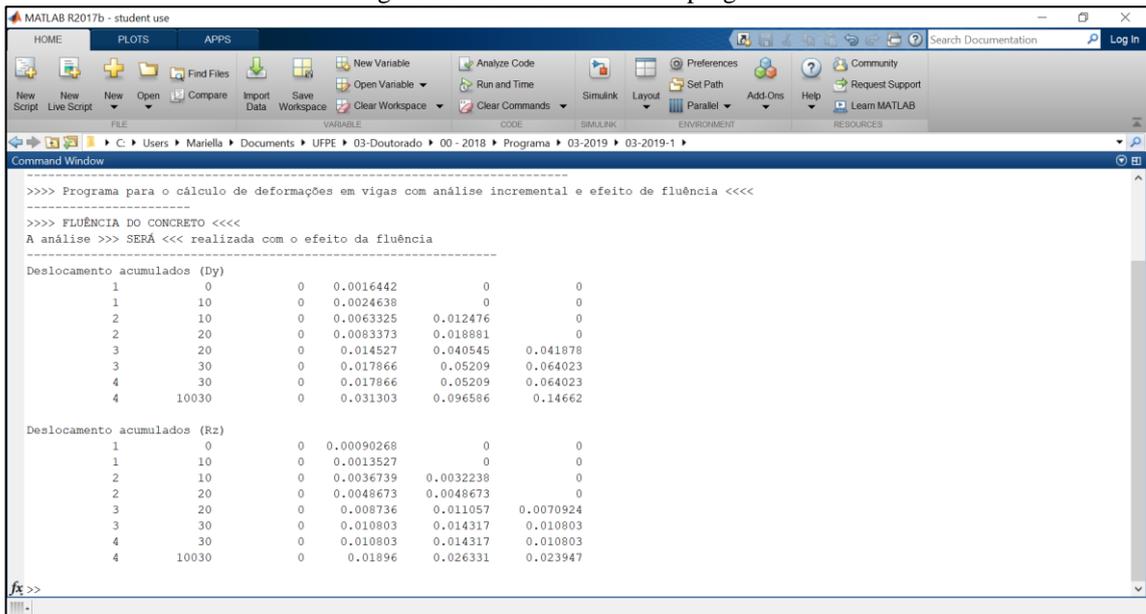
Carregamentos Nodais										
Nome do Carregamento	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Nó	2	3	4							
Fy	-1.35	-1.35	-1.35							
Mz	-2.025	-2.025	-2.025							

Estágios de Construção									
Estágio	Duração	1	2	3	4	5	6	7	8
1	10 s	n	n						
2	10 s	s	n						
3	10 s	s	s						
4	10000 s	s	s	s					
5									
6									
7									
8									
9	7								

Fonte: A autora, 2020.

Os resultados apresentados são os deslocamentos e rotações acumulados em cada estágio, para a Análise Incremental com Fluência, conforme mostrado na Figura 39.

Figura 39 – Saída de dados no programa.

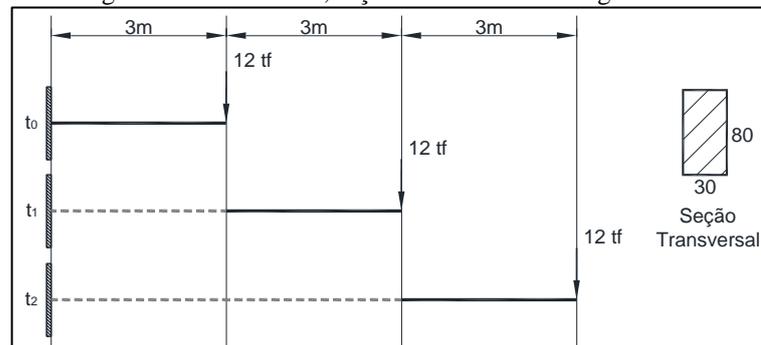


Fonte: A autora, 2020.

4.3.2 Demonstração Básica do Programa – Exemplo Genérico

Para demonstrar o funcionamento do programa, um exemplo desenvolvido por Santos e Ribeiro (2015) é apresentado abaixo. O modelo possui as características de viga engastada, com geometria, seção transversal e carregamentos de acordo com a Figura 40. As propriedades do material e as informações para execução dos estágios são apresentadas na Tabela 1.

Figura 40 – Geometria, seção transversal e carregamentos.



Fonte: Santos e Ribeiro, 2015.

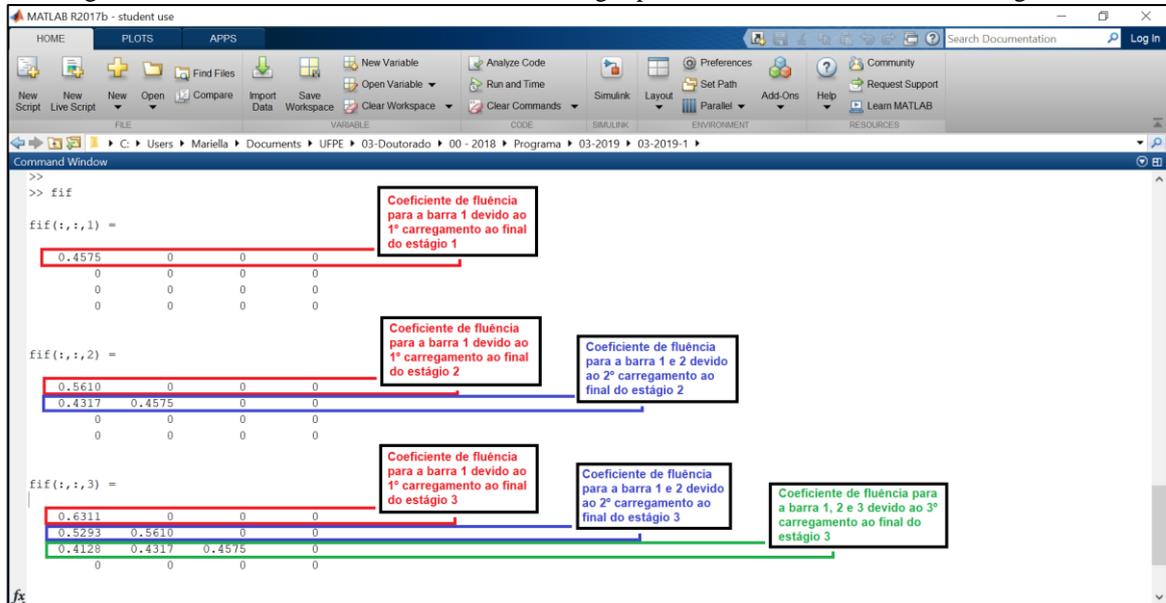
Tabela 01 – Propriedades do material e informações do estágio de construção

Propriedades do Material	Resistência Característica	Umidade Relativa
	$f_{ck}=35\text{MPa}$	RH=80%
Estágio de Construção	Idade dos Segmentos	Duração dos Estágios
	28 dias	10 dias

Fonte: Santos e Ribeiro, 2015.

As informações do projeto são fornecidas com a leitura do arquivo de dados de extensão .xlsx, podendo assim realizar a solução do problema. O cálculo do coeficiente de fluência é realizado para cada carregamento a cada estágio, podendo ser visto na Figura 41.

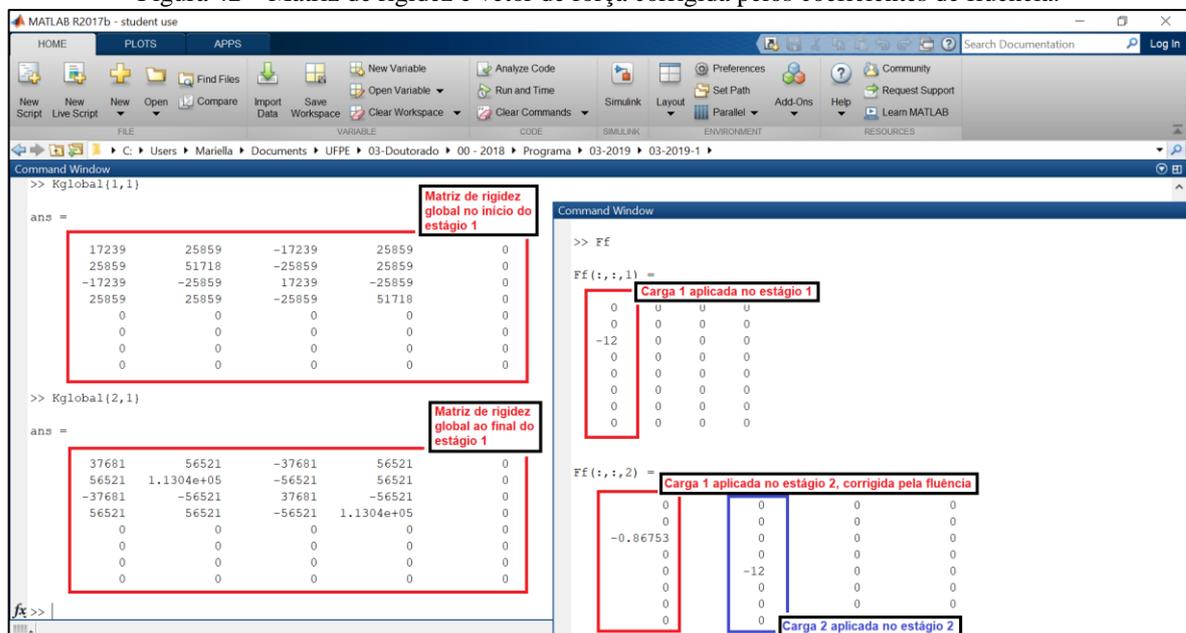
Figura 41 – Coeficientes de fluência em cada estágio para cada barra devido a cada carregamento.



Fonte: A autora, 2020.

A correção da matriz de rigidez em cada estágio e para cada carregamento é realizado utilizando os coeficientes de fluência conforme as equações (59) e (61). Assim como, a modificação do vetor de forças (Figura 42).

Figura 42 – Matriz de rigidez e vetor de força corrigida pelos coeficientes de fluência.

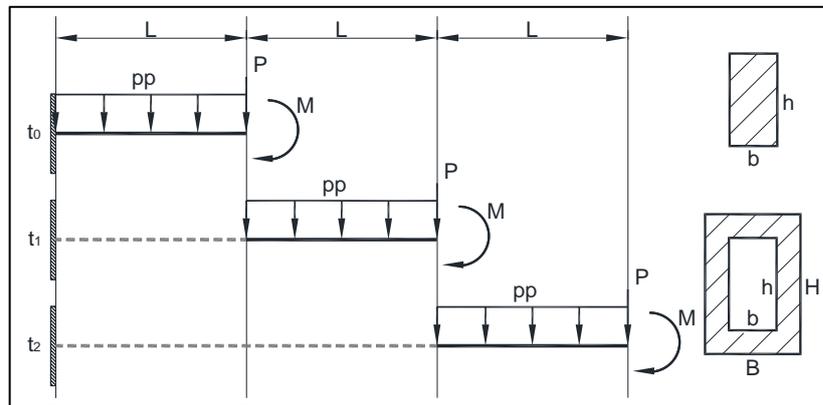


Fonte: A autora, 2020.

4.4 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

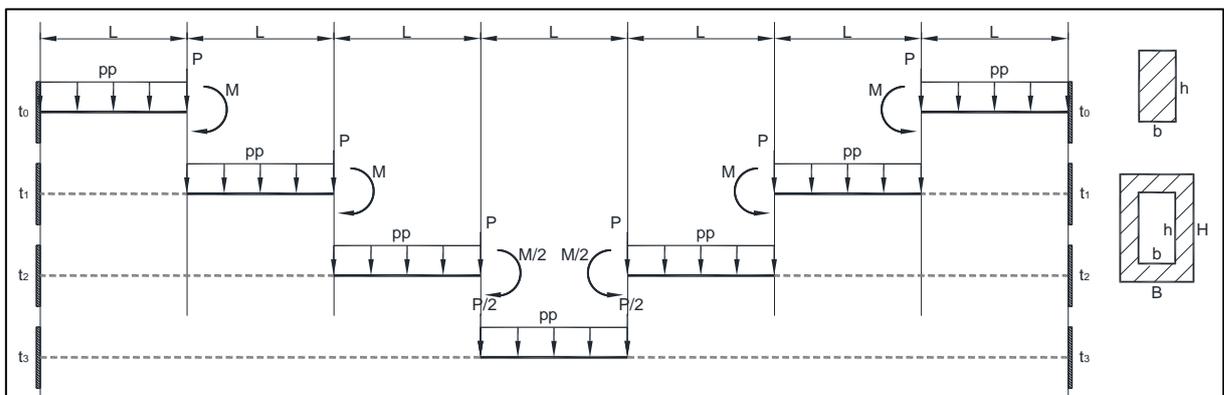
Para verificar a qualidade dos resultados fornecidos pelo programa, foram realizadas 10 análises para os modelos apresentados nas Figuras 43, 44 e 45 e comparados com modelos no SAP2000 (2009), que apresentou bons resultados, com erros da ordem de 3%, como podem ser vistos no ANEXO A (SANTOS et al, 2019). A idade dos elementos da estrutura é de 28 dias e a duração dos estágios de 10 dias, sendo o último estágio com duração de 10000 dias, para representar os efeitos da fluência em uma idade superior a 25 anos. As características de cada uma das análises estão apresentadas na Tabela 02, assim como o resultado do maior deslocamento vertical ao final do último estágio.

Figura 43 – Modelo genérico de viga engastada para validação da fundamentação teórica.



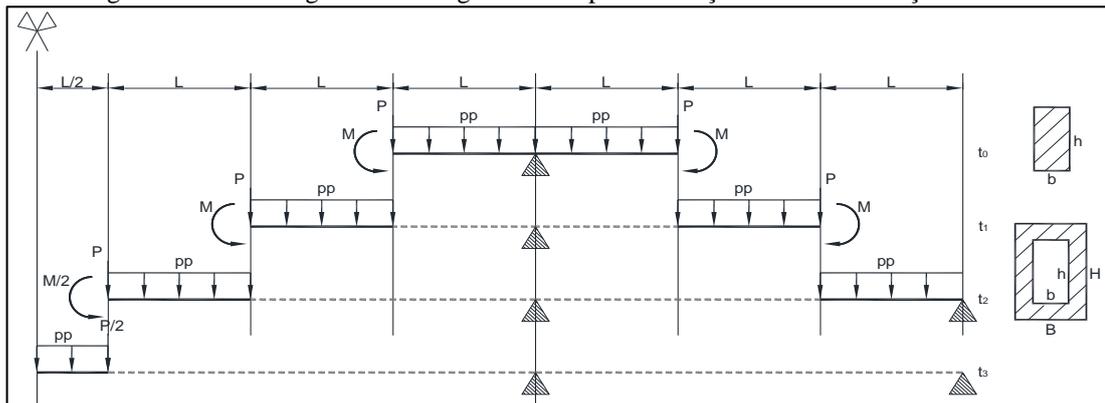
Fonte: Santos et al, 2019.

Figura 44 – Modelo genérico de viga biengastada para validação da fundamentação teórica.



Fonte: Santos et al, 2019.

Figura 45 – Modelo genérico de viga contínua para validação da fundamentação teórica.



Fonte: Santos et al, 2019.

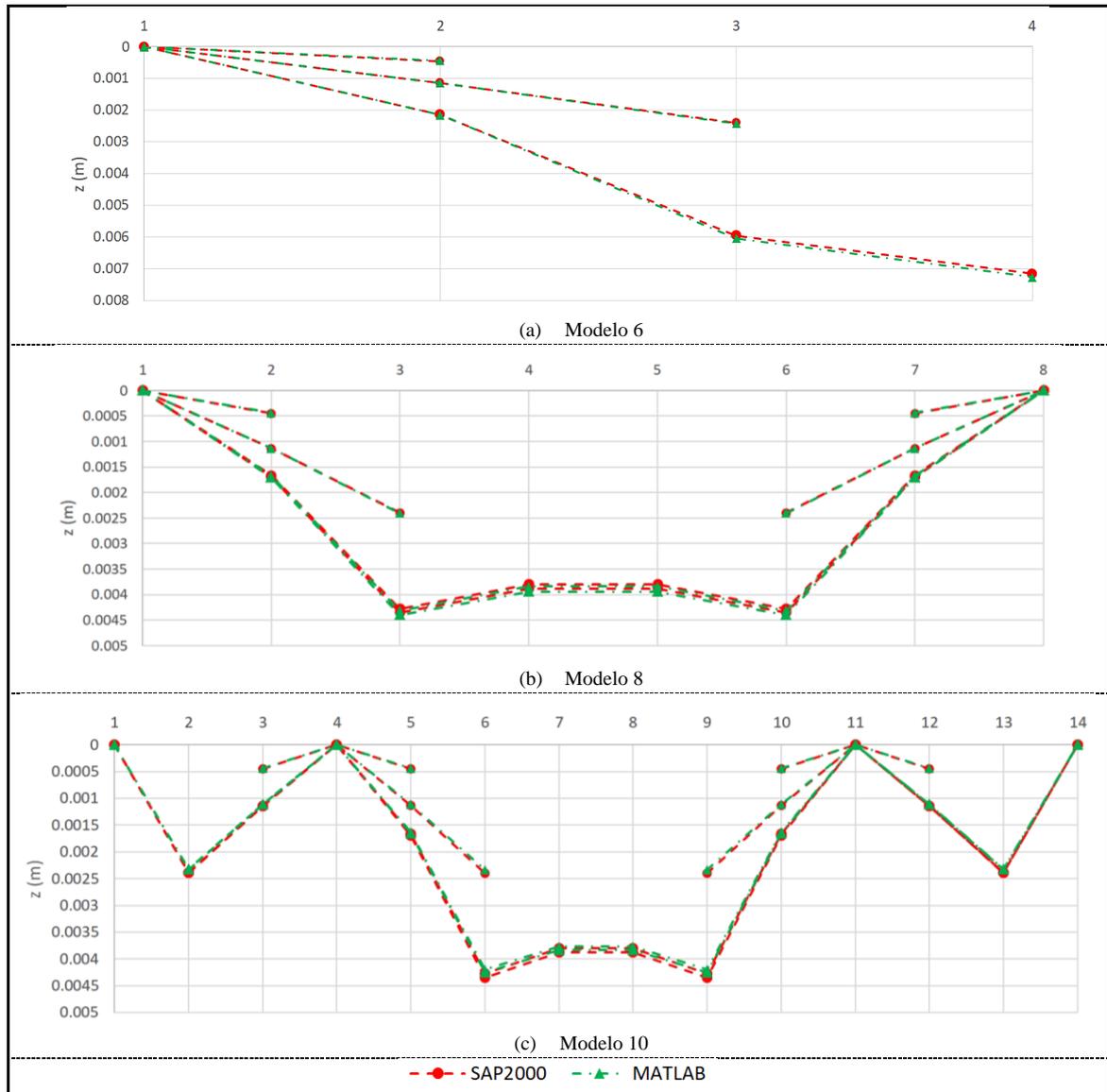
Tabela 2 – Modelos aplicados para validação da fundamentação teórica e principal resultado

Modelo	Geometria	Carregamentos	Propriedades do Material	Modelo Estrutural	Último Estágio: Nó de maior deslocamento (m)		
					SAP2000	MATLAB	Erro (%)
1	L=3m b=30cm h=60cm	pp=0.45tf/m P=1.35tf M=2.025tfm	fck=30Mpa u=0.20m RH=80%	Figura 42 (Engastada)	0,144447	0,146620	1,50
2	L=3m b=30cm h=60cm	pp=0.45tf/m P=1.35tf M=2.025tfm	fck=30Mpa u=0.20m RH=80%	Figura 42 (Engastada)	0,031448	0,031748	0,95
3	L=5m b=30cm h=60cm	pp=0.45tf/m P=2.25tf M=5.625tfm	fck=30Mpa u=0.20m RH=80%	Figura 42 (Engastada)	1,114561	1,131300	1,50
4	L=5m b=30cm h=60cm	pp=0.45tf/m P=2.25tf M=5.625tfm	fck=30Mpa u=0.20m RH=80%	Figura 42 (Engastada)	0,242651	0,244970	0,96
5	L=5m B=800 – b=600cm H=300 – h=200cm	pp=30tf/m P=150tf M=375tfm	fck=30Mpa u=1.09m RH=80%	Figura 42 (Engastada)	0,026486	0,026933	1,69
6	L=5m B=800 – b=600cm H=300 – h=200cm	pp=30tf/m P=150tf M=375tfm	fck=30Mpa u=1.09m RH=80%	Figura 42 (Engastada)	0,005848	0,005916	1,16
7	L=5m b=30cm h=60cm	pp=0.45tf/m P=2.25tf M=5.625tfm	fck=30Mpa u=0.20m RH=80%	Figura 43 (Biengastada)	0,280955	0,289480	3,03
8	L=5m B=800 – b=600cm H=300 – h=200cm	pp=30tf/m P=150tf M=375tfm	fck=30Mpa u=1.09m RH=80%	Figura 43 (Biengastada)	0,006603	0,006818	3,26
9	L=5m b=30cm h=60cm	pp=0.45tf/m P=2.25tf M=5.625tfm	fck=30Mpa u=0.20m RH=80%	Figura 44 (Contínua)	0,280955	0,25338	9,81
10	L=5m B=800 – b=600cm H=300 – h=200cm	pp=30tf/m P=150tf M=375tfm	fck=30Mpa u=1.09m RH=80%	Figura 44 (Contínua)	0,006603	0,005943	10,00

As cargas em azul são removidas no estágio seguinte ao estágio de entrada, pois são os peso próprio do concreto fresco.

A diferença entre os resultados não ultrapassam 5%, exceto quando a viga é contínua em que esse valor é inferior a 10%. Considerando a precisão do valor do deslocamento, o erro é considerado bom, pois a curva de deslocamentos é muito próxima. As curvas de deslocamentos evolutivos dos estágios nos modelos 6, 8 e 10 podem ser vistas na Figura 46, as demais curvas encontram-se no ANEXO A.

Figura 46 – Deformações comparativas com o programa desenvolvido para os modelos 6 (a), 8 (b) e 10 (c).



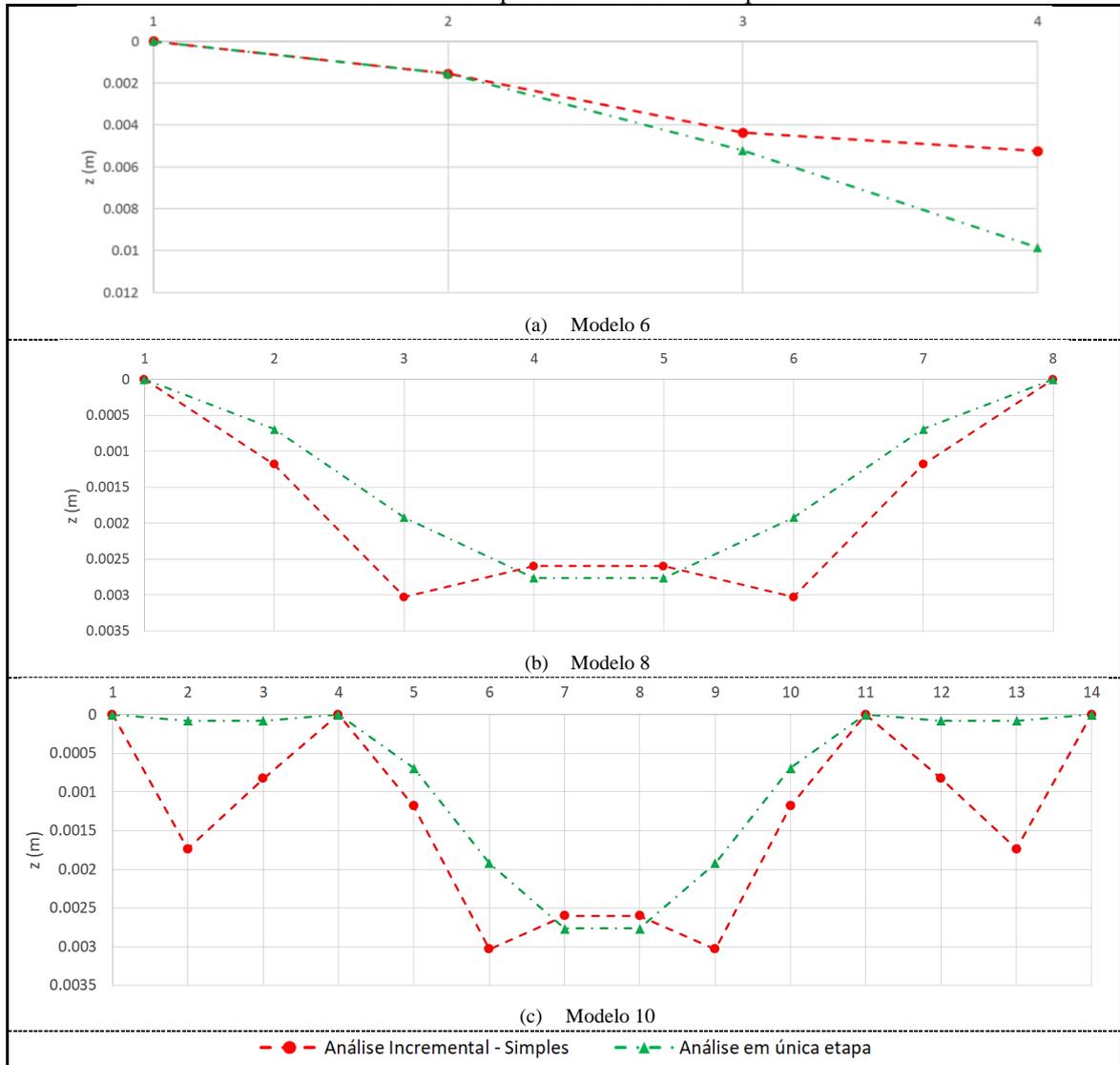
Fonte: Santos et al, 2019.

Com esses resultados, a comparação para a execução em única etapa e com Análise Incremental foi realizada para os modelos 6, 8 e 10, assim como, para a Análise Incremental sem e com Fluência.

4.4.1 Análise em uma única etapa e Análise Incremental

As curvas de deformação para os modelos 6, 8 e 10 obtidas considerando a execução em única etapa e a Análise Incremental simples, estão apresentadas na Figura 47 (a), (b) e (c).

Figura 47 – Curvas de deformações para os modelos 6(a), 8(b) e 10(c), análise incremental simples e em uma única etapa.



Fonte: A autora, 2020.

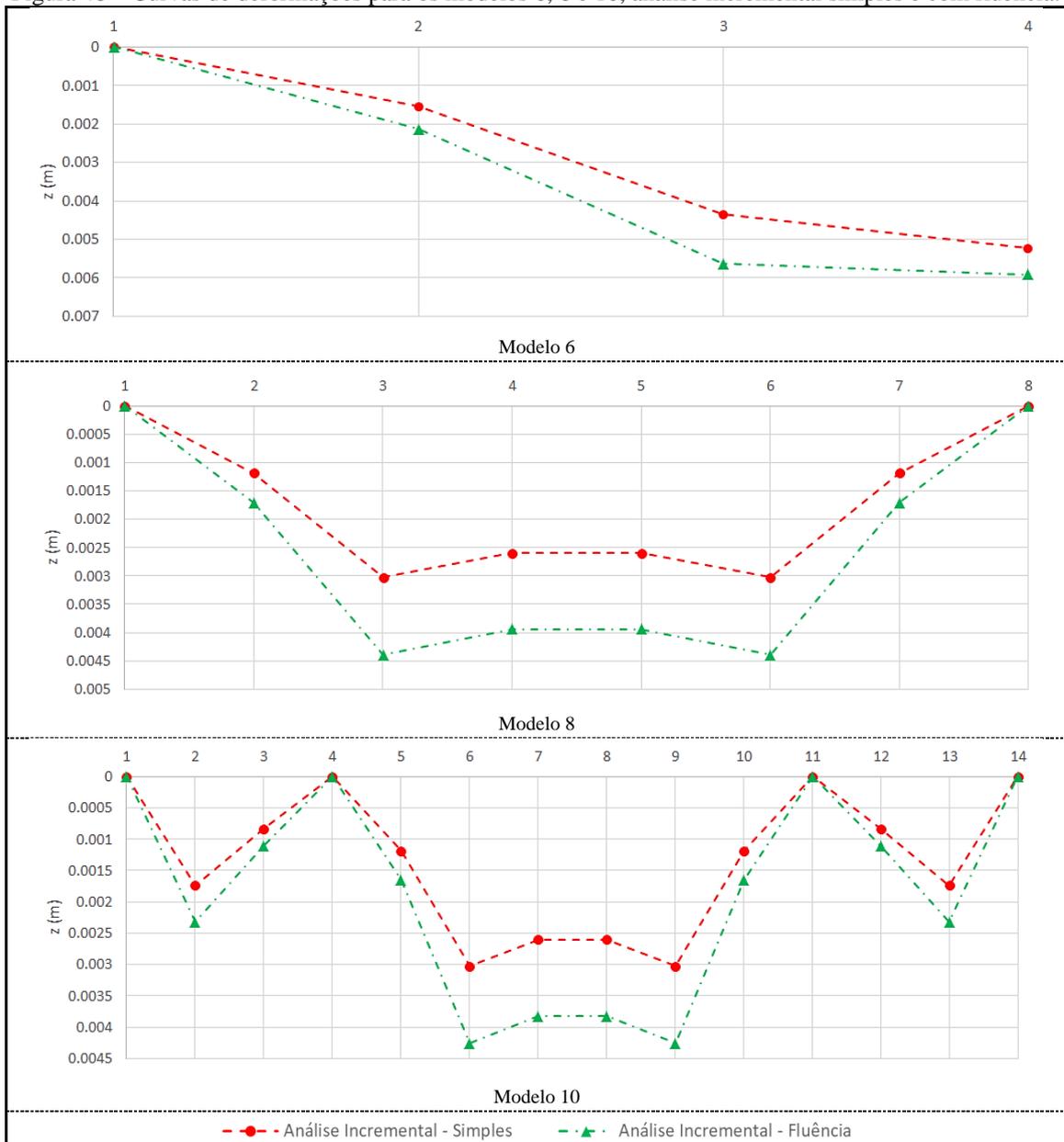
Quando comparada as análises da execução em uma única etapa com a construção em Análise Incremental, as deformações apresentam curvaturas distintas. A deformada no procedimento em uma única etapa pode ser 87% maior que a da Análise Incremental simples para uma viga engastada, como apresentado no modelo 6. Já no modelo 8, em uma viga biengastada, o vão máximo apresenta uma deformação da ordem 6% maior na única etapa, porém em outros pontos da viga a deformação em única etapa pode ser menor, sendo 58% do valor da deformada na Análise Incremental.

O modelo 10, de uma viga contínua, a diferença nas curvaturas pode variar bastante. Para a execução em única etapa a deformação pode ser 10% do valor encontrado na Análise Incremental. Enquanto no vão central, a análise em única etapa apresenta um resultado 6% maior comparado com a outra execução.

4.4.2 Análise Incremental sem e com Fluência

Os mesmos modelos são apresentados agora para execução considerando o efeito da Fluência, conforme apresentado na Figura 48: Análise Incremental simples e com Fluência. Os dados dos deslocamentos obtidos no modelo podem ser vistos no ANEXO B

Figura 48 – Curvas de deformações para os modelos 6, 8 e 10, análise incremental simples e com fluência.



Fonte: Santos et al, 2019.

Nas duas análises a metodologia construtiva foi considerada e observando curvas de deformação com características muito semelhantes. Entretanto, o valor dessas deformações aumenta quando a estrutura está submetida ao fenômeno de fluência. Nos modelos apresentados, a deformação com Análise Incremental simples implica em deformações da ordem de 40 a 50% das deformações com o fenômeno de fluência.

4.4.3 Resumo da validação do Programa

O código computacional desenvolvido representa uma etapa da análise de contra flecha para pontes em Balanços Sucessivos e permitindo o cálculo de deformação em vigas que passam por modificação no sistema estrutural e em seus carregamentos, realizando Análise Incremental com Fluência.

- Na validação foram obtidos bons resultados quando comparados a um programa comercial de elementos finitos (SAP2000, 2009). O código é de fácil aplicação, com uma entrada de dados simples e permite acelerar o processo de modelagem de estruturas para esse tipo de análise.
- Os resultados revelaram a importância da Análise Incremental e da Fluência, pois ao comparar os modelos com execuções em uma única etapa é verificada a diferença de deformações ocorridas com Análise Incremental, inclusive com curvaturas inversas em alguns modelos.
- Diferentes valores também são encontrados ao comparar a execução sem e com Fluência. Em alguns modelos, o valor da deformada pode ser 50% maior quando o fenômeno de Fluência é considerado. Por isso, o cálculo das contra flechas de projeto são menores em uma análise simples o que seria insuficiente devido a deformação real apresentar fluência.
- Assim, é demonstrada a importância: das etapas construtivas na análise e das deformações diferidas ao longo do tempo. Verifica-se também que uma análise com uma única etapa, ignorando fluência e efeitos construtivos, é insatisfatória e não representa adequadamente o problema.

5 PROCEDIMENTO DE CORREÇÃO DE CONTRA FLECHA COM INCERTEZA NAS VARIÁVEIS

O procedimento de correção passa a ser incorporado com o uso de incerteza nas variáveis de projeto.

5.1 CÁLCULO DE DEFORMAÇÕES APLICANDO INCERTEZA NAS VARIÁVEIS DE PROJETO COM DISTRIBUIÇÃO ESTATÍSTICA ATRAVÉS DE MONTE CARLO

O desenvolvimento de projetos de estruturas é baseado em análises de metodologias determinísticas, em que os fatores de segurança são utilizados para considerar a incerteza das variáveis do problema. O programa desenvolvido efetua o cálculo de deformações deterministicamente. Entretanto, uma análise estocástica das variáveis passa a ser proposta para que seja considerada de maneira mais adequada a aleatoriedade do problema (GHALI et al, 2014b).

A simulação de Monte Carlo é utilizada para obter um conjunto de amostras das variáveis. As repetidas simulações são obtidas de acordo com a distribuição de probabilidade e os parâmetros estatísticos das variáveis incertas do problema. A determinação desses parâmetros obedece às orientações do JCSS (2001), Neville (2015) e estudo com dados de campo. Após uma análise de convergência dos valores obtidos para as contra flechas foi definido que um tamanho de amostra, N=100 era satisfatório para os resultados, devido ao custo computacional que MC possui. Estes resultados estão apresentados nas Tabelas 03 e 04, para o problema do modelo 1, como apresentado na Tabela 02.

Tabela 3 – Tempo de processamento e contra flechas para o modelo 1 pelo processo determinístico

Determinístico	tempo (s)	nó 1	nó 2	nó 3	nó 4
	0,550	0,00	-0,006751	-0,006215	-0,000555

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 4 – Tempo de processamento e contra flechas para o modelo 1 em teste de convergência de MC

Monte Carlo					
N	tempo (s)	nó 1	nó 2	nó 3	nó 4
100	5,436	0,00	-0,006710	-0,006155	-0,000574
1000	31,355	0,00	-0,006619	-0,006068	-0,000532
10000	334,079	0,00	-0,006661	-0,006141	-0,000552
100000	3124,588	0,00	-0,006703	-0,006182	-0,000547

Fonte: A autora, 2020.

5.1.1 Geometria

Segundo o JCSS (2001), as variações nas dimensões das peças de concreto são descritas pela dimensão x menos o valor da dimensão nominal (média da variável), μ_x , conforme equação (62).

$$Y = x - \mu_x \quad (62)$$

Onde: Y é a variação da dimensão da peça de concreto.

x é a dimensão da peça de concreto.

μ_x é a dimensão nominal da peça de concreto (média da variável).

Assim, todas as demais propriedades geométricas que dependem da dimensão da peça são calculadas de acordo com a variação ocorrida na mesma. A dispersão nas dimensões é definida pela função de distribuição normal com desvio padrão obedecendo ao seguinte critério:

$$\sigma_x = 4mm + 0.006 \cdot \mu_x \leq 10mm \quad (63)$$

Onde: σ_x é o desvio padrão da variável x ;

Como mostra a equação (63), as peças com dimensão maior do que 1000 mm (1 metro), o desvio padrão será sempre de 10 mm. Com estes parâmetros estatísticos das dimensões, é possível calcular o coeficiente de variação das variáveis que dependem das medidas da peça.

O programa proposto solicita como dados de entrada as seguintes propriedades geométricas: comprimento, área, perímetro e inércia. Baseado nas recomendações do JCSS, os parâmetros utilizados nessas variáveis foram obtidos com um estudo por meio do método MC e estão apresentados na tabela abaixo:

Tabela 5 – Parâmetros da distribuição probabilística das variáveis geométricas

Variável	Distribuição	Coeficiente de Variação	
		Dimensão menor que 1m	Dimensão maior que 1m
Comprimento	Normal	à calcular	0,01
Área	Normal	0.0231	0,0890
Perímetro	Normal	0.0106	0,0013
Inércia	Normal	0.0426	0,0136

Fonte: A autora, 2020.

5.1.2 Material

As incertezas nas variáveis referentes as propriedades do concreto foram analisadas especificamente.

5.1.2.1 Resistência à Compressão do Concreto

A principal propriedade do concreto é a resistência à compressão, obtida através de ensaios padronizados com idade de 28 dias. Apesar das recomendações existentes no JCSS (2001), para o cálculo da resistência está sendo consideradas as equações do CEB-FIP (1993) associado com estudos fornecidos por alguns trabalhos (NBR 12655, 2015; NEVILLE, 2015; MELCHERS e BECK, 2018).

O projeto estrutural é baseado na consideração de uma determinada resistência mínima do concreto (resistência característica, f_{ck}), em que a resistência média, f_{cm} , é igual ao f_{ck} acrescido de um fator proporcional ao desvio padrão da resistência à compressão do concreto (NEVILLE, 2015). A distribuição de probabilidade utilizada é normal quando ocorre rigoroso controle na produção do material (DRYSDALE apud MELCHERS e BECK, 2018), adotando para a resistência característica conforme a equação abaixo:

$$f_{ck} = f_{cm} - k \cdot \sigma \quad (64)$$

Onde: k é o coeficiente devido às amostras menores do que o f_{ck} .
 σ é o desvio padrão da dosagem do concreto.

O coeficiente k é definido pelo número de amostras de corpo de prova que deram abaixo do valor mínimo. Com o objetivo de que apenas 5% das amostras não atinjam a resistência característica, é adotado $k = 1,65$ (NBR 12655, 2015; NEVILLE, 2015; MELCHERS e BECK, 2018).

O desvio padrão é função das condições de preparo do concreto, sendo possível adotar valores de acordo com as características do material. O CEB-FIP (1993) admite um fator de acréscimo de 8 MPa para o cálculo da resistência média, o que corresponde a um desvio padrão de $\sigma = 4,85$ MPa. Com isso, através da equação (65), o valor do f_{cm} calculado é:

$$f_{cm} = f_{ck} + 1.65 \cdot \sigma = f_{ck} + 1.65 \cdot 4.85 \quad (65)$$

O uso de um desvio padrão constante é justificado por Neville (2015) com ensaios realizados em centrais de concreto na Suécia, pois de acordo com os valores reais obtidos, o desvio padrão apresenta uma mesma característica, conforme mostra a Tabela 06:

Tabela 6 – Desvio padrão de acordo com a classe de resistência obtido por ensaio em concreteiras na Suécia

Classe de resistência	20	25	30	40	50	60
Desvio padrão (MPa)	3,2	3,3	3,5	3,7	3,4	3,3

Fonte: Neville, 2015.

O uso da distribuição normal na resistência do concreto corresponde a um rigoroso controle no preparo do material com um baixo valor de desvio padrão, pois nessas situações a probabilidade de resistência negativa é muito baixo, apesar de existir. Vários trabalhos que envolvem incertezas no projeto costumam utilizar essa distribuição (SANTOS et al, 2014). Entretanto, Drysdale apud Melchers e Beck (2018) recomenda que nas situações em que não houver controle adequado na fabricação do material, deve ser utilizada a distribuição lognormal, pois, para este tipo de distribuição, a probabilidade de valores negativos é nula. Como o valor do f_{cm} é variável e o desvio padrão é fixo, poderíamos ter uma distribuição com probabilidade de valores de resistência negativo considerável, para valores baixos de f_{cm} . Diante disso, a distribuição lognormal foi considerada com a resistência média, f_{cm} , e o desvio padrão de 4,85.

5.1.2.2 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é uma das propriedades do concreto obtida com a resistência característica. O JCSS (2001) apresenta como calcular essa variável, porém ao ser adotado a distribuição lognormal para a resistência do concreto, o trabalho propõe que baseado na equação (3), o módulo de elasticidade seja calculado para cada ponto da amostra obtida pela simulação de Monte Carlo, conforme a equação (66), apresentada no CEB-FIP (1993).

$$E_{C_i} = E_{C_0} \left[\frac{f_{c_i}}{f_{c_{mo}}} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (66)$$

Onde: f_{c_i} é a resistência característica do concreto para cada ponto da amostra obtida por MC.

5.1.2.3 Coeficiente de Fluência

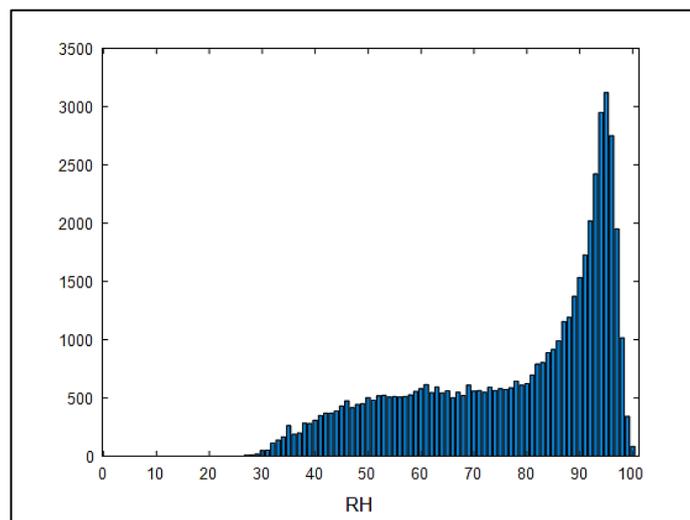
O cálculo do coeficiente de fluência realizado pelo JCSS (2001) sugere o uso de alguma norma, de forma determinística. Entretanto, a proposta do procedimento é que aplicando o CEB-FIP (1993), conforme equação (11), as variáveis existentes no cálculo do coeficiente de fluência, como o f_{ck} , umidade relativa e dimensões, passam a considerar as incertezas do problema através de amostras obtidas randomicamente no programa MATLAB (2019). Assim:

$$\phi(t, t_0) = \phi_0 \beta_c (t - t_0)$$

5.1.3 Umidade Relativa

Os parâmetros de distribuição para a variabilidade da umidade relativa dependem de incertezas intrínsecas as ações externas. A determinação desses parâmetros foi obtida por um modelo estatístico devido à ausência de trabalhos sobre a distribuição da umidade relativa e a possibilidade de obter dados específicos de uma região para realização de um estudo local. Neste caso, foram utilizados os dados experimentais da estação meteorológica de Surubim, que é representativo para o estado de Pernambuco, fornecidos pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Esses dados contemplam a umidade relativa a cada hora, todos os dias durante o período de 2008 a 2014.

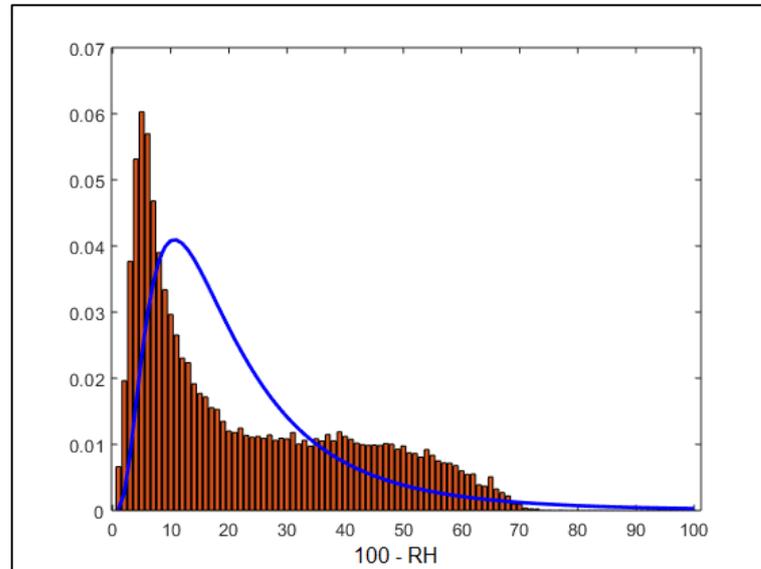
Figura 49 – Histograma da umidade relativa.



Fonte: A autora, 2020.

Após o tratamento dos dados, o histograma foi determinado como visto na Figura 49, porém para o ajuste de distribuição com característica lognormal é necessário considerar o estudo da variável como $Y = 100 - RH$. Assim, pode ser encontrada a média e o desvio padrão utilizados para a umidade relativa (Figura 50).

Figura 50 – Ajuste de curva de distribuição lognormal para cálculo da umidade relativa.



Fonte: A autora, 2020.

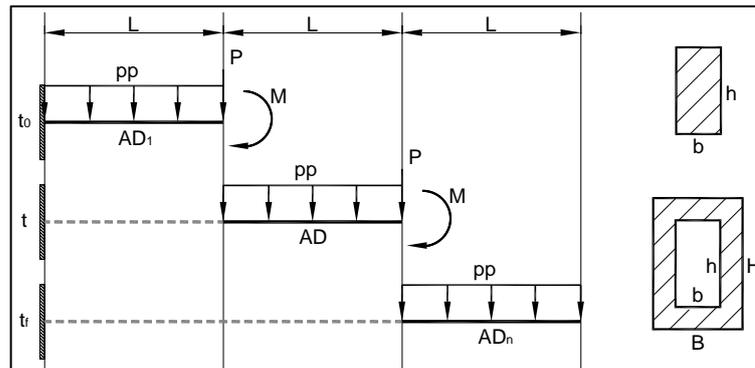
5.1.4 Carregamentos

O uso da distribuição normal para representar estudos estocásticos no cálculo de carregamentos de peso próprio é recomendado pelo JCSS (2001), pois a mesma distribuição é utilizada no peso específico. Conforme já apresentado, para determinar as contra flechas são consideradas as deformações de peso próprio e carga permanente (MENN, 1990). A carga de peso próprio por MC é obtida através da densidade do material, com coeficiente de variação, $CV_\gamma = 0,04$, e volume da peça que obedece à variação das dimensões de peças de concreto, conforme já apresentado (JCSS, 2001). A formulação do cálculo do peso próprio possibilitou com o uso de MC obter a média, desvio padrão e coeficiente de variação do carregamento, $CV_{PP} = 0,0410$, em seções genéricas.

5.2 VERIFICAÇÃO DO CÁLCULO DE CONTRA FLECHA ESTOCÁSTICO PARA ESTRUTURAS EM BALANÇOS SUCESSIVOS

A proposta do cálculo de contra flechas por processo estocástico foi comparada com o método determinístico, para quatro modelos conforme apresentado na Figura 51 e nas Tabelas 07 e 08, para cada intervalo de tempo de execução, considerando a fluência em cada ciclo construtivo (t_0 – tempo inicial; t – tempo ao longo da execução; t_f – tempo final).

Figura 51 – Modelo genérico de viga engastada para comparação de contra flechas.



Fonte: A autora, 2020.

Tabela 7 – Modelos utilizados para comparação de contra flechas

Modelo	Geometria	Carregamentos	Propriedades do Material
1	L=3m b=30cm h=60cm ADn=3	pp=0.45tf/m P=1.35tf M=2.025tfm	fck=30Mpa u=0.20m RH=80%
2	L=5m b=30cm h=60cm ADn=3	pp=0.45tf/m P=2.25tf M=5.625tfm	fck=30Mpa u=0.20m RH=80%
3	L=5m B=800 – b=600cm H=300 – h=200cm ADn=3	pp=30tf/m P=150tf M=375tfm	fck=30Mpa u=1.09m RH=80%
3A	L=5m B=800 – b=600cm H=300 – h=200cm ADn=7	pp=30tf/m P=150tf M=375tfm	fck=30Mpa u=1.09m RH=80%

Fonte: A autora, 2020.

Tabela 8 – Cronograma genérico de execução da obra

	Estágio					
	1		...		n	
	A	D	A	D	A	D
Geometria - AD 1	X					
Peso Próprio - AD 1	X					
Peso concreto fresco – AD	X			X		
Geometria – AD			X			
Peso Próprio – AD			X			
Peso concreto fresco - ADn			X			X
Geometria – ADn					X	
Peso Próprio – ADn					X	

A – Ativado / D – Desativado

Fonte: A autora, 2020.

Os modelos 1, 2 e 3 possuem 3 aduelas. Já o modelo 3A é composto por um total de 7 aduelas. Os carregamentos P e M são referentes ao peso do concreto fresco da aduela subsequente, que são removidos quando o peso próprio da referida aduela começar a atuar.

5.2.1 Resultados das contra flechas

A comparação dos valores de contra flecha de projeto considerando a fluência existente em cada ciclo de execução pelos métodos determinístico e estocástico dos modelos 1 e 3A da Tabela 07 são apresentados nas Tabelas 09 e 10, respectivamente. Os valores do método estocástico são obtidos pela média da possível dispersão, desta forma, o estudo com variáveis aleatórias permite identificar a variabilidade das contra flechas a serem aplicadas no projeto. É possível ver a configuração das contra flechas obtidas pelos dois métodos nas Figuras 51 e 52. Os demais modelos podem ser vistos no ANEXO C.

5.2.1.1 Modelo 1

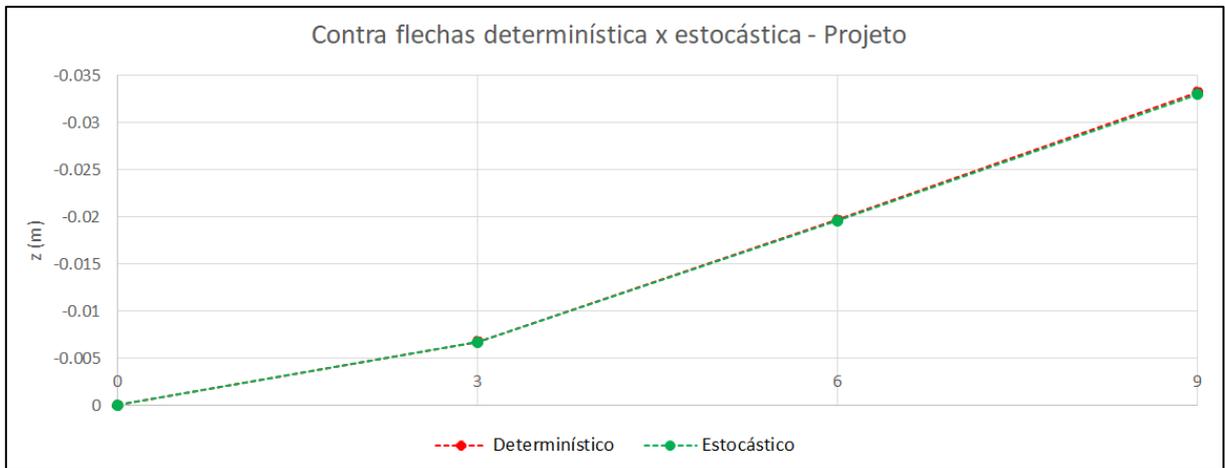
O cálculo estocástico apresenta contra flechas com valores muito semelhantes ao determinístico, como mostra a taxa de relação entre os resultados (D/E) da Tabela 09. A Figura 52 também mostra a proximidade das curvas, em que a estocástica se apresenta mais abaixo.

Tabela 9 – Contra flecha de projeto para o modelo 1 (m)

Variáveis	Nós			
	1	2	3	4
Determinístico (D)	0.00	-0.006751	-0.019717	-0.033238
Estocástico (E)	0.00	-0.006710	-0.019575	-0.033014
Taxa D/E (%)	0.00	100.61	100.73	100.68

Fonte: A autora, 2020.

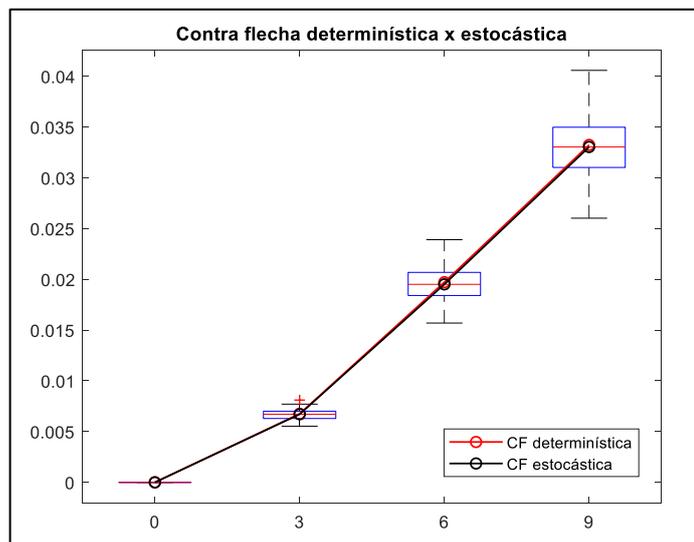
Figura 52 – Configuração das contra flechas de projeto determinística e estocástica para o modelo 1.



Fonte: A autora, 2020.

Em relação ao estudo estocástico, a variabilidade dos valores de contra flecha pode ser analisado de acordo com a dispersão, que poderá ser aplicado em estudos de confiabilidade. O gráfico da Figura 53 permite observar como funciona o resultado determinístico, a média estocástica e faixa de possibilidades de resultados ocorridos.

Figura 53 – Contra flechas de projeto determinística e estocástica diante da possível dispersão no modelo 1.



Fonte: A autora, 2020.

5.2.1.2 Modelo 3A

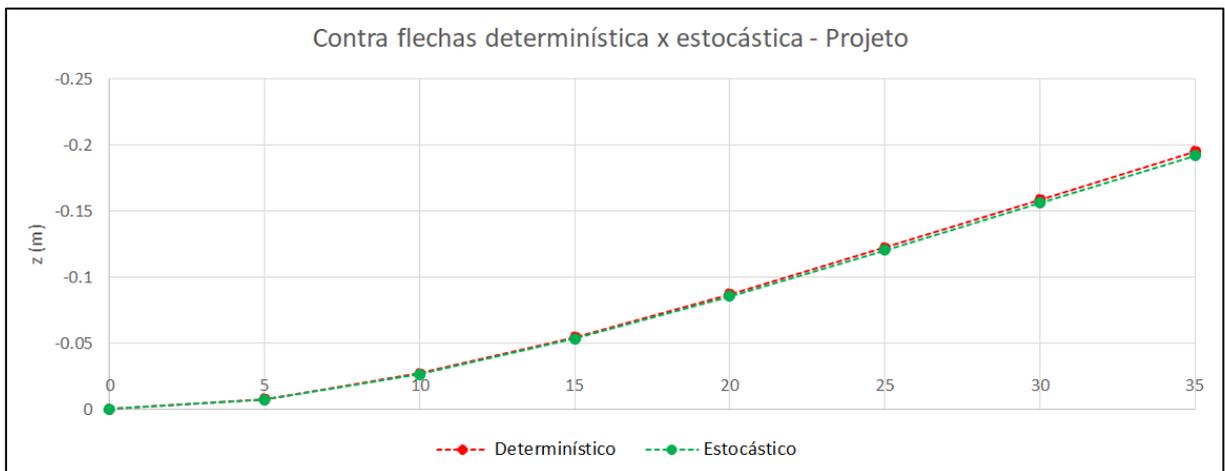
Os valores de contra flechas, novamente, estão muito próximos, sendo observado pela taxa (D/E) da Tabela 10. A curva determinística aparece, mais uma vez, acima da curva estocástica (Figura 54).

Tabela 10 – Contra flecha de projeto para o modelo 3A (m)

Variáveis	Nós							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Determinístico (D)	0.00	-0.007495	-0.026845	-0.054327	-0.086912	-0.122256	-0.158693	-0.195225
Estocástico (E)	0.00	-0.007370	-0.026404	-0.053434	-0.085505	-0.120266	-0.156095	-0.192016
Taxa D/E (%)	0.00	101.70	101.67	101.67	101.65	101.65	101.66	101.67

Fonte: A autora, 2020.

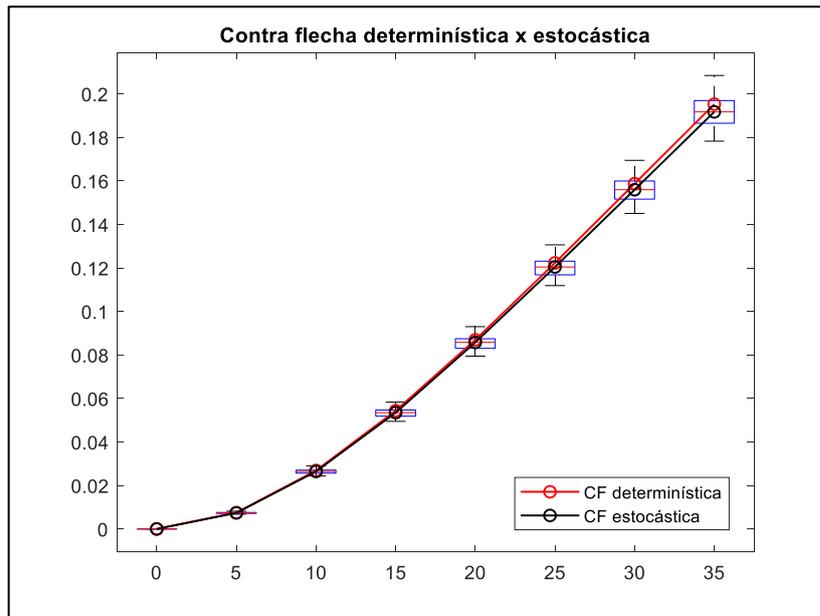
Figura 54 – Configuração das contra flechas de projeto determinística e estocástica para o modelo3A.



Fonte: A autora, 2020.

O método estocástico apresenta a média das contra flechas a serem aplicadas e a sua dispersão. Ao comparar com a análise determinística, é possível observar na Figura 55, que os valores de contra flechas estão dentro da faixa de dispersão e que com o aumento do comprimento da viga esses valores se afastam da média.

Figura 55 – Contra flechas de projeto determinística e estocástica diante da possível dispersão no modelo 3A.



Fonte: A autora, 2020.

Diante dos resultados apresentados, a média do processo estocástico apresenta valores de contra flechas próximos aos do determinístico, que é o método utilizado atualmente nos projetos. Em todos os modelos, é observado que as contra flechas determinísticas possuem valores maiores, resultado de deformações previstas na análise do projeto também maiores. Assim, essa estrutura apresenta uma maior flexibilidade, o cálculo pelo método determinístico pode ser considerado conservador ao confrontar com o processo estocástico proposto. À medida que a estrutura aumenta de comprimento o valor determinístico tende a fugir do valor médio de um estudo estocástico.

5.3 CORREÇÃO DE CONTRA FLECHAS APLICANDO INCERTEZA NAS VARIÁVEIS COM PROCESSO ESTOCÁSTICO

O procedimento de correção de contra flecha, já apresentado, requer minimizar os resíduos da deformada em campo com as estimadas no projeto, através do processo de otimização do Método dos Mínimos Quadrados (MMQ). Desta forma, são obtidos novos valores para as variáveis otimizadas, f_{ck} e média de RH, para que as deformações sejam recalculadas e assim, novas contra flechas sejam obtidas. Todo esse procedimento foi aplicado para o processo determinístico, porém o estudo proposto utiliza o programa de deformações com variáveis estocásticas no processo de otimização para que as correções e as médias das novas contra flechas de projeto sejam calculadas probabilisticamente.

5.4 VERIFICAÇÃO DA CORREÇÃO DE CONTRA FLECHA COM PROCESSO ESTOCÁSTICO

Assim como em todas as etapas do estudo, os modelos de projeto foram submetidos ao método proposto, e, assim, as contra flechas corrigidas e os resíduos finais devido às deformações que ocorrem na estrutura foram comparados com as soluções pelo método determinístico. Nos modelos sempre são considerados os intervalos de tempo entre a execução de uma aduela e outra, desta forma, o efeito de fluência passa a ser diferencial nas análises.

5.4.1 Obtenção dos dados dos deslocamentos reais

Para realizar a correção de contra flechas é necessário o uso de dados reais obtidos em levantamento de campo. Como a verificação foi realizada de maneira empírica, os dados foram obtidos nos modelo estudados, através dos valores de f_{ck} e RH no programa de deformações estocástica, gerando 4 casos para o estudo. Os valores de f_{ck} e RH para obtenção dos casos reais “sintéticos” estão na tabela abaixo, com a rigidez diminuindo do caso 1 para o caso 4 (ANEXO D).

Tabela 11 – Valores de f_{ck} e RH utilizados para os deslocamentos reais

Caso	f_{ck}	RH
Caso 1	30 MPa	80%
Caso 2	20 MPa na primeira aduela 30 MPa nas demais aduelas	70% na primeira aduela 80% nas demais aduelas
Caso 3	30 MPa na primeira aduela 20 MPa nas demais aduelas	80% na primeira aduela 70% nas demais aduelas
Caso 4	20 MPa	70%

Fonte: A autora, 2020.

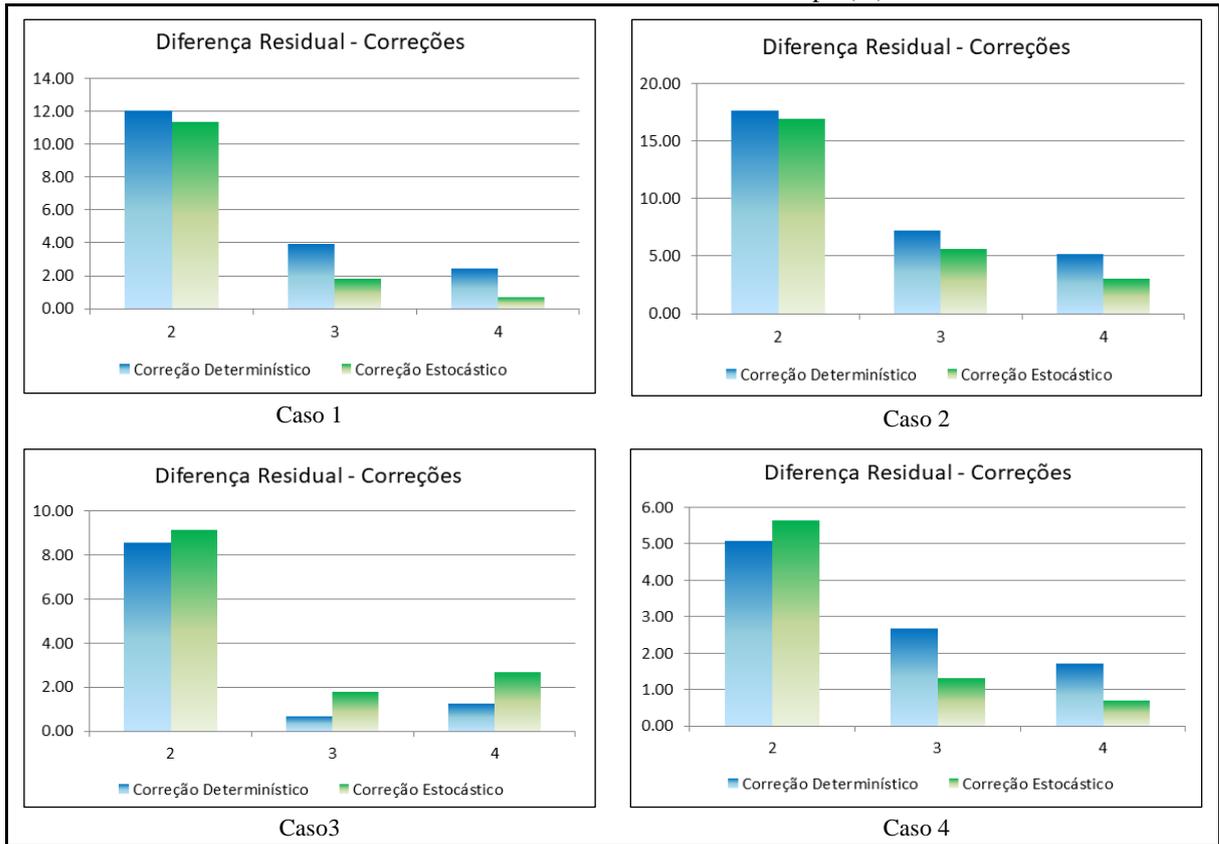
5.4.2 Resultados da correção de contra flechas

Os resultados das correções dos modelos 1 e 3A para todos os casos estão apresentados nas figuras abaixo. Os valores para os outros modelos podem ser vistos no ANEXO E.

5.4.2.1 Modelo 1

Na Figura 56, é possível ver o percentual da deformação residual, Z_{nj} , em relação à deformação acumulada total ocorrida na estrutura, Y_j .

Figura 56 – Comparação do resíduo final com a deformação acumulada total para o modelo 1 em todos os levantamentos de campo (%).



Fonte: A autora, 2020.

A configuração das contra flechas corrigidas pelo método determinístico e estocástico são comparadas para cada caso de leitura de campo.

- Caso 1: o concreto utilizado é mais rígido do que o projeto solicita: a contra flecha inicial enrijece a estrutura de forma que a aduela seguinte precisa ser enrijecida. Porém o enrijecimento das correções ocorreu de maneira que a deformação real ficou mais flexível, repercutindo em uma flexibilização das contra flechas a serem corrigidas. Associando a Figura 57 e a Tabela 12 é observado que de acordo com a flexibilidade ou rigidez da contra flecha real, ocorre à repercussão de flexibilidade ou rigidez para a próxima aduela. Neste caso ocorre mais flexibilização e o processo estocástico atinge resíduos menores (Figura 56 – Caso 1).

Tabela 12 – Comportamento das contra flechas na execução de cada nó com o caso 1 no modelo 1

Nó	Posição da CF-Real em relação as CF dos projetos	Influencia para correção da próxima contra flecha	Processo de melhor resultado
2	Rígido	Enrijecer	Estocástico
3	Flexível	Flexibilizar	Estocástico
4	Flexível	Flexibilizar	Estocástico

Fonte: A autora, 2020.

Figura 57 – Contra flechas corrigidas aplicada a estrutura com dados de campo do caso 1 no modelo 1.



Fonte: A autora, 2020.

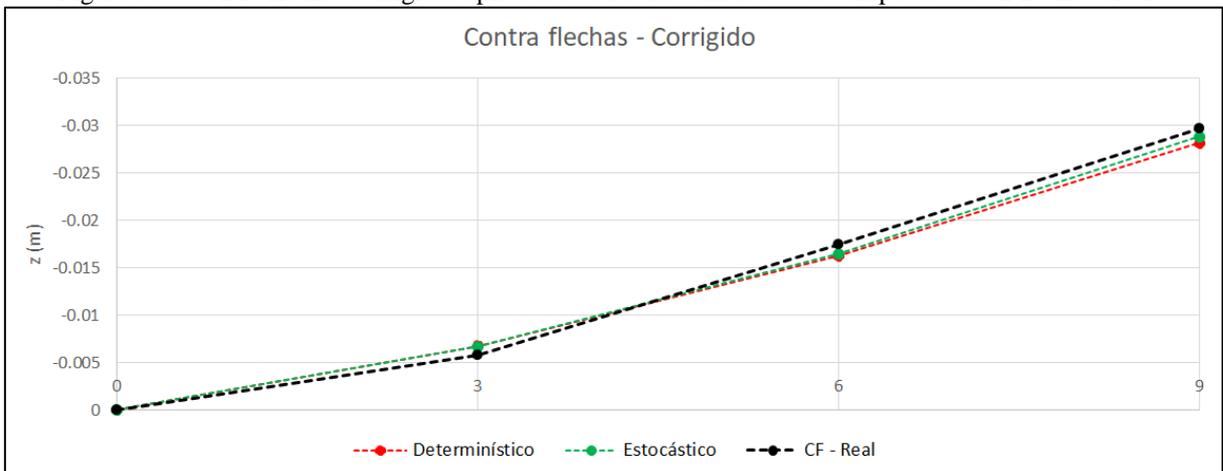
- Caso 2: o concreto utilizado na primeira aduela é mais rígido e nas demais aduelas mais flexível do que o projeto solicita: a rigidez ocorrida no primeiro segmento repercute enrijecendo as contra flechas. Porém a flexibilização da estrutura solicita que as contra flechas também sejam flexibilizadas conforme mostra a Figura 58 e é apresentado na Tabela 13. Neste caso, o processo estocástico também apresenta melhor resultado, atingindo um resíduo menor (Figura 56 – Caso 2).

Tabela 13 – Comportamento das contra flechas na execução de cada nó com o caso 2 no modelo 1

Nó	Posição da CF-Real em relação as CF dos projetos	Influencia para correção da próxima contra flecha	Processo de melhor resultado
2	Rígido	Enrijecer	Estocástico
3	Flexível	Flexibilizar	Estocástico
4	Flexível	Flexibilizar	Estocástico

Fonte: A autora, 2020.

Figura 58 – Contra flechas corrigidas aplicada a estrutura com dados de campo do caso 2 no modelo 1.

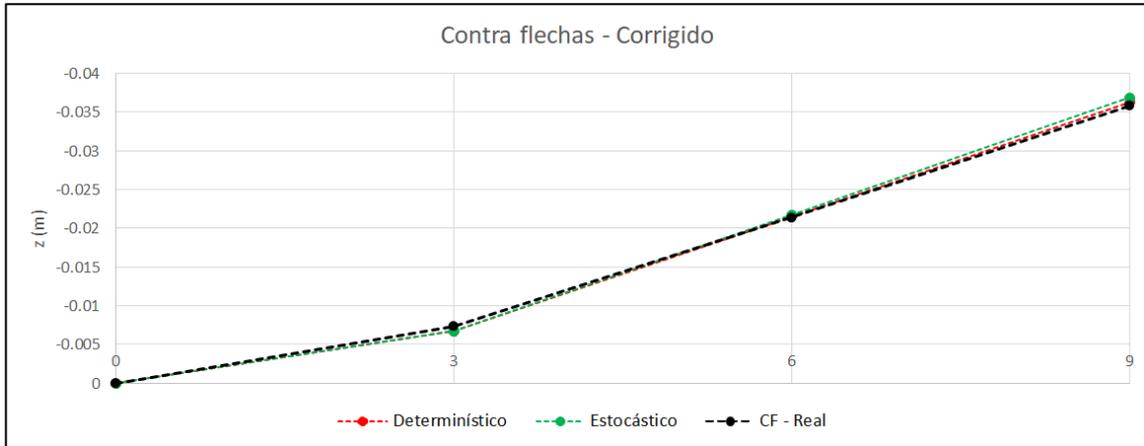


Fonte: A autora, 2020.

- Caso 3: o concreto utilizado na primeira aduela é mais flexível e nas demais aduelas mais rígido do que o projeto solicita: a flexibilidade ocorrida no primeiro segmento torna as contra

flechas mais flexíveis. Com o enrijecimento dos segmentos posteriores, as contra flechas precisam ser mais rígidas, conforme a Figura 59 e descrito na Tabela 14, e neste caso, o processo determinístico apresenta resíduos menores ao final da execução (Figura 56 – Caso 3).

Figura 59 – Contra flechas corrigidas aplicada a estrutura com dados de campo do caso 3 no modelo 1.



Fonte: A autora, 2020.

Tabela 14 – Comportamento das contra flechas na execução de cada nó com o caso 3 no modelo 1

Nó	Posição da CF-Real em relação as CF dos projetos	Influência para correção da próxima contra flecha	Processo de melhor resultado
2	Flexível	Flexibilizar	Determinístico
3	Rígido	Enrijecer	Determinístico
4	Rígido	Enrijecer	Determinístico

Fonte: A autora, 2020.

- Caso 4: o concreto utilizado é mais flexível do que o projeto solicita: com a flexibilização da estrutura o processo determinístico apresenta um aumento da flecha de forma que será necessário que as contra flechas sejam mais flexíveis (Figura 60). O processo estocástico apresenta melhor configuração no caso de flexibilizar (Tabela 15).

Figura 60 – Contra flechas corrigidas aplicada a estrutura com dados de campo do caso 4 no modelo 1.



Fonte: A autora, 2020.

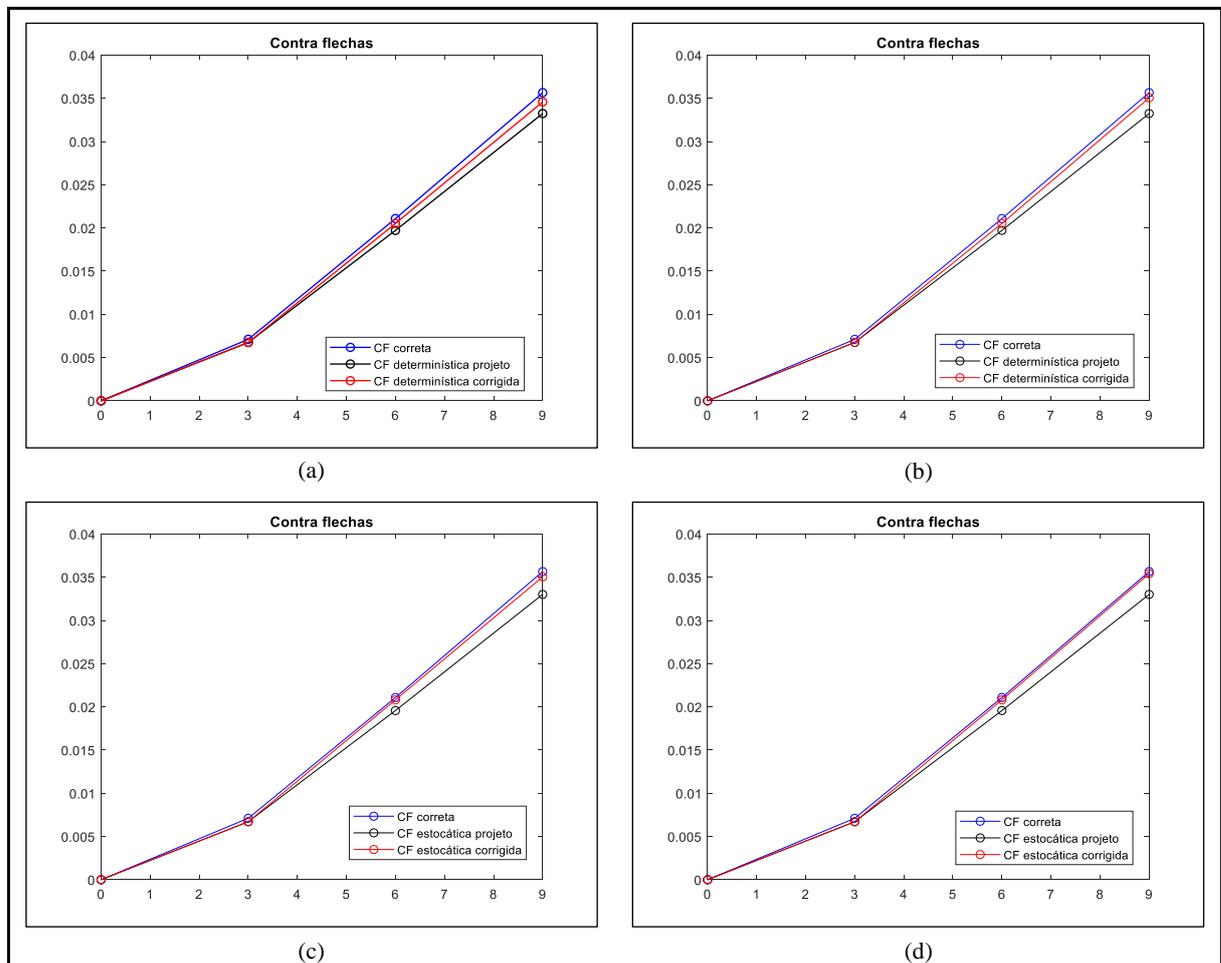
Tabela 15 – Comportamento das contra flechas na execução de cada nó com o caso 4 no modelo 1

Nó	Posição da CF-Real em relação as CF dos projetos	Influencia para correção da próxima contra flecha	Processo de melhor resultado
2	Flexível	Flexibilizar	Determinístico
3	Flexível	Flexibilizar	Estocástico
4	Flexível	Flexibilizar	Estocástico

Fonte: A autora, 2020.

Ainda sobre o caso 4, a Figura 61 apresenta a evolução das correções de contra flechas a cada estágio, as contra flechas de projeto e as contra flechas corretas caso as deformações finais fossem conhecidas para cada um dos processos. Pode ser visto que o deslocamento das contra flechas corrigidas se afasta das contra flechas de projeto para a correta. Ao comparar a curva da correção de contra flecha ao final dos dois processos (Figura 61 (b) e (d)), o método estocástico apresenta proximidade com a correta.

Figura 61 – Contra flechas corrigidas, projeto e correta para os dois processos do caso 4 no modelo 1. Correção determinística para execução do nó3 (a) e nó4 (b); Correção estocástica para execução do nó3 (c) e nó4 (d).

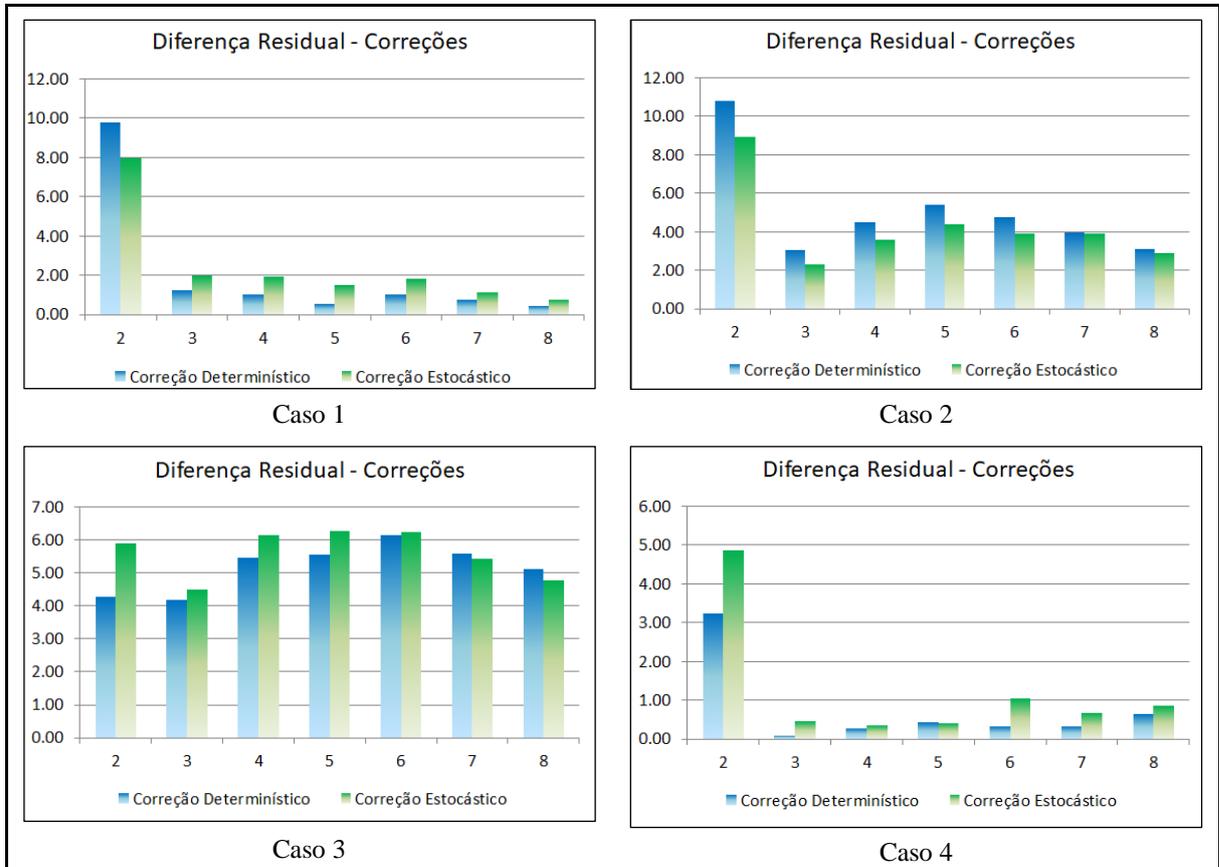


Fonte: A autora, 2020.

5.4.2.2 Modelo 3A

Assim como no modelo anteriormente estudado, a Figura 62 apresenta o percentual da deformação residual, Z_{nj} , em relação à deformação acumulada total ocorrida na estrutura, Y_j .

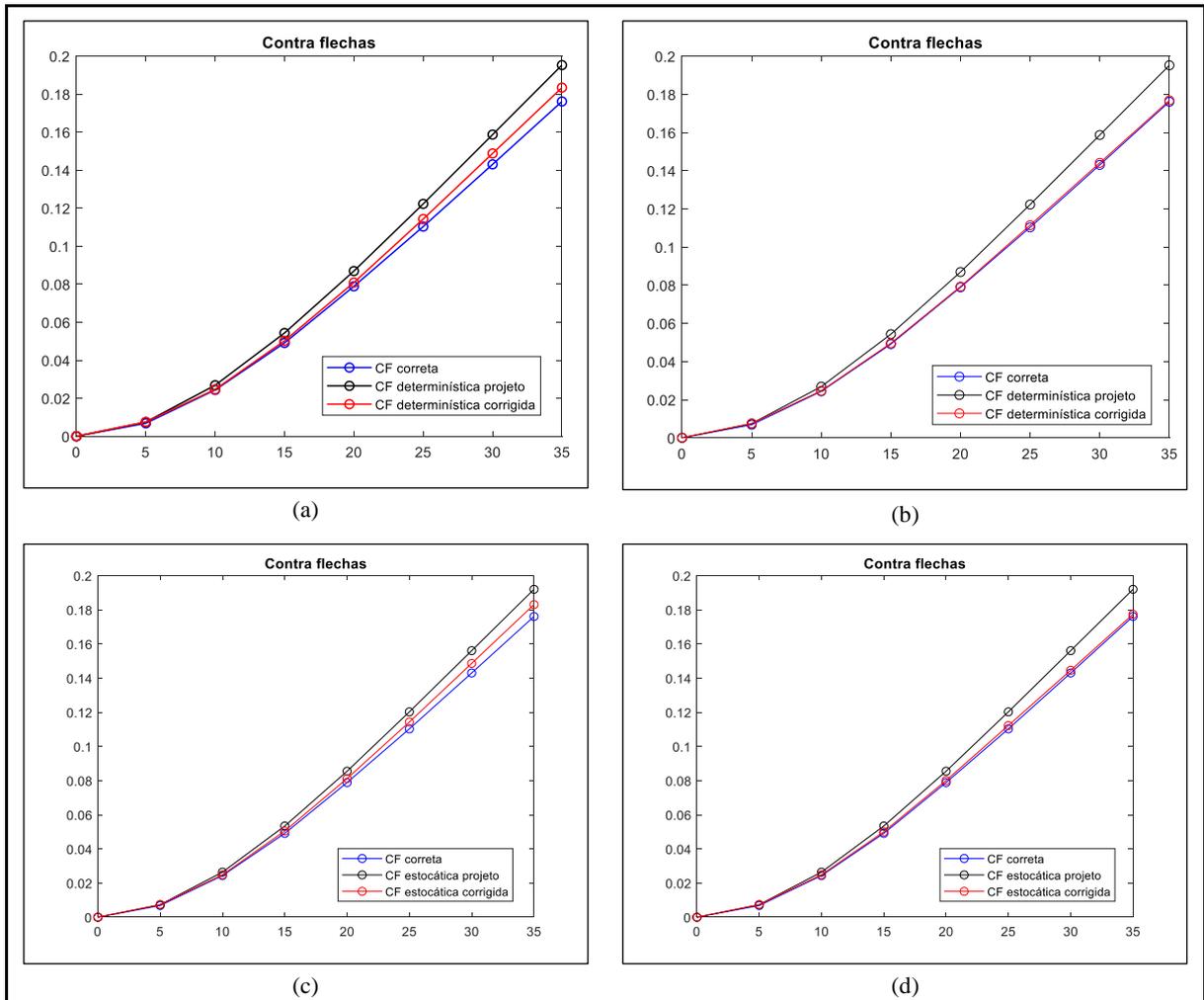
Figura 62 – Comparação do resíduo final com a deformação acumulada total para o modelo 3A em todos os levantamentos de campo (%).



Fonte: A autora, 2020.

- Caso 1: o concreto utilizado é mais rígido do que o projeto solicita: a correção de contra flecha solicita que o projeto se torne mais rígido, assim, a curva corrigida tende a diminuir. O enrijecimento repercute em melhores resultados para o processo determinístico. A Figura 63 apresenta a evolução da correção.

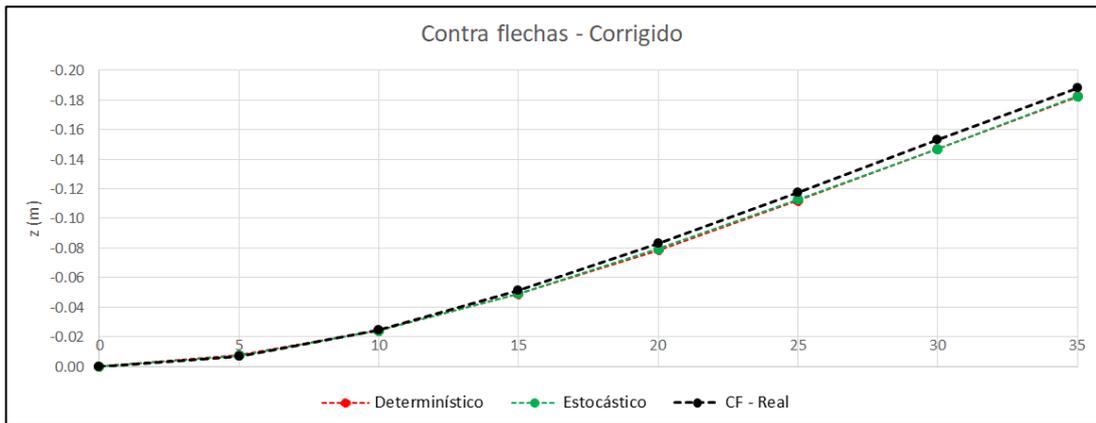
Figura 63 – Contra flechas corrigidas, projeto e correta para os dois processos do caso 1 no modelo 3A. Correção determinística para execução do nó3 (a) e nó8 (b); Correção estocástica para execução do nó3 (c) e nó8 (d).



Fonte: A autora, 2020.

- Caso 2: o concreto utilizado na primeira aduela é mais rígido e nas demais aduelas mais flexível do que o projeto solicita: a viga possui um comprimento maior e apesar do enrijecimento da primeira aduela, a estrutura se flexibiliza (Figura 64 e Tabela 16). Com isso, as correções precisam ser flexibilizadas, resultando em melhores resultado para o processo estocástico.

Figura 64 – Contra flechas corrigidas aplicada a estrutura com dados de campo do caso 2 no modelo 3A.



Fonte: A autora, 2020.

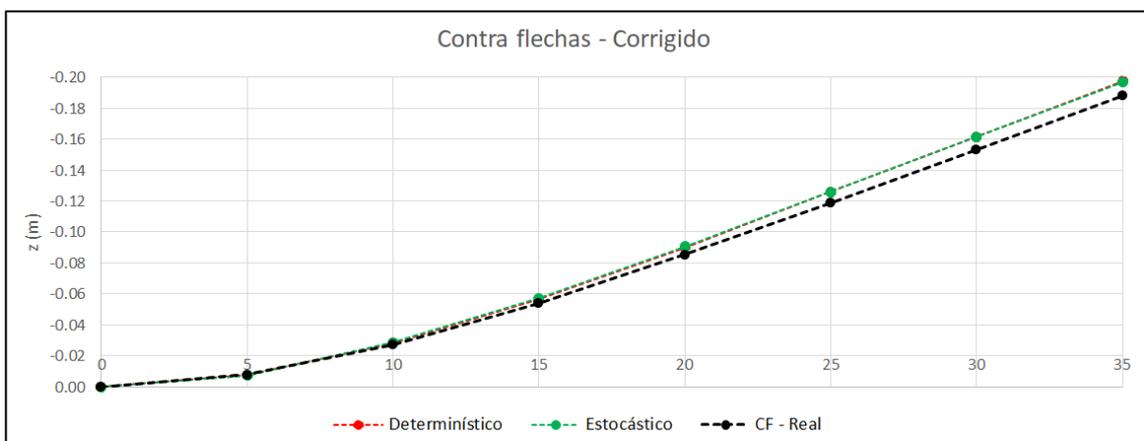
Tabela 16 – Comportamento das contra flechas na execução de cada nó com o caso 2 no modelo 3A

Nó	Posição da CF-Real em relação às CF dos projetos	Influencia para correção da próxima contra flecha	Processo de melhor resultado
2	Rígido	Enrijecer	Estocástico
3	Flexível	Flexibilizar	Estocástico
4	Flexível	Flexibilizar	Estocástico
5	Flexível	Flexibilizar	Estocástico
6	Flexível	Flexibilizar	Estocástico
7	Flexível	Flexibilizar	Estocástico
8	Flexível	Flexibilizar	Estocástico

Fonte: A autora, 2020.

- Caso 3: o concreto utilizado na primeira aduela é mais flexível e nas demais aduelas mais rígido do que o projeto solicita: mesmo com a flexibilização da primeira aduela, ocorre o enrijecimento da estrutura, necessitando que as contra flechas sejam enrijecidas, assim, o processo determinístico apresenta melhores resultados (Figura 65).

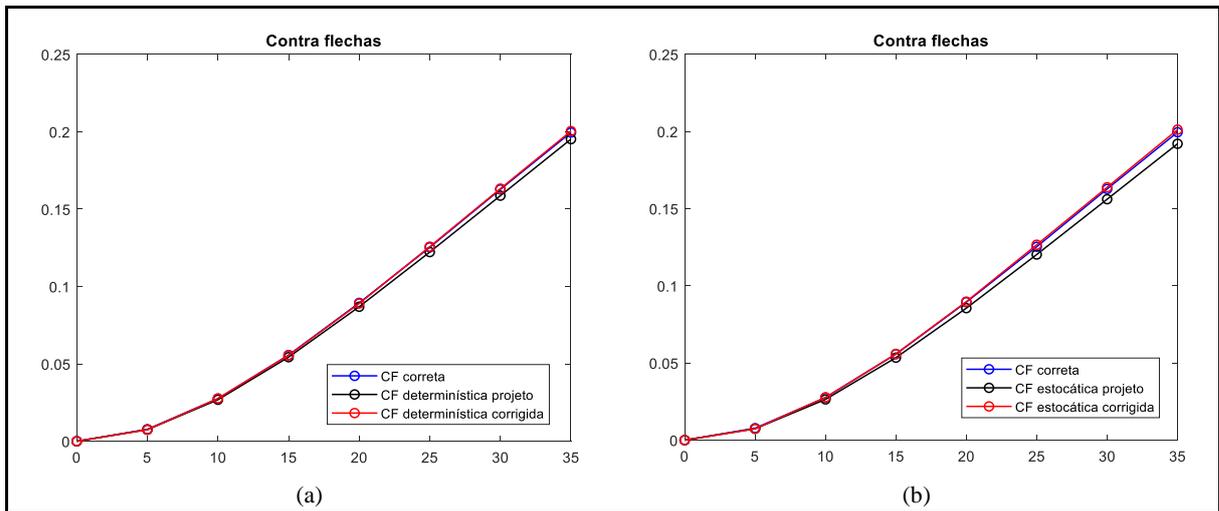
Figura 65 – Contra flechas corrigidas aplicada a estrutura para dados de campo do caso 3 no modelo 3A.



Fonte: A autora, 2020.

- Caso 4: o concreto utilizado é mais flexível do que o projeto solicita: com a flexibilização da estrutura os processos apresentam um aumento da flecha ao qual ocorre a necessidade de enrijecer para o ajuste. Na Figura 66, são comparadas as contra flechas finais pelos dois processos e devido ao enrijecimento o determinístico se mais aproxima da contra flecha correta.

Figura 66 – Contra flechas corrigidas, projeto e correta para os dois processos do caso 1 no modelo 1. Correção determinística para execução do (a) nó3 e (b) nó4; Correção estocástica para execução do (c) nó3 e (d) nó4.



Fonte: A autora, 2020.

5.5 RESUMO DO USO DE INCERTEZA NAS VARIÁVEIS PARA CORREÇÃO DE CONTRA FLECHA

Diante de todas as verificações realizadas, é possível destacar as seguintes informações sobre a consideração de incertezas.

- As recomendações do JCSS (2001) são aplicáveis para determinar a distribuição probabilística e o coeficiente de variação das variáveis em um projeto. Entretanto, a umidade relativa não apresenta recomendações, mas é possível coletar dados meteorológicos da região do projeto e determinar os parâmetros probabilísticos.
- No caso da resistência característica do concreto, f_{ck} , mesmo com as orientações do JCSS (2001), outros estudos (NEVILLE, 2015; MELCHERS e BECK, 2018) sugerem o uso da distribuição lognormal quando não há rigoroso controle da fabricação. Essa distribuição foi utilizada no método proposto com os devidos parâmetros definidos e apresenta bons resultados para caracterizar o concreto.
- Os comparativos das contra flechas de análise determinística com estocástica apresentaram valores muito próximos em todos os modelos estudados. Como as contra flechas

determinísticas apresentam valores maiores significa que as deformações também são maiores, o que considera contra flechas para uma estrutura de projeto mais flexível, podendo ser considerada mais conservador do que o método estocástico.

- A correção de contra flechas apresenta uma característica comum nos modelos estudados. Nos casos 1, 2 e 4 dos modelos analisados, a execução do primeiro segmento leva as contra flechas de projeto a serem mais rígidas e necessitando ser flexibilizada nas demais correções. O processo estocástico responde bem a essa flexibilização resultando em resíduos com menor valor.
- Já o caso 3, a execução mais flexível do primeiro segmento repercute na necessidade de enrijecer as contra flechas, e o estocástico em situações como esta responde melhor. É importante destacar que os valores estão na ordem de 0,5 mm, com isso os resultados são considerados satisfatórios para aplicação do método estocástico.
- No caso do modelo 3A, com o aumento do comprimento da viga, existe diferença nos casos analisados. Mas o comportamento é semelhante, pois quando é necessário enrijecer a estrutura o processo estocástico apresenta melhor comportamento. Já na flexibilização, maiores deformações, o processo estocástico proposto responde melhor, atendendo ao greide de projeto a favor da segurança.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

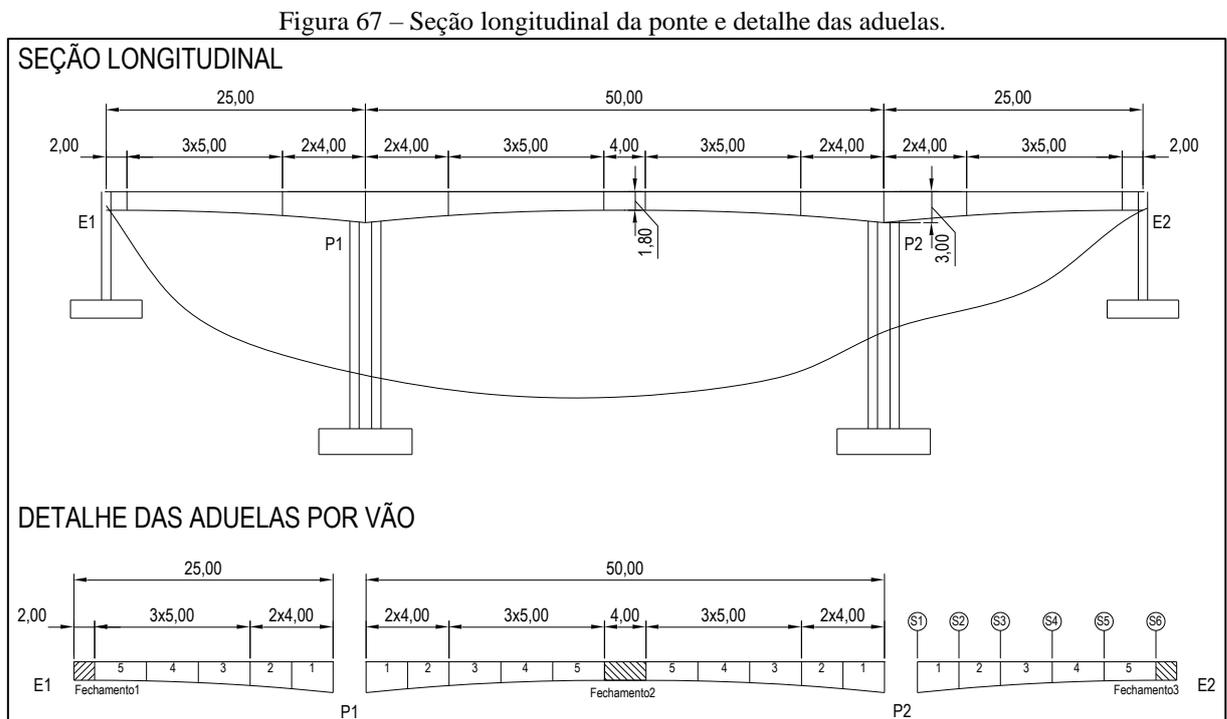
O método proposto é aplicado a uma ponte executada em balanços sucessivos, apresentado por Oyamada (2004), que sugere a correção de contra flecha pelo método geométrico. Santos (2014) reproduziu as correções geométricas e comparou os resultados com um procedimento otimizador. Todos esses métodos foram comparados com a metodologia proposta.

6.1 DESCRIÇÃO DO CASO

Abaixo, segue os dados do caso estudado.

6.1.1 Geometria da ponte

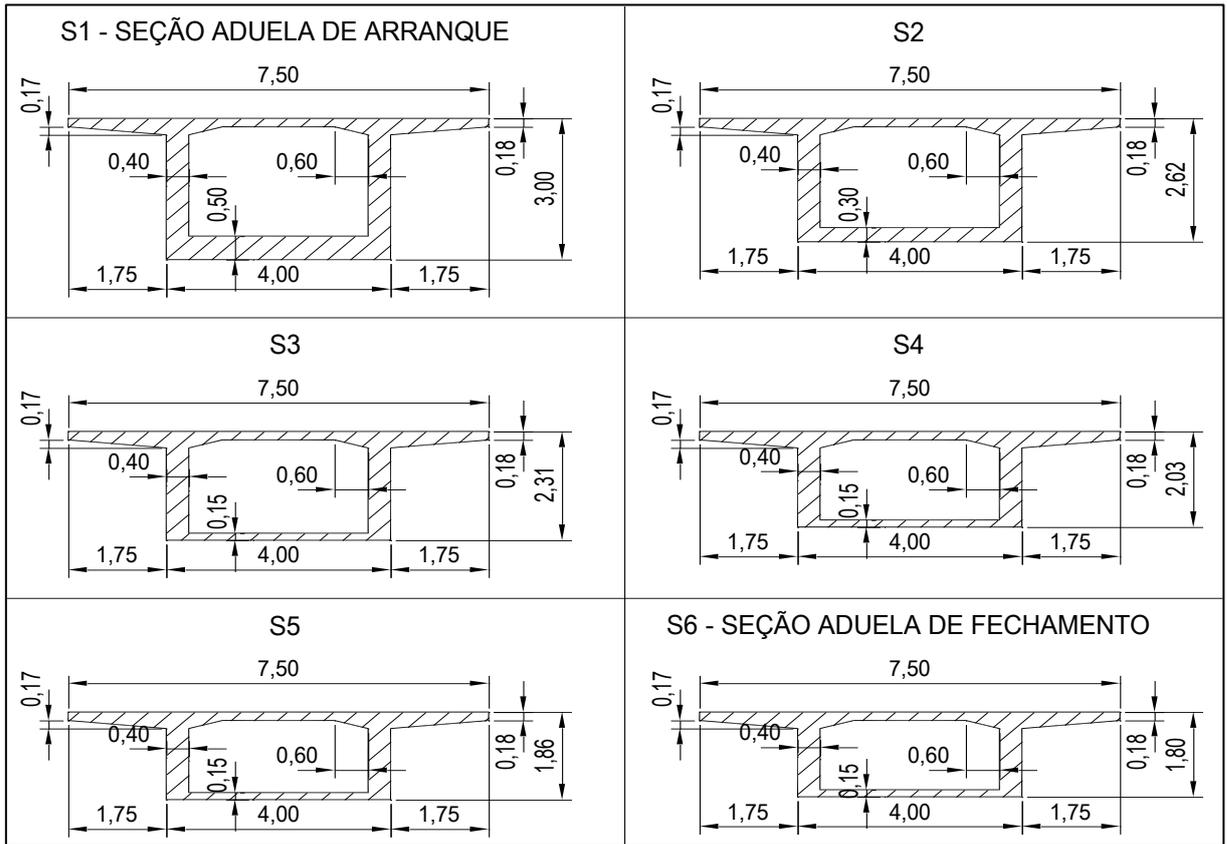
A extensão da ponte é de 100 m, dividida em três vãos de 25 m, 50 m e 25 m, conforme a Figura 67. Os vãos são divididos em cinco aduelas com comprimentos diferentes, duas aduelas com 4m e três aduelas com 5 m.



Fonte: Santos, 2014.

No vão central, uma aduela de fechamento possuindo 4 m de comprimento, faz a ligação entre os balanços originados dos apoios. Próximo aos encontros da ponte, também existem aduelas de fechamento com 2 m, que fazem a ligação entre os balanços dos apoios e dos encontros. A largura do tabuleiro é de 7,50 m e a seção transversal das aduelas é variável da seção S1 a S6, podendo ser vista na Figura 68.

Figura 68 – Seção transversal das aduelas.



Fonte: Santos, 2014.

A distribuição das cordoalhas de protensão está dividida em dois conjuntos, na parte superior e inferior da seção. Na Tabela 17, é observada a distribuição longitudinal das cordoalhas definindo em quais aduelas estão e os devidos pontos de ancoragem.

Tabela 17 – Configuração superior e inferior dos cabos de protensão, longitudinalmente.

		ADUELAS												
		6	5	4	3	2	1	Pilar	1	2	3	4	5	6
CABOS SUPERIORES	cabo 1													
	cabo 2													
	cabo 3													
	cabo 4													
	cabo 5													
	cabo 6													
	cabo 7													
CABOS INFERIORES	cabo 1													
	cabo 2													
	cabo 3													
	cabo 4													
	cabo 5													
	cabo 6													
	cabo 7													

	Cabos protendidos por ambos os lados		Cabos protendidos somente por um lado
--	--------------------------------------	--	---------------------------------------

Fonte: Santos, 2014.

6.1.2 Materiais

A Tabela 18 apresenta os dados utilizados no projeto:

Tabela 18 – Dados do projeto

Resistência Característica	Umidade Relativa	Cimento de endurecimento normal
$f_{ck}=30$ MPa	RH=70%	$\alpha = 2$

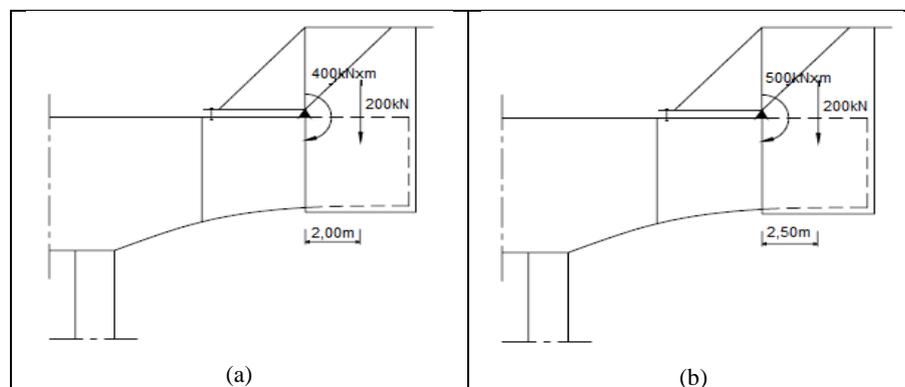
Fonte: A autora, 2020.

6.1.3 Carregamentos

A análise realizada ocorre no período de execução, com isso, quatro carregamentos foram aplicados ao modelo, além da consideração do efeito de fluência.

- Cargas Permanentes – Peso Próprio: Carga devido ao peso da estrutura (volume de concreto x densidade do concreto).
- Cargas Permanentes – Protensão: Carga aplicada para tracionar as cordoalhas. O valor da carga de 2888 kN aplicado no modelo através dos esforços atuantes em cada aduela.
- Forma de concretagem: A presença da forma, juntamente com a treliça, exerce uma força vertical de 200 kN, além de um momento de 400 kNm para as aduelas 1 e 2, pois a excentricidade do carregamento vertical é de 2 m, e 500 kNm para as demais aduelas, devido à excentricidade de 2,5 m (Figura 69). Entretanto, os deslocamentos causados pela deformação da treliça não são considerados.

Figura 69 – Carregamento da forma de concretagem.



Fonte: Santos, 2014.

- Peso do concreto fresco: Carga devido ao peso do concreto, aplicado à aduela anterior, somente, durante a fase da concretagem. É uma carga temporária, pois assume o valor de permanente após o endurecimento do concreto da aduela.

Fluência: Calculada para o modelo através da norma CEB-FIP (1993), considerando as variáveis como estocástica.

6.1.4 Estágio de Construção

A obra é executada em etapas construtivas, obedecendo ao cronograma estabelecido na Tabela 19, em que cada coluna corresponde a 1 mês.

Tabela 19 – Cronograma de execução da obra

	Mês					
	1	2	3	4	5	6
Aduela 1	X					
Aduela 2		X				
Aduela 3			X			
Aduela 4				X		
Aduela 5					X	
Aduela de Fechamento						X

Fonte: A autora, 2020.

Para a análise, os estágios de construção foram definidos de acordo com a proposta de Paim (1983) e Menn (1990) e como já apresentados na Figura 11, sendo considerada da seguinte forma:

- Estágio 1: é ativada a geometria da primeira aduela com os carregamentos de peso próprio da aduela e a protensão do cabo C1; além disso, também é ativado o carregamento da forma de concretagem e o peso do concreto fresco da aduela 2.
- Estágio 2 ao 5: é desativado o carregamento da forma da aduela e do concreto fresco; e ativada a geometria da aduela executada (2 a 5), juntamente com o peso próprio e a protensão do cabo ancorado na aduela executada; também são ativados o peso da forma e o peso do concreto fresco da aduela seguinte.
- Estágio 6: é desativado o carregamento da forma e do concreto fresco da aduela 5; e ativada a geometria da aduela de fechamento, juntamente com o peso próprio e a protensão do cabo.

A atuação dos elementos e carregamentos na estrutura de acordo com cada estágio está resumida na Tabela 20.

Tabela 20 – Cronograma dos elementos e carregamentos da estrutura

	Estágio											
	1		2		3		4		5		6	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
Geometria - Aduela 1	X											
Peso Próprio - Aduela 1	X											
Protensão - Aduela 1	X											
Forma – Aduela2	X			X								
Peso concreto fresco - Aduela 2	X			X								
Geometria - Aduela 2			X									
Peso Próprio - Aduela 2			X									
Protensão - Aduela 2			X									
Forma – Aduela 3			X			X						
Peso concreto fresco - Aduela 3			X			X						
Geometria - Aduela 3					X							
Peso Próprio - Aduela 3					X							
Protensão - Aduela 3					X							
Forma – Aduela 4					X			X				
Peso concreto fresco - Aduela 4					X			X				
Geometria - Aduela 4							X					
Peso Próprio - Aduela 4							X					
Protensão - Aduela 4							X					
Forma – Aduela 5							X			X		
Peso concreto fresco - Aduela 5							X			X		
Geometria - Aduela 5									X			
Peso Próprio - Aduela 5									X			
Protensão - Aduela 5									X			
Forma – Aduela de Fechamento									X			X
Peso concreto fresco Aduela de Fechamento									X			X
Geometria Aduela de Fechamento											X	
Peso Próprio Aduela de Fechamento											X	
Protensão Aduela de Fechamento											X	

• A – Ativado / D – Desativado

Fonte: A autora, 2020.

Com todos os ajustes e conferências para que o modelo se adeque ao máximo a realidade, ele pode ser submetido à análise e verificado os seus resultados. A contra flecha inicial aplicada à obra foi determinada utilizando a metodologia para cálculo de contra flecha estocástica com efeito de fluência em cada etapa e os resultados são apresentados na Tabela 21 e Figura 70.

Tabela 21 – Contra flechas relativa inicial de projeto estocástico (cm)

	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6
Contra Flecha	$cf_{11} = 0,00$	$cf_{12} = - 0,35$	$cf_{23} = - 0,59$	$cf_{34} = - 0,71$	$cf_{45} = - 0,48$	$cf_{56} = - 0,13$

Fonte: A autora, 2020.

Figura 70 – Configuração das contra flechas absolutas inicial de projeto estocástico (m).



Fonte: A autora, 2020.

6.2 DADOS DE CAMPO

Os dados do levantamento de campo foram obtidos de acordo com a simulação de dois pares de f_{ck} e RH, apresentado sinteticamente por Santos (2014) e mostrado abaixo:

Tabela 22 – Valores de f_{ck} e RH utilizados para os deslocamentos reais, por Santos (2014)

Caso	f_{ck}	RH
Caso A	36 MPa	80%
Caso B	26 MPa	60%

Fonte: A autora, 2020.

6.2.1 Caso A

Os deslocamentos isolados ocorridos na estrutura obtidos considerando o $f_{ck} = 36$ MPa e RH = 80%, estão apresentados na Tabela 23, onde deformação vertical abaixo do greide de projeto é positiva.

Tabela 23 – Deslocamentos isolados da estrutura em cada estágio para o caso A (cm)

Estágio	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6
1	$y_{11} = 0,00$	$y_{12} = 0,03$	-	-	-	-
2	$y_{21} = 0,00$	$y_{22} = 0,05$	$y_{23} = 0,19$	-	-	-
3	$y_{31} = 0,00$	$y_{32} = 0,08$	$y_{33} = 0,30$	$y_{34} = 0,77$	-	-
4	$y_{41} = 0,00$	$y_{42} = 0,11$	$y_{43} = 0,42$	$y_{44} = 1,11$	$y_{45} = 2,10$	-
5	$y_{51} = 0,00$	$y_{52} = 0,07$	$y_{53} = 0,26$	$y_{54} = 0,70$	$y_{55} = 1,35$	$y_{56} = 2,17$
6	$y_{61} = 0,00$	$y_{62} = - 0,003$	$y_{63} = - 0,02$	$y_{64} = - 0,06$	$y_{65} = - 0,13$	$y_{66} = - 0,23$

Fonte: A autora, 2020.

Considerando que os dados do levantamento de campo seriam obtidos a cada estágio, a determinação de novos valores de f_{ck} e RH foi realizada em cada etapa, e estimada as novas deformações de projeto e correções das contra flechas. A Tabela 24 apresenta um quadro resumo da evolução das variáveis de projeto encontradas após a execução de cada estágio pelo método de Santos (2014), determinístico e sem fluência, e a nova proposta considerando as incertezas.

Tabela 24 – Valores de f_{ck} e RH para o caso A

Estágio	SANTOS (2014)		Procedimento Proposto	
	f_{ck} (MPa)	RH (%)	f_{ck} (MPa)	RH (%)
1	30	70	30	70
2	30	70	30,15	70,11
3	33,45	73,7	34,85	66,89
4	38,13	75,7	34,34	70,66
5	32,23	83,7	34,18	70,80

Fonte: A autora, 2020.

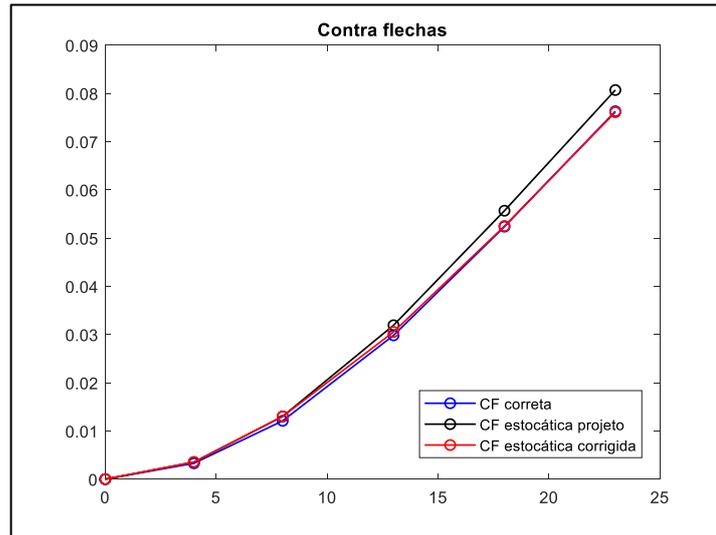
O comparativo entre os valores finais das contra flechas corrigidas e as determinadas em projeto são apresentadas na Tabela 25. E a configuração final das contra flechas de projeto e corrigidas podem ser vista na Figura 71.

Tabela 25 – Contra flechas relativa de projeto e corrigidas para o caso A (cm)

	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6
Contra Flecha Projeto	$cf_{11} = 0,00$	$cf_{12} = - 0,35$	$cf_{23} = - 0,59$	$cf_{34} = - 0,71$	$cf_{45} = - 0,48$	$cf_{56} = - 0,13$
Procedimento proposto	$cf_{11} = 0,00$	$cf_{12} = - 0,35$	$cf_{23} = - 0,59$	$cf_{34} = - 0,57$	$cf_{45} = - 0,44$	$cf_{56} = - 0,17$

Fonte: A autora, 2020.

Figura 71 – Comparativo das contra flechas corrigidas, projeto e correta do caso A.



Fonte: A autora, 2020.

Mesmo com a aplicação das contra flechas, acontecerá uma deformação residual que corresponde à posição da aduela após a execução do último estágio de construção. A Tabela 26 apresenta os resíduos para a execução das contra flecha do projeto e com as contra flechas pelo método proposto de correção.

Tabela 26 – Deformações residuais para o caso A (cm)

	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6
Contra Flecha Projeto	$Z_{61} = 0,00$	$Z_{62} = - 0,02$	$Z_{63} = - 0,09$	$Z_{64} = - 0,21$	$Z_{65} = - 0,33$	$Z_{66} = - 0,44$
Procedimento proposto	$Z_{61} = 0,00$	$Z_{62} = - 0,02$	$Z_{63} = - 0,09$	$Z_{64} = - 0,07$	$Z_{65} = - 0,01$	$Z_{66} = 0,02$

Fonte: A autora, 2020.

As comparações entre os métodos de correção de contra flecha precisam ser realizadas através do percentual da deformação residual, Z_{nj} , em relação à deformação acumulada total ocorrida na estrutura, Y_j , pois o critério de análise é a proporção do resíduo de acordo com a deformação ocorrida, destacando que somente o procedimento proposto considera a fluência no cálculo (Tabela 27). Os demais métodos de correção de contra flecha utilizam metodologia determinística e resíduos maiores ao comparar como o método proposto estocástico.

Tabela 27 – Comparação das deformações residuais com a deformação acumulada total para o caso A (%)

	Resíduo (%)					
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6
Contra Flecha Projeto	0,00	7,49	7,60	7,06	6,31	5,77
Procedimento proposto	0,00	7,49	7,54	2,39	0,24	0,25
SANTOS (2014)	0,00	9,09	14,89	12,18	5,96	2,26
OYAMADA (2004)	0,00	9,09	19,15	35,26	55,70	82,26

Fonte: A autora, 2020.

6.2.2 Caso B

Para este caso, os dados dos deslocamentos isolados da estrutura foram obtidos com a utilização do $f_{ck} = 26$ MPa e $RH = 60\%$, e pode ser visto na Tabela 28, em que deformação vertical abaixo do greide de projeto é positiva.

Tabela 28 – Deslocamentos isolados da estrutura em cada estágio para o caso B (cm)

Estágio	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6
1	$y_{11} = 0,00$	$y_{12} = 0,04$	-	-	-	-
2	$y_{21} = 0,00$	$y_{22} = 0,07$	$y_{23} = 0,24$	-	-	-
3	$y_{31} = 0,00$	$y_{32} = 0,10$	$y_{33} = 0,38$	$y_{34} = 0,98$	-	-
4	$y_{41} = 0,00$	$y_{42} = 0,13$	$y_{43} = 0,53$	$y_{44} = 1,40$	$y_{45} = 2,67$	-
5	$y_{51} = 0,00$	$y_{52} = 0,09$	$y_{53} = 0,34$	$y_{54} = 0,91$	$y_{55} = 1,76$	$y_{56} = 2,83$
6	$y_{61} = 0,00$	$y_{62} = 0,006$	$y_{63} = - 0,002$	$y_{64} = - 0,02$	$y_{65} = - 0,07$	$y_{66} = - 0,15$

Fonte: A autora, 2020.

Como no caso A, a determinação de novos valores de f_{ck} e RH foi obtida em cada etapa, e estimada as novas deformações de projeto e correções das contra flechas. Os resultados da evolução das variáveis de projeto otimizadas pelo método de Santos, que é determinístico e sem fluência, e do procedimento proposto com as incertezas podem ser vistos na Tabela 29.

Tabela 29 – Valores de f_{ck} e RH para o caso B

Estágio	SANTOS (2014)		Procedimento Proposto	
	f_{ck} (MPa)	RH (%)	f_{ck} (MPa)	RH (%)
1	30	70	30	70
2	20,56	44,5	21,40	44,20
3	21,45	51,7	22,69	49,14
4	24,69	50	23,03	50,14
5	24,69	50	23,12	49,79

Fonte: A autora, 2020.

Também foi feito comparativo com as contra flechas corrigidas e as determinadas em projeto. A comparação entre os valores finais das contra flechas com correções e das contra flechas de

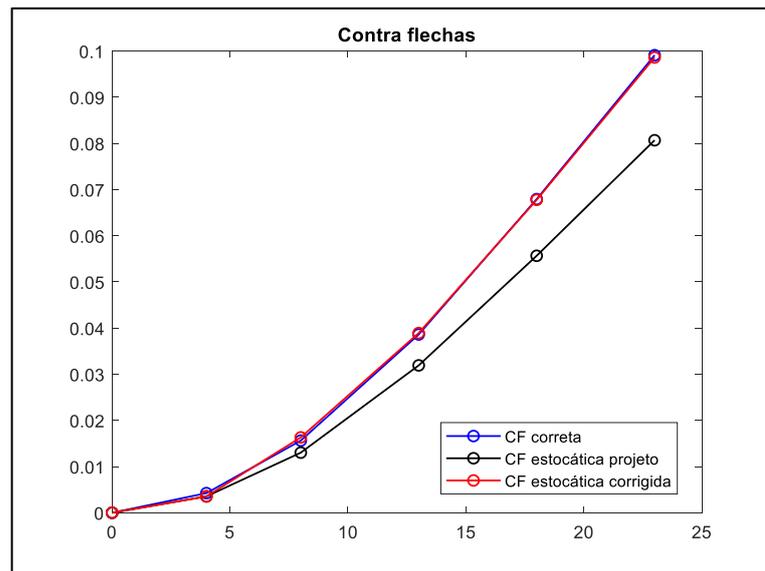
projeto, são apresentados na Tabela 30, assim como a configuração final das contra flechas está na Figura 72.

Tabela 30 – Contra flechas relativas de projeto e corrigidas para o caso B (cm)

	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6
Contra Flecha Projeto	$cf_{11} = 0,00$	$cf_{12} = - 0,35$	$cf_{23} = - 0,59$	$cf_{34} = - 0,71$	$cf_{45} = - 0,48$	$cf_{56} = - 0,13$
Procedimento proposto	$cf_{11} = 0,00$	$cf_{12} = - 0,35$	$cf_{23} = - 0,92$	$cf_{34} = - 0,66$	$cf_{45} = - 0,62$	$cf_{56} = - 0,20$

Fonte: A autora, 2020.

Figura 72 – Comparativo das contra flechas corrigida, projeto e correta do caso B.



Fonte: A autora, 2020.

Assim, como no caso A, a deformação residual corresponde à posição da aduela após a execução do último estágio de construção. Os resíduos com a execução das contra flecha de projeto e com as contra flechas pelo método proposto de correção são apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 – Deformações residuais para o caso B (cm)

	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6
Contra Flecha Projeto	$Z_{61} = 0,00$	$Z_{62} = 0,07$	$Z_{63} = 0,26$	$Z_{64} = 0,67$	$Z_{65} = 1,23$	$Z_{66} = 1,84$
Procedimento proposto	$Z_{61} = 0,00$	$Z_{62} = 0,07$	$Z_{63} = - 0,07$	$Z_{64} = - 0,03$	$Z_{65} = 0,02$	$Z_{66} = 0,05$

Fonte: A autora, 2020.

Na Tabela 32, o percentual da deformação residual, Z_{nj} , em relação à deformação acumulada total ocorrida na estrutura, Y_j , foi realizado da mesma forma do caso A, pois somente o procedimento proposto considera o efeito do tempo. Por isso, os resíduos da proposta

apresentam valores menores aos comparar com as correções de outros métodos que são determinísticos.

Tabela 32 – Comparação das deformações residuais com a deformação acumulada total para o caso B (%)

	Resíduo (%)					
	Nó 1	Nó 2	Nó 3	Nó 4	Nó 5	Nó 6
Contra Flecha Projeto	0,00	16,67	16,72	17,34	18,07	18,59
Procedimento proposto	0,00	16,67	4,41	0,81	0,24	0,50
SANTOS (2014)	0,00	7,69	8,47	4,55	1,26	0,10
OYAMADA (2004)	0,00	7,69	5,08	9,60	33,68	62,83

Fonte: A autora, 2020.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O estudo foi desenvolvido em etapas composta sempre de verificações. Assim, é possível obter conclusões e contribuições em cada fase do estudo.

- O código desenvolvido para o cálculo das deformações é facilmente aplicável, pois a entrada de dados é realizada com o preenchimento das informações em um arquivo em formato .xlsx. A validação apresentou bons resultados ao comparar com um programa comercial.
- Os resultados das análises realizadas demonstraram que o cálculo de deformações deve incluir as etapas construtivas e os efeitos diferidos no tempo, a fluência. Com isso, o problema foi aqui representado adequadamente.
- Em outra etapa do estudo, a consideração das incertezas nas variáveis possibilitou uma análise probabilística com as características de cada projeto e não com a aplicação de fatores de segurança “padrões” para o cálculo.
- Para definir a distribuição probabilística e o coeficiente de variação das variáveis, é recomendado utilizar as informações JCSS (2001). Porém a umidade relativa, RH, e a resistência à compressão do concreto, f_{ck} , que apresentam influência no cálculo das deformações (SANTOS, 2014), precisam ser bem caracterizadas.
- A umidade relativa, RH, varia com a região em que a estrutura será executada, por isso, a melhor maneira de considerar as incertezas dessa variável é o estudo de probabilidades, através da coleta de dados meteorológicos do local da obra.
- A resistência característica do concreto, f_{ck} , normalmente, utiliza a distribuição normal, mas para isso deve ser considerado controle rigoroso do processo de fabricação do material. Assim, o uso da lognormal permite definir parâmetros que caracterizam o concreto considerando a aleatoriedade na mistura do concreto.
- A utilização de uma simulação de Monte Carlo permite identificar os parâmetros que consideram a aplicação das incertezas no cálculo do coeficiente de fluência que, normalmente, é determinístico.
- Ao comparar o procedimento estocástico proposto com o método determinístico, as contra flechas de projeto da proposta são mais rígidas. Entretanto, com a execução da obra e o levantamento das deformações em campo, as contra flechas passam por alterações de maneira que o estudo da correção de contra flechas é importante.
- Durante o estudo da correção de contra flechas, a análise estocástica resultou em resíduos com menor valor na flexibilização da estrutura, totalizando na ordem de 2% da deformação total ocorrida na estrutura. Assim, quando as deformações são maiores, as contra flechas

aplicadas necessitam ser a favor da segurança, por isso, o método proposto é indicado para realizar as correções ao longo da execução.

- A correção de contra flechas e o uso das deformações ocorridas permite comparar os resultados com outros métodos, de forma que essa comparação é através do percentual da deformação residual com a deformação acumulada total, já que os demais métodos não consideram a fluência.
- O caso A do estudo comparativo com outros métodos apresentou que com o avanço da obra, as correções são melhores e o percentual dos resíduos menores. Nos primeiros nós o percentual é da ordem de 7% da deformação total da estrutura e os nós finais apresentaram resultados de 0,25%. Enquanto, os demais métodos apresentaram percentual de resíduos acima de 2%.
- O caso B também apresentou melhores resultados com a execução da obra, partindo de um percentual de resíduo de 4% até 0,50%. E ao comparar com outros métodos apresentou no geral resultado melhor, apenas pior no primeiro e último nós que o procedimento de SANTOS.
- Assim, o procedimento proposto em comparação com casos de outros estudos possui resultados dos resíduos menores do que os outros procedimentos de correção. Mostrando assim, a eficiência da metodologia proposta.

O estudo realizado fornece o procedimento de cálculo e correção de contra flechas, e também amplia as análises estatísticas das variáveis quando não são atendidas pelas recomendações do JCSS (2010). Assim, uma nova abordagem para a determinação da distribuição estatística do f_{ck} , através da compilação de trabalhos experimentais, e da umidade relativa, com o uso de dados de campo, poderá ser utilizado no avanço de pesquisas como:

- Inclusão de incerteza nas variáveis com a aplicação do estudo de confiabilidade para elaboração dos projetos na fase de análise e no dimensionamento estrutural, especialmente, em estruturas com estágio de construção e que necessitem de correções durante a execução.
- O uso do MMQ no processo de otimização foi utilizado, porém outras metodologias podem ser avaliadas para otimizar os resíduos com o uso das leituras de campo em busca de resultados cada vez melhor. Uma proposta é a utilização de Inferência Bayesiana.
- O cálculo do coeficiente de fluência foi baseado na norma CEB-FIP como em todo o estudo e sob recomendação do JCSS. Porém, existem outros modelos de fluência que podem ser avaliados para a aplicação de incertezas.

REFERÊNCIAS

- ALVES, B. S. **Otimização baseada em confiabilidade de pórticos de concreto armado**. 2018. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.
- ANG, A. H. S.; TANG, W. H. **Probability concepts in engineering planning and design: Decision, risk, and reliability**. v. 2. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- ARAUJO, J. M. **Curso de concreto armado**. v. 1. São Paulo: Dunas, 2014.
- ARORA, J. S. **Introduction to optimum design**. New York: Elsevier, 2004.
- BAZANT, Z. P. Prediction of concrete creep effects using age-adjusted effective. **Journal of the American Concrete Institute**, v. 69, n. 4, p. 212-217, 1972.
- _____; HUBLER, M. H.; YU, Q. Pervasiveness of excessive segmental bridge deflections: Wake-up call for creep. **ACI Structural Journal**, v. 108, n. 6, p. 766-774, 2011.
- BECK, A. T. **Curso de confiabilidade estrutural**. São Carlos: Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.
- BERGER, D.; STUCCHI, F. R.; HERNANDO, C.; RIBEIRO, C. F. **Executive control cable-stayed Bridge Octávio Frias de Oliveira**. FIB Symposium, 2009 - Concrete: 21st Century Superhero. Londres, 2009.
- _____; WAIMBERG, Marcelo.; STUCCHI, Fernando Rebouças. **Design and executive control of three curved box girder bridges in São Paulo**, 3rd fib International Congress and Exhibition– 2010. Washington, 2010.
- BUCHER, C. G. Adaptive sampling: an iterative fast Monte Carlo procedure. **Structural safety**, v. 5, n. 2, p. 119-126, 1988.
- CARDOSO, J. B.; ALMEIDA, J. R.; DIAS, J. M.; COELHO, P. G. Structural reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks. **Advances in Engineering Software**, v. 39, n. 6, p. 505-513, 2008
- CARROLL, L. **Alice no país das maravilhas**. São Paulo: L&PM Pocket, 1998.
- CHAPMAN, S. J. **Programação em MATLAB para engenheiros**. São Paulo: Pioneira, 2003.
- CEB-FIP. COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON, FÉDÉRATION INTERNATIONALE DE LA PRÉCONTRAİNTE. **CEB-FIP Model Code 1990. Design Code**. Lausanne: CEB, 1993.
- FARIA, R. **Trevo Anhanguera: método de balanços sucessivos viabilizou execução de parte da estrutura de viadutos sobre a Marginal do Tietê, na chegada da rodovia Anhanguera, em São Paulo**. **Revista Techne**, ano 17, n. 150, setembro 2009.

FURST, A. **Influência do lançamento estrutural na confiabilidade de vigas em concreto armado**. 2017, 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis: 2017.

GHALI, A.; FAVRE, R.; ELBADRY, M. **Concrete structures: stresses and deformations: analysis and design for serviceability**. Boca Raton: CRC Press, 2014a.

_____.; NEVILLE, A. M.; BROWN, T. G. **Structural analysis: a unified classical and matrix approach**. Boca Raton: CRC Press, 2014b.

GORZA, L. S. **Análise incremental construtiva de edifício metálicos de andares múltiplos usando o método dos elementos finitos**. 2000. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória: 2000.

HIGHAM, D. J.; HIGHAM, N. J. **MATLAB guide**. Siam, 2005.

JCSS, JCSS. **Probabilistic model code**. Joint Committee on Structural Safety, 2001.

JUNG, S. **Field calibration of time dependent behavior in segmental bridges using self-learning simulation**. 2004. Tese de Doutorado, University of Illinois at Urbana-Champaign - Graduate College of the Civil and Environmental Engineering, Illinois, 2004.

KRIPKA, M. **Análise incremental construtiva de edificações**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE. 1990.

KUPERMAN, S. C. Considerações sobre fluência de concretos. **Revista Techné**, v. 125, p. 58-63, 2007.

LAI, J.; WANG, W. **Study on pre-camber control for overpass bridge: Balanced Cantilever Bridge as an example**. 2010

LOGAN, D. L. **A first course in the finite element method**. 6^a ed: Cengage Learning, 2017.

Marquardt, D. W. **An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters**. SIAM Journal, 11, 431–441: 1963.

MARTHA, L. F. **Métodos básicos da análise de estruturas**. Rio de Janeiro: Campus, 2010.

MATHIVAT, J. **The cantilever construction of prestressed concrete bridges**. 3. ed. New York: A Wiley- Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc, 1983.

MATLAB. MATHWORKS, **Optimization Toolbox™ User's Guide**. Massachusetts: The MathWorks, Inc., 2019.

MELCHERS, R. E.; BECK, A. T. **Structural reliability analysis and prediction**. John Wiley & Sons, 2018.

MENN, Christian. **Prestressed Concrete Bridge**. Traduzido por: Paul Gauvreau. 1a ed. Boston: Basel, 1990.

MIDASOFT. **Getting Started – MIDAS/Civil**. Livonia: MIDASoft Inc., 2006.

MOTTA, R. S.; AFONSO, S. M. B. **An efficient procedure for structural reliability-based robust design optimization**. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, 54.3: 511-530.

MUSTAFFA, Z. **Developments in Reliability-Based Assessment of Corrosion**. In: *Developments in Corrosion Protection*. InTech, 2014.

Neville, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5^a ed. Bookman Editora, 2015.

OYAMADA, R. N. **Controle de Flecha e Adaptação por Fluência em Pontes Construídas pelo Método do Balanço Sucessivo**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Estruturas e Fundações. 2004.

PAIM, Oswaldo Duarte. **Projeto e Dimensionamento de Pontes em Balanços Sucessivos**. *Anais da Associação Brasileira de Pontes e Estruturas – Seminário de Concreto Protendido*. vol.1. Rio de Janeiro, 1983: 123-206.

PODOLNY JR, W.; MULLER, J. M. **Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges** (Wiley Series of Practical Construction Guides). 1982: 205-208 e 482-487.

SANTOS, M. F. L. O. **Projeto e Execução de Pontes em Balanços Sucessivos**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação de Engenharia Civil – Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

_____. **Procedimento adaptativo para controle de contra flechas durante a fase construtiva de estruturas em balanços sucessivos**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, 2014.

_____; RIBEIRO, P. M. V. **Programa para análise dos efeitos construtivos e fluência em estruturas reticuladas**. In: XXXVI Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Rio de Janeiro, 2015.

_____; AFONSO, S. M. B., MOTTA, R. S. **Calculation of camber control using creep deformation during the construction phase for a balanced cantilever method**. In: XL Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering, Natal, 2019.

SANTOS, D. M.; STUCCHI, F. R.; BECK, A. T. **Confiabilidade de vigas projetadas de acordo com as normas brasileiras**. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 7, n. 5, p. 723-746, 2014.

SAP2000. **COMPUTERS AND STRUCTURES, Getting Startes with SAP2000 Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Three-Dimensional Structures**. Berkeley: Computers and Structures, Inc., 2009.

SILVA, I. M., OYAMADA, R., ESA, S. T., & ISHITANI, H. **Efeito da deformação lenta sobre o comportamento em serviço**. In: *Ibracon*, Vitória, 2003.

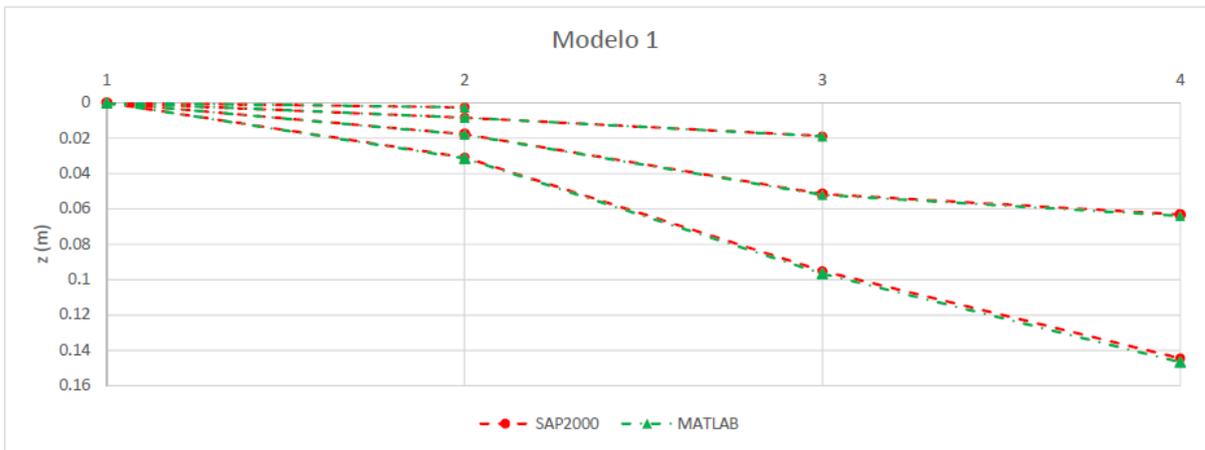
ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland–Preparo, controle, recebimento e aceitação–Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.

YU, Q.; BAZANT, Z. P.; WENDNER, R. **Improved algorithm for efficient and realistic creep analysis of large creep-sensitive concrete structures.** ACI Structural Journal, 2012, 109.5: 665.

ANEXO A – RESULTADOS DOS MODELOS DE VALIDAÇÃO DO PROGRAMA

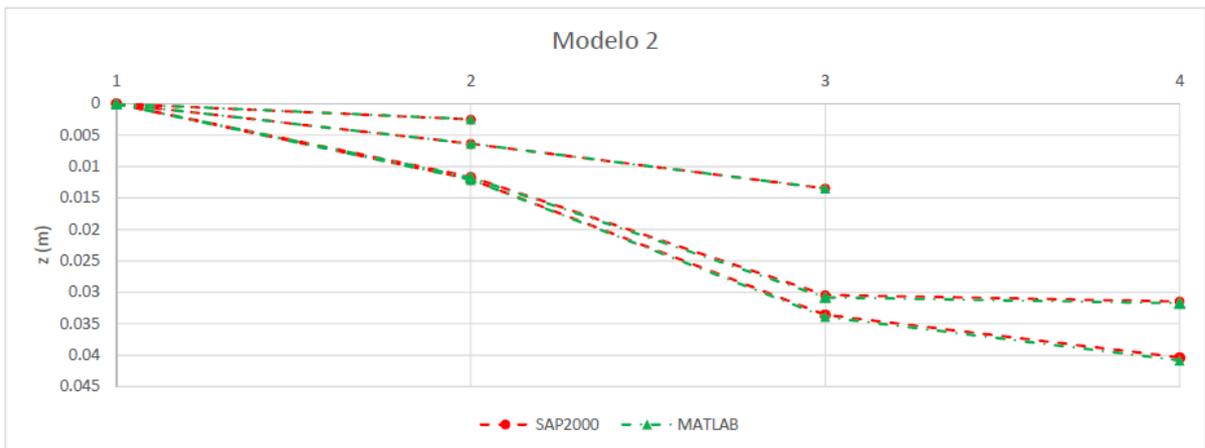
Validação: 1

Estágio	Idade (dia)	Programa	Nós							
			1	2	3	4				
1	0	SAP2000 (m)	0	0.001644						
		MATLAB (m)	0	0.001644						
		erro (%)	0.00	0.00						
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4				
1	10	SAP2000 (m)	0	0.002519						
		MATLAB (m)	0	0.002464						
		erro (%)	0.00	2.18						
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4				
2	10	SAP2000 (m)	0	0.006320	0.012286					
		MATLAB (m)	0	0.006332	0.012476					
		erro (%)	0.00	-0.19	-1.55					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4				
2	20	SAP2000 (m)	0	0.008351	0.018822					
		MATLAB (m)	0	0.008337	0.018881					
		erro (%)	0.00	0.17	-0.31					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4				
3	20	SAP2000 (m)	0	0.014361	0.039901	0.040832				
		MATLAB (m)	0	0.014527	0.040545	0.041878				
		erro (%)	0.00	-1.16	-1.61	-2.56				
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4				
3	30	SAP2000 (m)	0	0.017714	0.051516	0.063181				
		MATLAB (m)	0	0.017866	0.05209	0.064023				
		erro (%)	0.00	-0.86	-1.11	-1.33				
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4				
4	30	SAP2000 (m)	0	0.017714	0.051516	0.063181				
		MATLAB (m)	0	0.017866	0.05209	0.064023				
		erro (%)	0.00	-0.86	-1.11	-1.33				
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4				
4	10030	SAP2000 (m)	0	0.030819	0.095094	0.144447				
		MATLAB (m)	0	0.031303	0.096586	0.14662				
		erro (%)	0.00	-1.57	-1.57	-1.50				



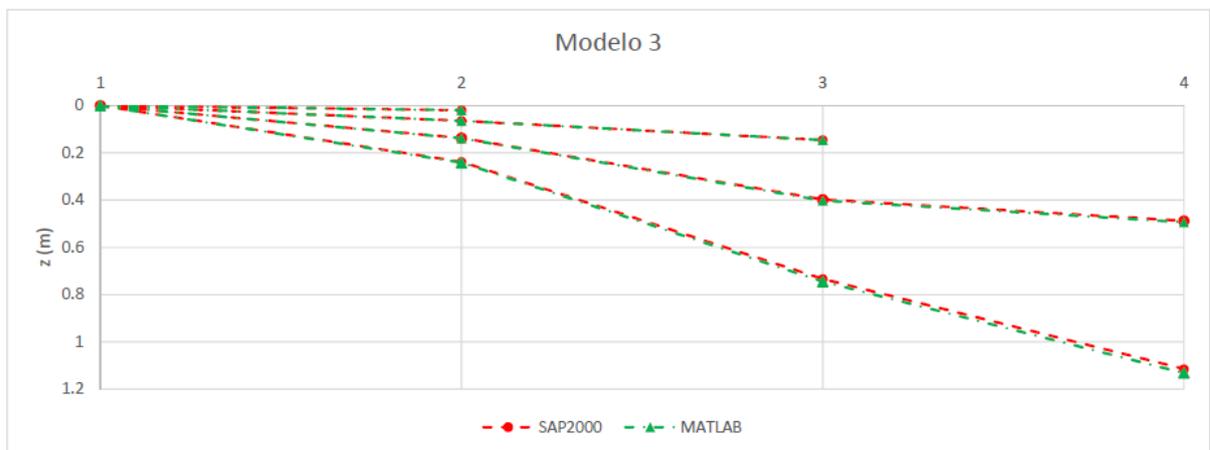
Validação: 2

			Nós								
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
1	0	SAP2000 (m)	0	0.001644							
		MATLAB (m)	0	0.001644							
		erro (%)	0.00	0.00							
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
1	10	SAP2000 (m)	0	0.002519							
		MATLAB (m)	0	0.002464							
		erro (%)	0.00	2.18							
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
2	10	SAP2000 (m)	0	0.004989	0.008676						
		MATLAB (m)	0	0.004978	0.008801						
		erro (%)	0.00	0.22	-1.44						
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
2	20	SAP2000 (m)	0	0.006379	0.013469						
		MATLAB (m)	0	0.006346	0.013477						
		erro (%)	0.00	0.52	-0.06						
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
3	20	SAP2000 (m)	0	0.009947	0.026269	0.025765					
		MATLAB (m)	0	0.010022	0.026631	0.026403					
		erro (%)	0.00	-0.75	-1.38	-2.48					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
3	20	SAP2000 (m)	0	0.009947	0.026269	0.025765					
		MATLAB (m)	0	0.010022	0.026631	0.026403					
		erro (%)	0.00	-0.75	-1.38	-2.48					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
3	30	SAP2000 (m)	0	0.012016	0.033604	0.040382					
		MATLAB (m)	0	0.012079	0.033911	0.040846					
		erro (%)	0.00	-0.52	-0.91	-1.15					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
4	30	SAP2000 (m)	0	0.008478	0.020922	0.015159					
		MATLAB (m)	0	0.008404	0.020758	0.014733					
		erro (%)	0.00	0.87	0.78	2.81					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
4	10030	SAP2000 (m)	0	0.011611	0.030422	0.031448					
		MATLAB (m)	0	0.011736	0.030798	0.031748					
		erro (%)	0.00	-1.08	-1.24	-0.95					



Validação: 3

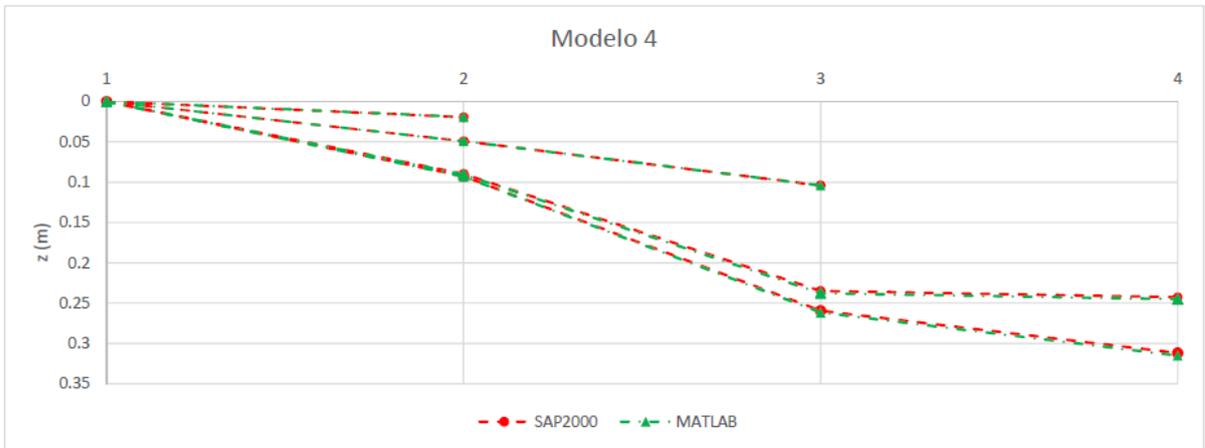
			Nós								
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
1	0	SAP2000 (m)	0	0.012686							
		MATLAB (m)	0	0.012686							
		erro (%)	0.00	0.00							
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
1	10	SAP2000 (m)	0	0.019435							
		MATLAB (m)	0	0.019011							
		erro (%)	0.00	2.18							
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
2	10	SAP2000 (m)	0	0.048762	0.094801						
		MATLAB (m)	0	0.048862	0.096267						
		erro (%)	0.00	-0.21	-1.55						
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
2	20	SAP2000 (m)	0	0.064435	0.145233						
		MATLAB (m)	0	0.064331	0.14569						
		erro (%)	0.00	0.16	-0.31						
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
3	20	SAP2000 (m)	0	0.110806	0.307876	0.315063					
		MATLAB (m)	0	0.112090	0.31285	0.32313					
		erro (%)	0.00	-1.16	-1.62	-2.56					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
3	20	SAP2000 (m)	0	0.110806	0.307876	0.315063					
		MATLAB (m)	0	0.112090	0.31285	0.32313					
		erro (%)	0.00	-1.16	-1.62	-2.56					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
3	30	SAP2000 (m)	0	0.136685	0.397497	0.48751					
		MATLAB (m)	0	0.137860	0.40193	0.49401					
		erro (%)	0.00	-0.86	-1.12	-1.33					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
4	30	SAP2000 (m)	0	0.136685	0.397497	0.48751					
		MATLAB (m)	0	0.137860	0.40193	0.49401					
		erro (%)	0.00	-0.86	-1.12	-1.33					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
4	10030	SAP2000 (m)	0	0.237803	0.733749	1.114561					
		MATLAB (m)	0	0.241540	0.74526	1.1313					
		erro (%)	0.00	-1.57	-1.57	-1.50					



Validação: 4

Estágio	Idade (dia)	Programa	Nós							
			1	2	3	4				
1	0	SAP2000 (m)	0	0.012686						
		MATLAB (m)	0	0.012686						
		erro (%)	0.00	0.00						
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4				
1	10	SAP2000 (m)	0	0.019435						
		MATLAB (m)	0	0.019011						
		erro (%)	0.00	2.18						
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4				
2	10	SAP2000 (m)	0	0.038497	0.066941					
		MATLAB (m)	0	0.038414	0.06791					
		erro (%)	0.00	0.22	-1.45					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4				
2	20	SAP2000 (m)	0	0.049219	0.103931					
		MATLAB (m)	0	0.048969	0.10399					
		erro (%)	0.00	0.51	-0.06					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4				
3	20	SAP2000 (m)	0	0.076752	0.202693	0.198808				
		MATLAB (m)	0	0.077327	0.20548	0.20373				
		erro (%)	0.00	-0.75	-1.37	-2.48				

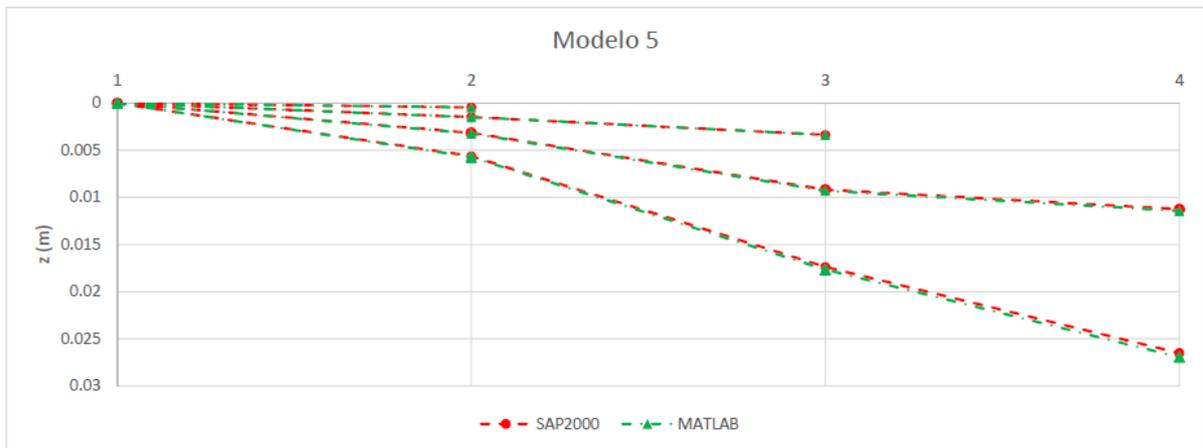
3	20	SAP2000 (m)	0	0.076752	0.202693	0.198808				
		MATLAB (m)	0	0.077327	0.20548	0.20373				
		erro (%)	0.00	-0.75	-1.37	-2.48				
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4				
3	30	SAP2000 (m)	0	0.092716	0.259291	0.311587				
		MATLAB (m)	0	0.093205	0.26166	0.31517				
		erro (%)	0.00	-0.53	-0.91	-1.15				
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4				
4	30	SAP2000 (m)	0	0.065420	0.161437	0.116971				
		MATLAB (m)	0	0.064848	0.16017	0.11368				
		erro (%)	0.00	0.87	0.78	2.81				
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4				
4	10030	SAP2000 (m)	0	0.089589	0.234735	0.242651				
		MATLAB (m)	0	0.090557	0.23764	0.24497				
		erro (%)	0.00	-1.08	-1.24	-0.96				



Validação: 5

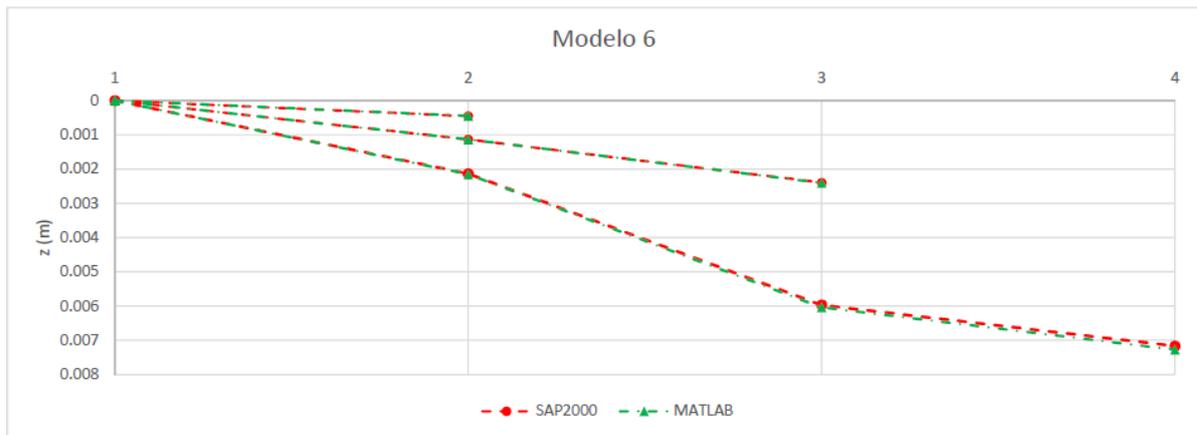
Estágio	Idade (dia)	Programa	Nós							
			1	2	3	4				
1	0	SAP2000 (m)	0	0.000326						
		MATLAB (m)	0	0.000326						
		erro (%)	0.00	0.00						
1	10	SAP2000 (m)	0	0.000449						
		MATLAB (m)	0	0.000441						
		erro (%)	0.00	1.78						
2	10	SAP2000 (m)	0	0.001203	0.002438					
		MATLAB (m)	0	0.001209	0.002475					
		erro (%)	0.00	-0.50	-1.52					
2	20	SAP2000 (m)	0	0.001488	0.003356					
		MATLAB (m)	0	0.001490	0.003375					
		erro (%)	0.00	-0.13	-0.57					
3	20	SAP2000 (m)	0	0.002681	0.007538	0.008102				
		MATLAB (m)	0	0.002719	0.007674	0.008309				
		erro (%)	0.00	-1.42	-1.80	-2.55				

3	20	SAP2000 (m)	0	0.002681	0.007538	0.008102				
		MATLAB (m)	0	0.002719	0.007674	0.008309				
		erro (%)	0.00	-1.42	-1.80	-2.55				
3	30	SAP2000 (m)	0	0.003153	0.009171	0.011244				
		MATLAB (m)	0	0.003188	0.009297	0.011423				
		erro (%)	0.00	-1.11	-1.37	-1.59				
4	30	SAP2000 (m)	0	0.003153	0.009171	0.011244				
		MATLAB (m)	0	0.003188	0.009297	0.011423				
		erro (%)	0.00	-1.11	-1.37	-1.59				
4	10030	SAP2000 (m)	0	0.005616	0.017352	0.026486				
		MATLAB (m)	0	0.005718	0.017661	0.026933				
		erro (%)	0.00	-1.82	-1.78	-1.69				



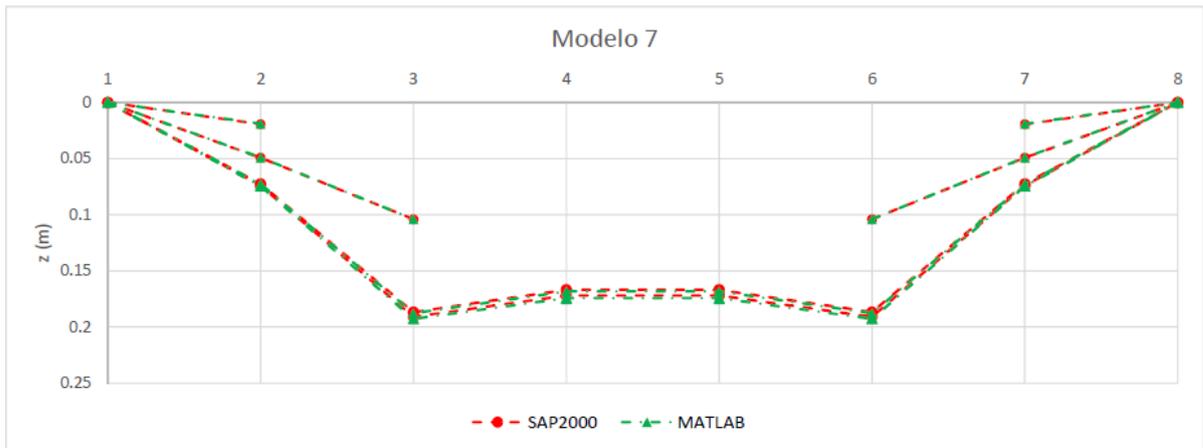
Validação: 6

			Nós								
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
1	0	SAP2000 (m)	0	0.000326							
		MATLAB (m)	0	0.000326							
		erro (%)	0.00	0.00							
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
1	10	SAP2000 (m)	0	0.000449							
		MATLAB (m)	0	0.000441							
		erro (%)	0.00	1.78							
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
2	10	SAP2000 (m)	0	0.000939	0.001721						
		MATLAB (m)	0	0.000940	0.001746						
		erro (%)	0.00	-0.11	-1.45						
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
2	20	SAP2000 (m)	0	0.001134	0.002395						
		MATLAB (m)	0	0.001132	0.002403						
		erro (%)	0.00	0.18	-0.33						
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
3	20	SAP2000 (m)	0	0.001842	0.004935	0.005112					
		MATLAB (m)	0	0.001862	0.005013	0.005239					
		erro (%)	0.00	-1.09	-1.58	-2.48					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
3	20	SAP2000 (m)	0	0.001842	0.004935	0.005112					
		MATLAB (m)	0	0.001862	0.005013	0.005239					
		erro (%)	0.00	-1.09	-1.58	-2.48					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
3	30	SAP2000 (m)	0	0.002134	0.005967	0.007168					
		MATLAB (m)	0	0.002151	0.006038	0.007271					
		erro (%)	0.00	-0.80	-1.19	-1.44					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
4	30	SAP2000 (m)	0	0.001432	0.003450	0.002164					
		MATLAB (m)	0	0.001422	0.003428	0.00209					
		erro (%)	0.00	0.70	0.64	3.42					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
4	10030	SAP2000 (m)	0	0.002111	0.005554	0.005848					
		MATLAB (m)	0	0.002141	0.005637	0.005916					
		erro (%)	0.00	-1.42	-1.49	-1.16					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
-	-	SAP2000 (m)	0	0.001554	0.005220	0.009844					
		MATLAB (m)	0	0.001554	0.005220	0.009844					
		erro (%)	0.00	0.00	0.00	0.00					



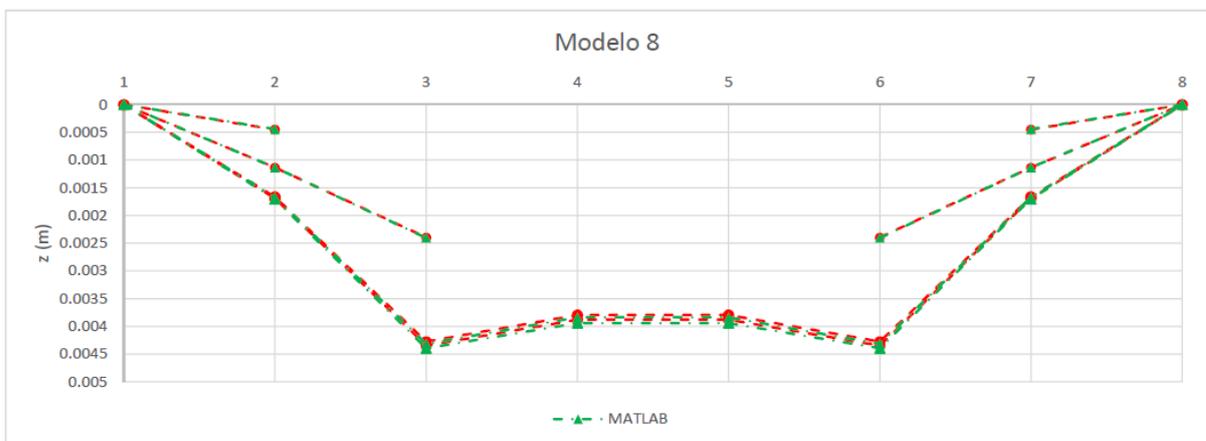
Validação: 7

Estágio	Idade (dia)	Programa	Nós								
			1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	SAP2000 (m)	0	0.012686					0.012686	0	
		MATLAB (m)	0	0.012686					0.012686	0	
		erro (%)	0.00	0.00					0.00	0.00	
1	10	SAP2000 (m)	0	0.019435					0.019435	0	
		MATLAB (m)	0	0.019011					0.019011	0	
		erro (%)	0.00	2.18					2.18	0	
2	10	SAP2000 (m)	0	0.038497	0.066941				0.066941	0.038497	0
		MATLAB (m)	0	0.038414	0.06791				0.06791	0.038414	0
		erro (%)	0.00	0.22	-1.45				-1.45	0.22	0
2	20	SAP2000 (m)	0	0.049219	0.103931				0.103931	0.049219	0
		MATLAB (m)	0	0.048969	0.10399				0.10399	0.048969	0
		erro (%)	0.00	0.51	-0.06				-0.06	0.51	0
3	20	SAP2000 (m)	0	0.062985	0.153312	0.100523	0.100523	0.153312	0.062985	0	
		MATLAB (m)	0	0.063148	0.15474	0.10298	0.102980	0.15474	0.063148	0	
		erro (%)	0.00	-0.26	-0.93	-2.44	-2.44	-0.93	-0.26	0	
3	30	SAP2000 (m)	0	0.072522	0.186706	0.166805	0.166805	0.186706	0.072522	0	
		MATLAB (m)	0	0.072648	0.18789	0.16829	0.168290	0.18789	0.072648	0	
		erro (%)	0.00	-0.17	-0.63	-0.89	-0.89	-0.63	-0.17	0	
4	30	SAP2000 (m)	0	0.072312	0.185863	0.164903	0.164903	0.185863	0.072312	0	
		MATLAB (m)	0	0.072435	0.18703	0.16637	0.166370	0.18703	0.072435	0	
		erro (%)	0.00	-0.17	-0.63	-0.89	-0.89	-0.63	-0.17	0	
4	40	SAP2000 (m)	0	0.074138	0.190933	0.172008	0.172008	0.190933	0.074138	0	
		MATLAB (m)	0	0.074442	0.19266	0.17441	0.174410	0.19266	0.074442	0	
		erro (%)	0.00	-0.41	-0.90	-1.40	-1.40	-0.90	-0.41	0	
5	40	SAP2000 (m)	0	0.074138	0.190933	0.172008	0.172008	0.190933	0.074138	0	
		MATLAB (m)	0	0.074442	0.19266	0.17441	0.174410	0.19266	0.074442	0	
		erro (%)	0.00	-0.41	-0.90	-1.40	-1.40	-0.90	-0.41	0	
5	10040	SAP2000 (m)	0	0.100966	0.266067	0.280955	0.280955	0.266067	0.100966	0	
		MATLAB (m)	0	0.102730	0.27199	0.28948	0.289480	0.27199	0.10273	0	
		erro (%)	0.00	-1.75	-2.23	-3.03	-3.03	-2.23	-1.75	0	



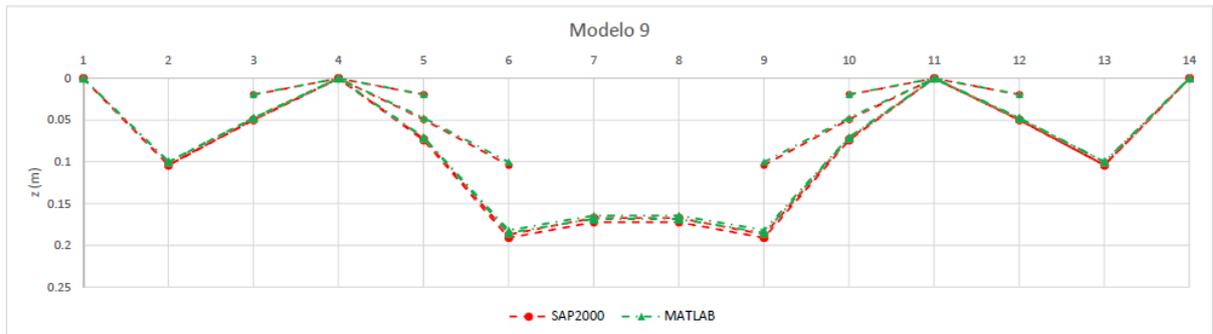
Validação: 8

Estágio	Idade (dia)	Programa	Nós							
			1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	SAP2000 (m)	0	0.000326					0.000326	0
		MATLAB (m)	0	0.000326					0.000326	0
		erro (%)	0.00	0.00					0.00	0.00
1	10	SAP2000 (m)	0	0.000449					0.000449	0
		MATLAB (m)	0	0.000441					0.000441	0
		erro (%)	0.00	1.78					1.78	0
2	10	SAP2000 (m)	0	0.000939	0.001721			0.001721	0.000939	0
		MATLAB (m)	0	0.000940	0.001746			0.001746	0.00094	0
		erro (%)	0.00	-0.11	-1.45			-1.45	-0.11	0
2	20	SAP2000 (m)	0	0.001134	0.002395			0.002395	0.001134	0
		MATLAB (m)	0	0.001132	0.002403			0.002403	0.001132	0
		erro (%)	0.00	0.18	-0.33			-0.33	0.18	0
3	20	SAP2000 (m)	0	0.001488	0.003665	0.002585	0.002585	0.003665	0.001488	0
		MATLAB (m)	0	0.001497	0.003708	0.002648	0.002648	0.003708	0.001497	0
		erro (%)	0.00	-0.60	-1.17	-2.44	-2.44	-1.17	-0.60	0
3	30	SAP2000 (m)	0	0.001663	0.004275	0.003795	0.003795	0.004275	0.001663	0
		MATLAB (m)	0	0.001671	0.004314	0.003841	0.003841	0.004314	0.001671	0
		erro (%)	0.00	-0.48	-0.91	-1.21	-1.21	-0.91	-0.48	0
4	30	SAP2000 (m)	0	0.001657	0.004253	0.003746	0.003746	0.004253	0.001657	0
		MATLAB (m)	0	0.001665	0.004292	0.003792	0.003792	0.004292	0.001665	0
		erro (%)	0.00	-0.48	-0.92	-1.23	-1.23	-0.92	-0.48	0
4	40	SAP2000 (m)	0	0.001691	0.004348	0.003879	0.003879	0.004348	0.001691	0
		MATLAB (m)	0	0.001703	0.004397	0.003941	0.003941	0.004397	0.001703	0
		erro (%)	0.00	-0.71	-1.13	-1.60	-1.60	-1.13	-0.71	0
5	40	SAP2000 (m)	0	0.001691	0.004348	0.003879	0.003879	0.004348	0.001691	0
		MATLAB (m)	0	0.001703	0.004397	0.003941	0.003941	0.004397	0.001703	0
		erro (%)	0.00	-0.71	-1.13	-1.60	-1.60	-1.13	-0.71	0
5	10040	SAP2000 (m)	0	0.002364	0.006228	0.006603	0.006603	0.006228	0.002364	0
		MATLAB (m)	0	0.002412	0.006382	0.006818	0.006818	0.006382	0.002412	0
		erro (%)	0.00	-2.03	-2.47	-3.26	-3.26	-2.47	-2.03	0



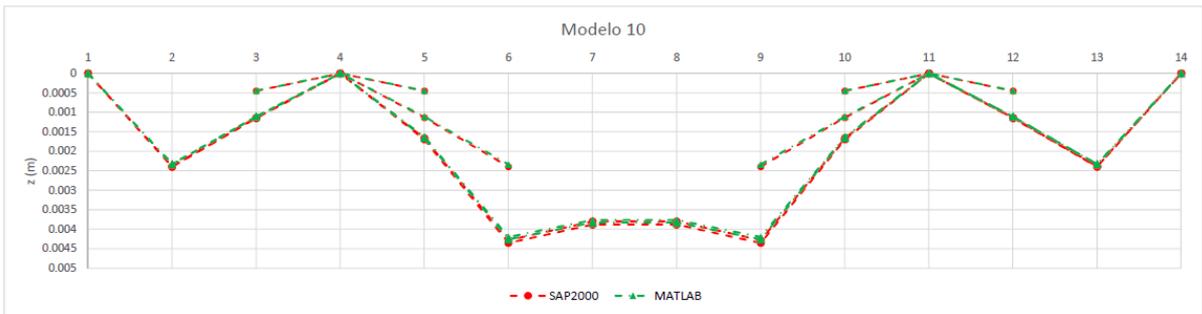
Validação: 9

Estágio	Idade (dia)	Programa	Nós														
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	0	SAP2000 (m)			0.012686	0	0.012686					0.012686	0	0.012686			
		MATLAB (m)			0.012686	0	0.012686					0.012686	0	0.012686			
		erro (%)			0.00	0.00	0.00					0.00	0.00	0.00			
1	10	SAP2000 (m)			0.019435	0	0.019435					0.019435	0	0.019435			
		MATLAB (m)			0.019011	0	0.019011					0.019011	0	0.019011			
		erro (%)			2.18	0.00	2.18					2.18	0.00	2.18			
2	10	SAP2000 (m)		0.066941	0.038497	0	0.038497	0.066941			0.066941	0.038497	0	0.038497	0.066941		
		MATLAB (m)		0.067910	0.038414	0	0.038414	0.06791			0.06791	0.038414	0	0.038414	0.06791		
		erro (%)		-1.45	0.22	0.00	0.22	-1.45			-1.45	0.22	0.00	0.22	-1.44754		
2	20	SAP2000 (m)		0.103931	0.049219	0	0.049219	0.103931			0.103931	0.049219	0	0.049219	0.103931		
		MATLAB (m)		0.100210	0.04754	0	0.047540	0.10021			0.10021	0.047540	0	0.04754	0.10021		
		erro (%)		3.58	3.41	0.00	3.41	3.58			3.58	3.41	0.00	3.41	3.58026		
3	20	SAP2000 (m)		0	0.103596	0.049298	0	0.062985	0.153312	0.100523	0.100523	0.153312	0.062985	0	0.049298	0.103596	0
		MATLAB (m)		0	0.099878	0.047623	0	0.061719	0.15096	0.10298	0.10298	0.15096	0.061719	0	0.047623	0.099878	0
		erro (%)		0.00	3.59	3.40	0.00	2.01	1.53	-2.44	-2.44422	1.53	2.01	0.00	3.40	3.588942	0
3	30	SAP2000 (m)		0	0.103727	0.049574	0	0.072522	0.186706	0.166805	0.166805	0.186706	0.072522	0	0.049574	0.103727	0
		MATLAB (m)		0	0.099799	0.047624	0	0.070253	0.18154	0.16414	0.16414	0.18154	0.070253	0	0.047624	0.099799	0
		erro (%)		0.00	3.79	3.93	0.00	3.13	2.77	1.60	1.597674	2.77	3.13	0.00	3.93	3.786864	0
4	30	SAP2000 (m)		0	0.103727	0.049574	0	0.072312	0.185863	0.164903	0.164903	0.185863	0.072312	0	0.049574	0.103727	0
		MATLAB (m)		0	0.099799	0.047624	0	0.070039	0.18069	0.16222	0.16222	0.18069	0.070039	0	0.047624	0.099799	0
		erro (%)		0.00	3.79	3.93	0.00	3.14	2.78	1.63	1.627017	2.78	3.14	0.00	3.93	3.786864	0
4	40	SAP2000 (m)		0	0.103891	0.049741	0	0.074138	0.190933	0.172008	0.172008	0.190933	0.074138	0	0.049741	0.103891	0
		MATLAB (m)		0	0.099826	0.047609	0	0.071422	0.18489	0.16836	0.16836	0.18489	0.071422	0	0.047609	0.099826	0
		erro (%)		0.00	3.91	4.29	0.00	3.66	3.16	2.12	2.120832	3.16	3.66	0.00	4.29	3.912755	0
5	40	SAP2000 (m)		0	0.103891	0.049741	0	0.074138	0.190933	0.172008	0.172008	0.190933	0.074138	0	0.049741	0.103891	0
		MATLAB (m)		0	0.099826	0.047609	0	0.071422	0.18489	0.16836	0.16836	0.18489	0.071422	0	0.047609	0.099826	0
		erro (%)		0.00	3.91	4.29	0.00	3.66	3.16	2.12	2.120832	3.16	3.66	0.00	4.29	3.912755	0
5	10040	SAP2000 (m)		0	0.106723	0.052554	0	0.100966	0.266067	0.280955	0.280955	0.266067	0.100966	0	0.052554	0.106723	0
		MATLAB (m)		0	0.100340	0.047375	0	0.089497	0.24104	0.25338	0.25338	0.24104	0.089497	0	0.047375	0.10034	0
		erro (%)		0.00	5.98	9.85	0.00	11.36	9.41	9.81	9.814739	9.41	11.36	0.00	9.85	5.980904	0



Validação: 10

Estágio	Idade (dia)	Programa	Nós													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	0	SAP2000 (m)			0.000326	0	0.000326					0.000326	0	0.000326		
		MATLAB (m)			0.000326	0	0.000326					0.000326	0	0.000326		
		erro (%)			0.00	0.00	0.00					0.00	0.00	0.00		
1	10	SAP2000 (m)			0.000449	0	0.000449					0.000449	0	0.000449		
		MATLAB (m)			0.000441	0	0.000441					0.000441	0	0.000441		
		erro (%)			1.78	0.00	1.78					1.78	0.00	1.78		
2	10	SAP2000 (m)		0.001721	0.000939	0	0.000939	0.001721				0.001721	0.000939	0	0.000939	0.001721
		MATLAB (m)		0.001746	0.00094	0	0.000940	0.001746				0.001746	0.000940	0	0.00094	0.001746
		erro (%)		-1.45	-0.11	0.00	-0.11	-1.45				-1.45	-0.11	0.00	-0.11	-1.452644
2	20	SAP2000 (m)		0.002395	0.001134	0	0.001134	0.002395				0.002395	0.001134	0	0.001134	0.002395
		MATLAB (m)		0.002334	0.001106	0	0.001106	0.002334				0.002334	0.001106	0	0.001106	0.002334
		erro (%)		2.55	2.47	0.00	2.47	2.55				2.55	2.47	0.00	2.47	2.546973
3	20	SAP2000 (m)	0	0.002386	0.001136	0	0.001488	0.003665	0.002585	0.002585	0.003665	0.001488	0	0.001136	0.002386	0
		MATLAB (m)	0	0.002325	0.001108	0	0.001471	0.003638	0.002648	0.002648	0.003638	0.001471	0	0.001108	0.002325	0
		erro (%)	0.00	2.56	2.46	0.00	1.14	0.74	-2.44	-2.437137	0.74	1.14	0.00	2.46	2.55658	0
3	30	SAP2000 (m)	0	0.002389	0.001142	0	0.001663	0.004275	0.003795	0.003795	0.004275	0.001663	0	0.001142	0.002389	0
		MATLAB (m)	0	0.002324	0.001108	0	0.001626	0.004197	0.003764	0.003764	0.004197	0.001626	0	0.001108	0.002324	0
		erro (%)	0.00	2.72	2.98	0.00	2.22	1.82	0.82	0.816864	1.82	2.22	0.00	2.98	2.720804	0
4	30	SAP2000 (m)	0	0.002389	0.001142	0	0.001657	0.004253	0.003746	0.003746	0.004253	0.001657	0	0.001142	0.002389	0
		MATLAB (m)	0	0.002324	0.001108	0	0.001621	0.004175	0.003715	0.003715	0.004175	0.001621	0	0.001108	0.002324	0
		erro (%)	0.00	2.72	2.98	0.00	2.17	1.83	0.83	0.827549	1.83	2.17	0.00	2.98	2.720804	0
4	40	SAP2000 (m)	0	0.002392	0.001145	0	0.001691	0.004348	0.003879	0.003879	0.004348	0.001691	0	0.001145	0.002392	0
		MATLAB (m)	0	0.002324	0.001108	0	0.001647	0.004253	0.003828	0.003828	0.004253	0.001647	0	0.001108	0.002324	0
		erro (%)	0.00	2.84	3.23	0.00	2.60	2.18	1.31	1.314772	2.18	2.60	0.00	3.23	2.842809	0
5	40	SAP2000 (m)	0	0.002392	0.001145	0	0.001691	0.004348	0.003879	0.003879	0.004348	0.001691	0	0.001145	0.002392	0
		MATLAB (m)	0	0.002324	0.001108	0	0.001647	0.004253	0.003828	0.003828	0.004253	0.001647	0	0.001108	0.002324	0
		erro (%)	0.00	2.84	3.23	0.00	2.60	2.18	1.31	1.314772	2.18	2.60	0.00	3.23	2.842809	0
5	10040	SAP2000 (m)	0	0.002464	0.001216	0	0.002364	0.006228	0.006603	0.006603	0.006228	0.002364	0	0.001216	0.002464	0
		MATLAB (m)	0	0.002337	0.001102	0	0.002096	0.005943	0.005943	0.005943	0.005943	0.002096	0	0.001102	0.002337	0
		erro (%)	0.00	5.15	9.38	0.00	11.34	9.28	10.00	9.95457	9.28	11.34	0.00	9.38	5.154221	0



ANEXO B - RESULTADOS DOS MODELOS DE VALIDAÇÃO PARA AI E FLUÊNCIA

Validação: 6

Estágio	Idade (dia)	Programa	Nós								
			1	2	3	4					
1	0	AI Simples (m)	0	0.000326							
		AI Fluência (m)	0	0.000326							
		erro (%)	0.00	0.00							
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
1	10	AI Simples (m)	0	0.000326							
		AI Fluência (m)	0	0.000441							
		erro (%)	0.00	-35.18							
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
2	10	AI Simples (m)	0	0.000825	0.001746						
		AI Fluência (m)	0	0.000940	0.001746						
		erro (%)	0.00	-12.22	0.01						
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
2	20	AI Simples (m)	0	0.000825	0.001746						
		AI Fluência (m)	0	0.001139	0.002414						
		erro (%)	0.00	-38.04	-38.24						
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
3	20	AI Simples (m)	0	0.001554	0.004356	0.005239					
		AI Fluência (m)	0	0.001862	0.005013	0.005239					
		erro (%)	0.00	-16.52	-13.11	-0.01					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
3	30	AI Simples (m)	0	0.001554	0.004356	0.005239					
		AI Fluência (m)	0	0.002151	0.006038	0.007271					
		erro (%)	0.00	-38.38	-38.61	-38.79					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
4	30	AI Simples (m)	0	0.001554	0.004356	0.005239					
		AI Fluência (m)	0	0.001422	0.003428	0.00209					
		erro (%)	0.00	8.52	21.30	60.10					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
4	10030	AI Simples (m)	0	0.001554	0.004356	0.005239					
		AI Fluência (m)	0	0.002141	0.005637	0.005916					
		erro (%)	0.00	-37.74	-29.41	-12.93					
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4					
-	-	AI Simples (m)	0	0.001554	0.004356	0.005239					
		Única (m)	0	0.001554	0.005220	0.009844					
		erro (%)	0.00	0.00	-19.83	-87.91					

Validação: 8

			Nós							
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	AI Simples (m)	0	0.000326					0.000326	0
		AI Fluência (m)	0	0.000326					0.000326	0
		erro (%)	0.00	0.00					0.00	0.00
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4	5	6	7	8
1	10	AI Simples (m)	0	0.000326					0.000326	0
		AI Fluência (m)	0	0.000441					0.000441	0
		erro (%)	0.00	-35.28					-35.28	0
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4	5	6	7	8
2	10	AI Simples (m)	0	0.000825	0.001746			0.001746	0.000825	0
		AI Fluência (m)	0	0.000940	0.001746			0.001746	0.00094	0
		erro (%)	0.00	-12.23	0.00			0.00	-12.23	0
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4	5	6	7	8
2	20	AI Simples (m)	0	0.000825	0.001746			0.001746	0.000825	0
		AI Fluência (m)	0	0.001132	0.002403			0.002403	0.001132	0
		erro (%)	0.00	-37.21	-37.63			-37.63	-37.21	0
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4	5	6	7	8
3	20	AI Simples (m)	0	0.001190	0.003051	0.002648	0.002648	0.003051	0.00119	0
		AI Fluência (m)	0	0.001497	0.003708	0.002648	0.002648	0.003708	0.001497	0
		erro (%)	0.00	-20.51	-17.72	0.00	0.00	-17.72	-20.51	0
3	30	AI Simples (m)	0	0.001190	0.003051	0.002648	0.002648	0.003051	0.00119	0
		AI Fluência (m)	0	0.001671	0.004314	0.003841	0.003841	0.004314	0.001671	0
		erro (%)	0.00	-40.42	-41.40	-45.05	-45.05	-41.40	-40.42	0
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4	5	6	7	8
4	30	AI Simples (m)	0	0.001184	0.003029	0.002599	0.002599	0.003029	0.001184	0
		AI Fluência (m)	0	0.001665	0.004292	0.003792	0.003792	0.004292	0.001665	0
		erro (%)	0.00	-28.89	-29.43	-31.46	-31.46	-29.43	-28.89	0
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4	5	6	7	8
4	40	AI Simples (m)	0	0.001184	0.003029	0.002599	0.002599	0.003029	0.001184	0
		AI Fluência (m)	0	0.001703	0.004397	0.003941	0.003941	0.004397	0.001703	0
		erro (%)	0.00	-43.83	-45.16	-51.64	-51.64	-45.16	-43.83	0
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4	5	6	7	8
5	40	AI Simples (m)	0	0.001184	0.003029	0.002599	0.002599	0.003029	0.001184	0
		AI Fluência (m)	0	0.001703	0.004397	0.003941	0.003941	0.004397	0.001703	0
		erro (%)	0.00	-30.48	-31.11	-34.05	-34.05	-31.11	-30.48	0
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4	5	6	7	8
5	10040	AI Simples (m)	0	0.001184	0.003029	0.002599	0.002599	0.003029	0.001184	0
		AI Fluência (m)	0	0.002412	0.006382	0.006818	0.006818	0.006382	0.002412	0
		erro (%)	0.00	-103.72	-110.70	-162.33	-162.33	-110.70	-103.72	0
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4	5	6	7	8
-	-	AI Simples (m)	0	0.001184	0.003029	0.002599	0.002599	0.003029	0.001184	0
		Única (m)	0	0.000691	0.001919	0.002763	0.002763	0.001919	0.000691	0
		erro (%)	0.00	41.64	36.65	-6.31	-6.31	36.65	41.64	0

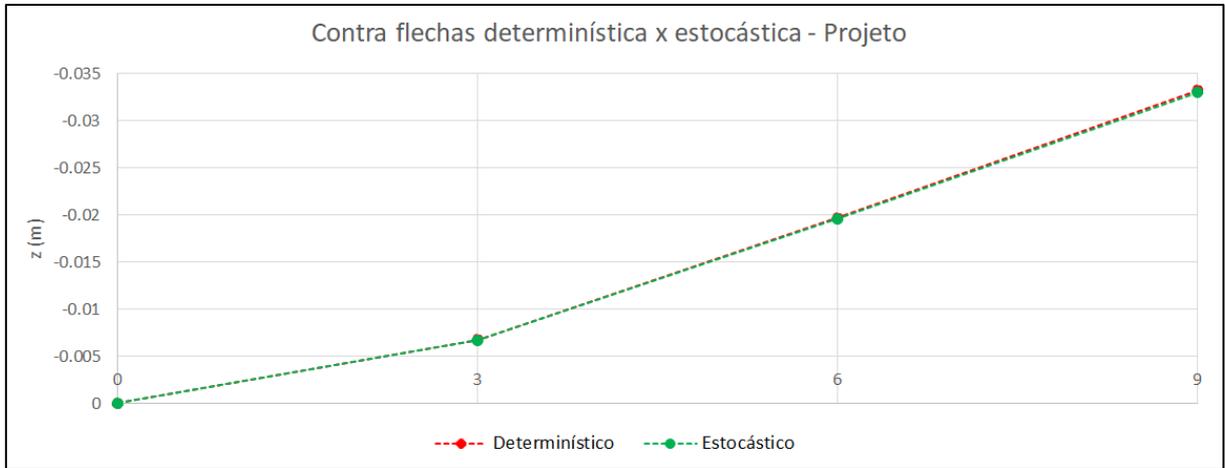
Validação: 10

		Nós															
Estágio	Idade (dia)	Programa	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	0	Programa															
		AI Simples (m)			0.000326	0	0.000326						0.000326	0	0.000326		
		AI Fluência (m)			0.000326	0	0.000326						0.000326	0	0.000326		
		erro (%)			0.00	0.00	0.00					0.00	0.00	0.00			
2	10	Programa															
		AI Simples (m)			0.000326	0	0.000326						0.000326	0	0.000326		
		AI Fluência (m)			0.000441	0	0.000441						0.000441	0	0.000441		
		erro (%)			-35.28	0.00	-35.28					-35.28	0.00	-35.28			
3	20	Programa															
		AI Simples (m)		0.001746	0.000825	0	0.000825	0.001746				0.001746	0.000825	0	0.000825	0.001746	
		AI Fluência (m)		0.001746	0.00094	0	0.000940	0.001746				0.001746	0.000940	0	0.00094	0.001746	
		erro (%)		0.00	-12.23	0.00	-12.23	0.00				0.00	-12.23	0.00	-12.23	0	
4	30	Programa															
		AI Simples (m)		0.001738	0.000827	0	0.000827	0.001738				0.001738	0.000827	0	0.000827	0.001738	0
		AI Fluência (m)		0.002324	0.001108	0	0.001108	0.002324				0.002324	0.001108	0	0.001108	0.002324	0
		erro (%)	0.00	-25.22	-25.36	0.00	-26.96	-27.45	-30.04	-30.04038	-27.45	-26.96	0.00	-25.36	-25.21515	0	
5	40	Programa															
		AI Simples (m)		0.001738	0.000827	0	0.000827	0.001738				0.001738	0.000827	0	0.000827	0.001738	0
		AI Fluência (m)		0.002324	0.001108	0	0.001108	0.002324				0.002324	0.001108	0	0.001108	0.002324	0
		erro (%)	0.00	-33.72	-33.98	0.00	-39.10	-40.41	-47.29	-47.28742	-40.41	-39.10	0.00	-33.98	-33.71692	0	
6	10040	Programa															
		AI Simples (m)		0.001738	0.000827	0	0.000827	0.001738				0.001738	0.000827	0	0.000827	0.001738	0
		AI Fluência (m)		0.002337	0.001102	0	0.001102	0.002337				0.002337	0.001102	0	0.001102	0.002337	0
		erro (%)	0.00	-34.46	-33.25	0.00	-77.03	-86.53	-128.66	-128.6649	-86.53	-77.03	0.00	-33.25	-34.4649	0	
-	-	Programa															
		AI Simples (m)		0.001738	0.000827	0.000000	0.001184	0.003029	0.002599	0.002599	0.003029	0.001184	0	0.000827	0.001738	0	0
		Única (m)		0.000077	0.000077	0.000000	0.000691	0.001919	0.002763	0.002763	0.001919	0.000691	0	0.000077	0.000077	0	0
		erro (%)	0.00	95.57	90.69	0.00	41.64	36.65	-6.31	-6.310119	36.65	41.64	0.00	90.69	95.56962	0	

ANEXO C - VERIFICAÇÃO DO CÁLCULO DE CONTRA FLECHA ESTOCÁSTICO

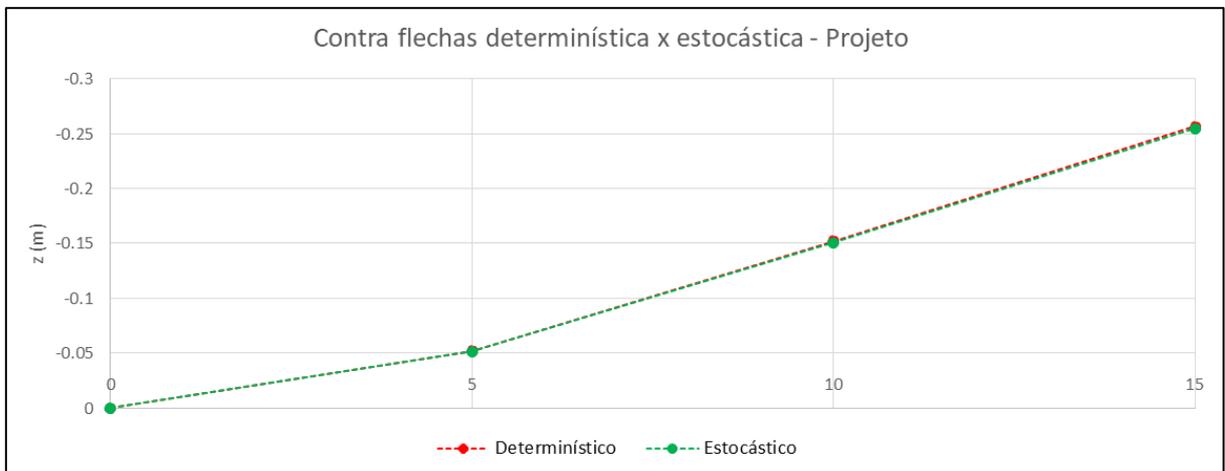
CONTRA FLECHA: MODELO 1

Variáveis	Nós (m)			
	1	2	3	4
Determinístico (D)	0,00	-0,006751	-0,019717	-0,033238
Estocástico (E)	0,00	-0,006710	-0,019575	-0,033014
Taxa D/E (%)	0,00	100,61	100,73	100,68



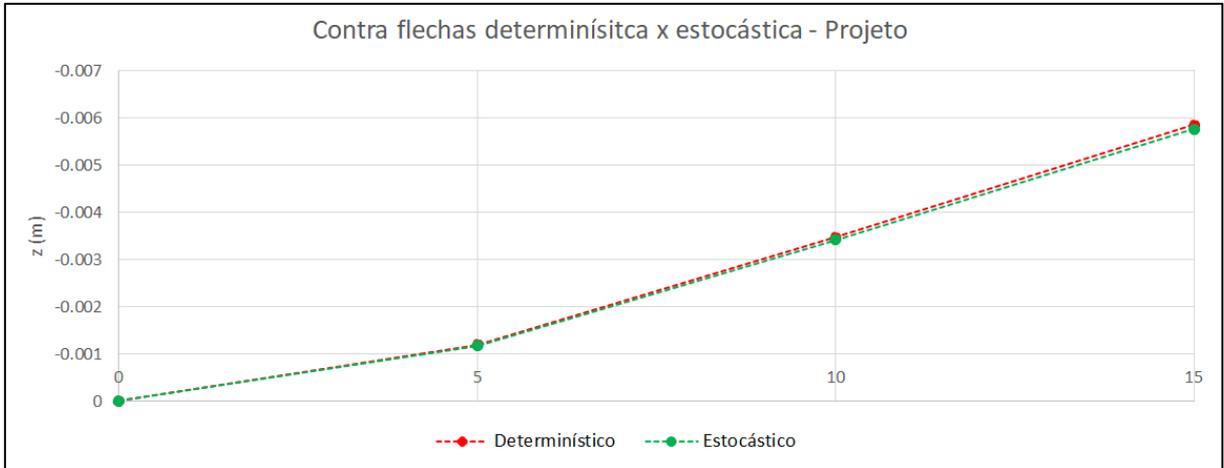
CONTRA FLECHA: MODELO 2

Variáveis	Nós (m)			
	1	2	3	4
Determinístico (D)	0,00	-0,052091	-0,152136	-0,256461
Estocástico (E)	0,00	-0,051640	-0,150818	-0,254435
Taxa D/E (%)	0,00	100,87	100,87	100,80



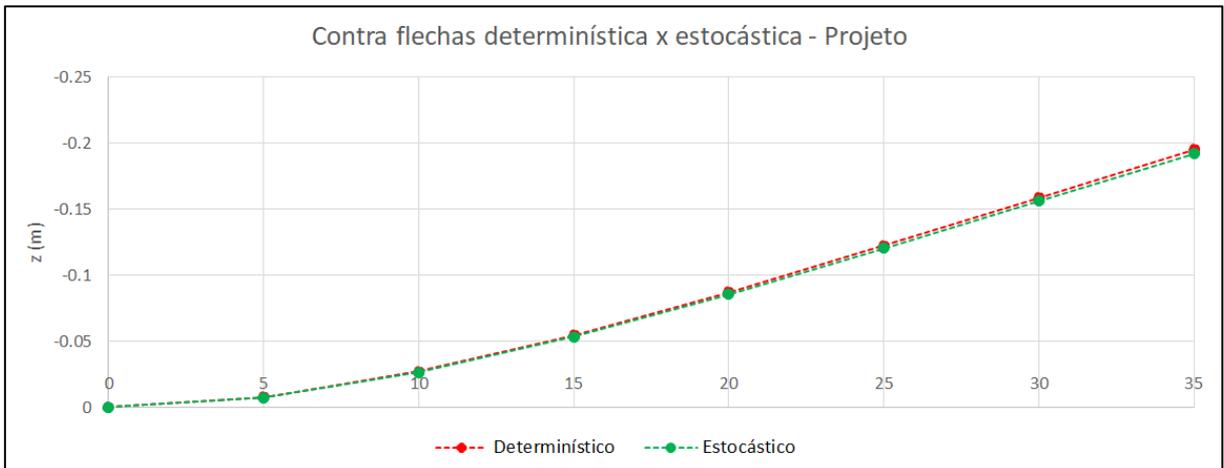
CONTRA FLECHA: MODELO 3

Variáveis	Nós (m)			
	1	2	3	4
Determinístico (D)	0,00	-0,001190	-0,003473	-0,005851
Estocástico (E)	0,00	-0,001172	-0,003420	-0,005764
Taxa D/E (%)	0,00	101,54	101,55	101,51



CONTRA FLECHA: MODELO 3A

Variáveis	Nós (m)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Determinístico (D)	0,00	-0,007495	-0,026845	-0,054327	-0,086912	-0,122256	-0,158693	-0,195225
Estocástico (E)	0,00	-0,007370	-0,026404	-0,053434	-0,085505	-0,120266	-0,156095	-0,192016
Taxa D/E (%)	0,00	101,70	101,67	101,67	101,65	101,65	101,66	101,67



ANEXO D – DADOS DAS LEITURAS DE CAMPO

MODELO 1 (m)

CASO 1					CASO 2				
Pontos de leitura					Pontos de leitura				
Estágio	1	2	3	4	Estágio	1	2	3	4
1	0	0.002170	0.000000	0.000000	1	0	0.002058	0.000000	0.000000
2	0	0.005654	0.012304	0.000000	2	0	0.005364	0.012039	0.000000
3	0	0.006027	0.013541	0.002623	3	0	0.005740	0.013364	0.002749
4					4	0	0.005920	0.014118	0.004426
5					5				
6					6				

CASO 3					CASO 4				
Pontos de leitura					Pontos de leitura				
Estágio	1	2	3	4	Estágio	1	2	3	4
1	0	0.002668	0.000000	0.000000	1	0	0.002554	0.000000	0.000000
2	0	0.006936	0.014496	0.000000	2	0	0.006644	0.014338	0.000000
3	0	0.007382	0.016062	0.003154	3	0	0.007111	0.015977	0.003410
4	0	0.007668	0.016968	0.004786	4	0	0.007386	0.016923	0.005192
5					5				
6					6				

MODELO 2 (m)

CASO 1					CASO 2				
Pontos de leitura					Pontos de leitura				
Estágio	1	2	3	4	Estágio	1	2	3	4
1	0	0.016777	0.000000	0.000000	1	0	0.015886	0.000000	0.000000
2	0	0.043622	0.094745	0.000000	2	0	0.041446	0.092723	0.000000
3	0	0.046582	0.104280	0.020191	3	0	0.044255	0.103110	0.021442
4					4				
5					5				
6					6				

CASO 3					CASO 4				
Pontos de leitura					Pontos de leitura				
Estágio	1	2	3	4	Estágio	1	2	3	4
1	0	0.020606	0.000000	0.000000	1	0	0.019751	0.000000	0.000000
2	0	0.053521	0.111670	0.000000	2	0	0.051192	0.110290	0.000000
3	0	0.057101	0.123770	0.024308	3	0	0.054968	0.123350	0.026254
4					4				
5					5				
6					6				

MODELO 3 (m)

CASO 1					CASO 2				
Pontos de leitura					Pontos de leitura				
Estágio	1	2	3	4	Estágio	1	2	3	4
1	0	0.000394	0.000000	0.000000	1	0	0.000386	0.000000	0.000000
2	0	0.001011	0.002176	0.000000	2	0	0.000989	0.002181	0.000000
3	0	0.001067	0.002355	0.000394	3	0	0.001047	0.002368	0.000434
4					4				
5					5				
6					6				
CASO 3					CASO 4				
Pontos de leitura					Pontos de leitura				
Estágio	1	2	3	4	Estágio	1	2	3	4
1	0	0.000452	0.000000	0.000000	1	0	0.000441	0.000000	0.000000
2	0	0.001161	0.002440	0.000000	2	0	0.001131	0.002432	0.000000
3	0	0.001229	0.002652	0.000443	3	0	0.001200	0.002652	0.000483
4					4				
5					5				
6					6				

MODELO 3A – CASO 1 (m)

Pontos de leitura								
Estágio	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0.000405	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0	0.001034	0.002182	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	0	0.001962	0.005510	0.006660	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0	0.003228	0.010119	0.015980	0.014814	0.000000	0.000000	0.000000
5	0	0.004735	0.015741	0.027854	0.034344	0.028068	0.000000	0.000000
6	0	0.006604	0.022777	0.042452	0.058648	0.063089	0.047294	0.000000
7	0	0.006828	0.023558	0.044155	0.061980	0.067813	0.053141	0.007320
8								
9								
10								
11								
12								
13								

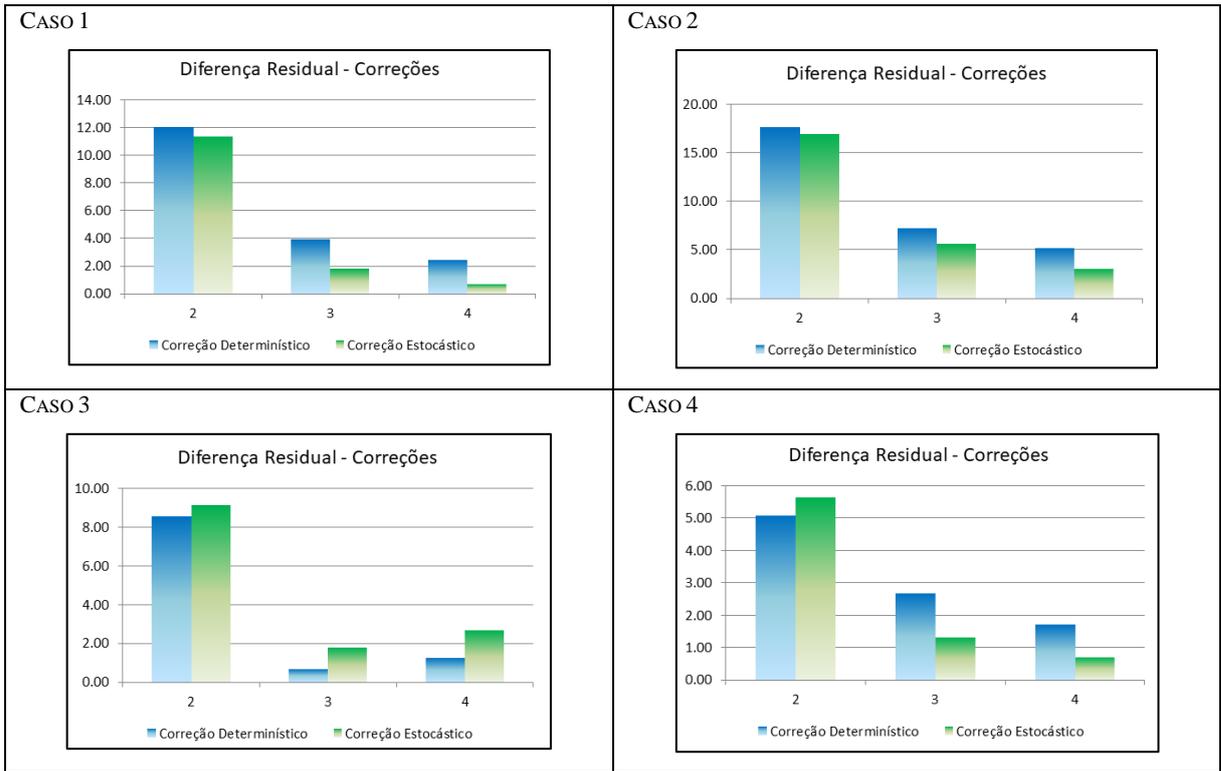
MODELO 3A – CASO 2 (m)

Pontos de leitura								
Estágio	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0.000395	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	0	0.001008	0.002184	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	0	0.001917	0.005530	0.006830	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	0	0.003168	0.010215	0.016519	0.015572	0.000000	0.000000	0.000000
5	0	0.004668	0.015980	0.028818	0.036361	0.030079	0.000000	0.000000
6	0	0.006522	0.023059	0.044168	0.062114	0.067604	0.050629	0.000000
7	0	0.006767	0.024025	0.046138	0.065914	0.073196	0.058142	0.008744
8								
9								
10								
11								
12								
13								

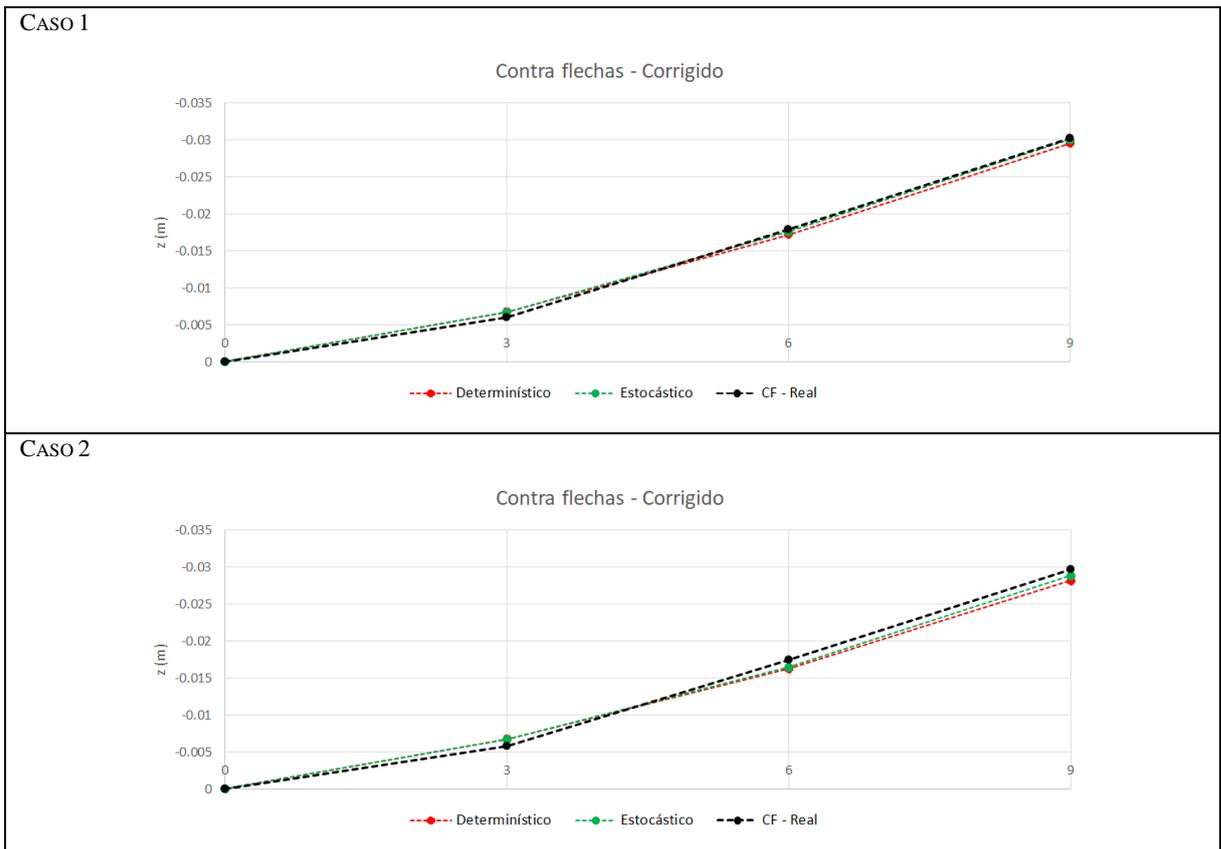
ANEXO E - RESULTADOS DA CORREÇÃO DE CONTRA FLECHAS

MODELO 1

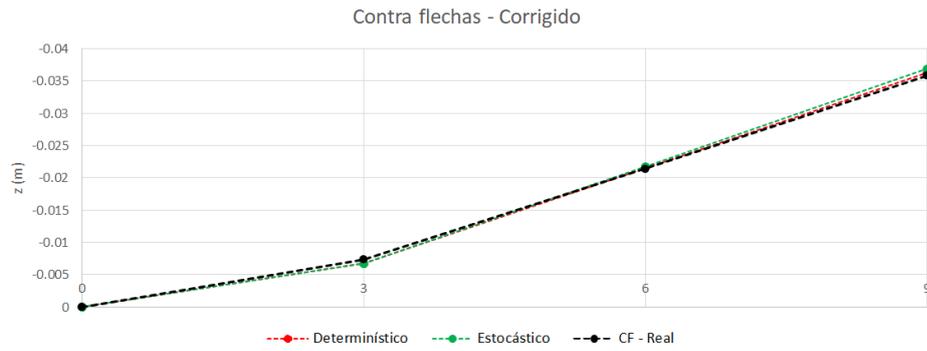
PERCENTUAL DOS RESÍDUOS APÓS APLICAÇÃO DAS CONTRA FLECHAS



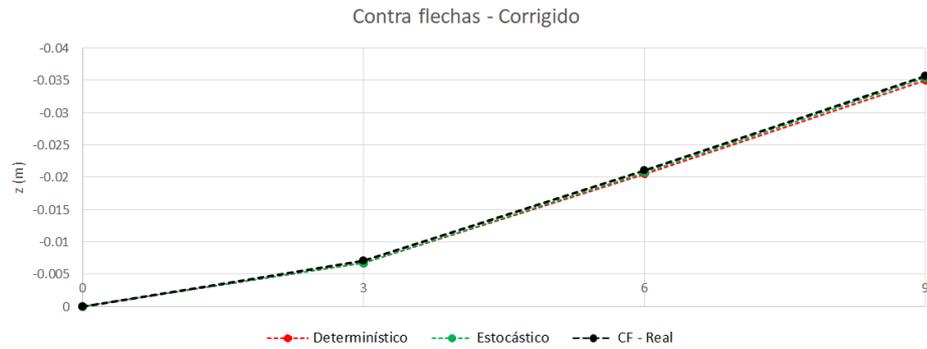
CONFIGURAÇÃO FINAL DAS CONTRA FLECHAS



CASO 3



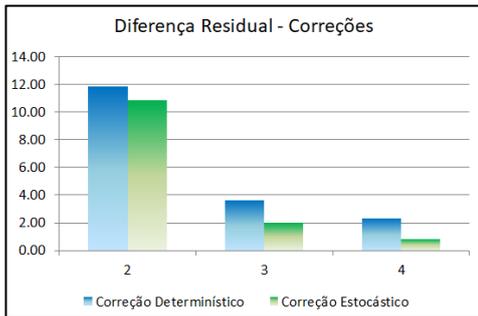
CASO 4



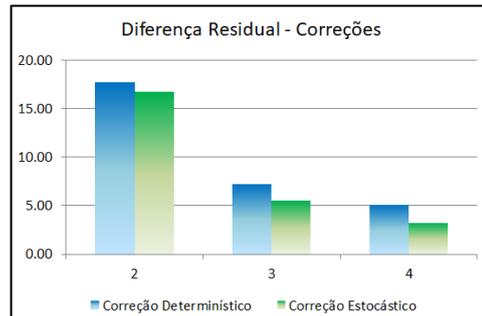
MODELO 2

PERCENTUAL DOS RESÍDUOS APÓS APLICAÇÃO DAS CONTRA FLECHAS

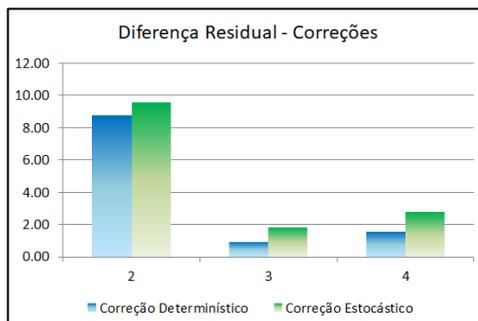
CASO 1



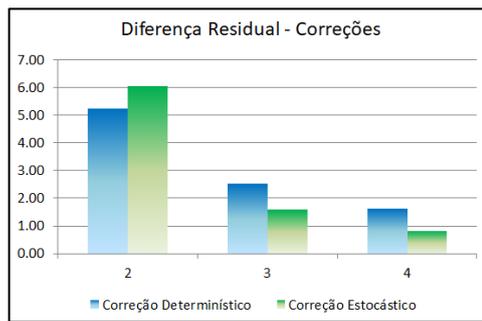
CASO 2



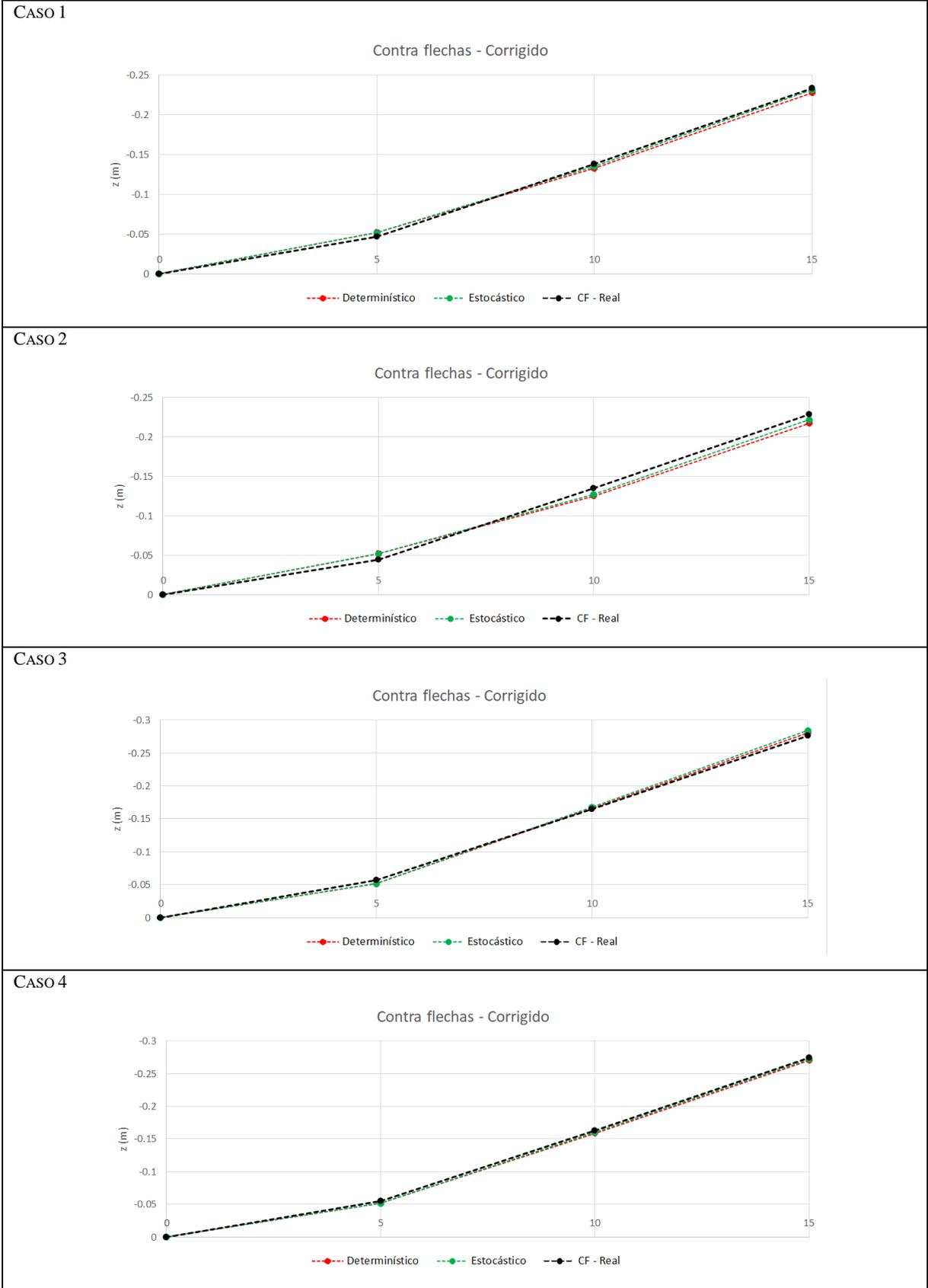
CASO 3



CASO 4

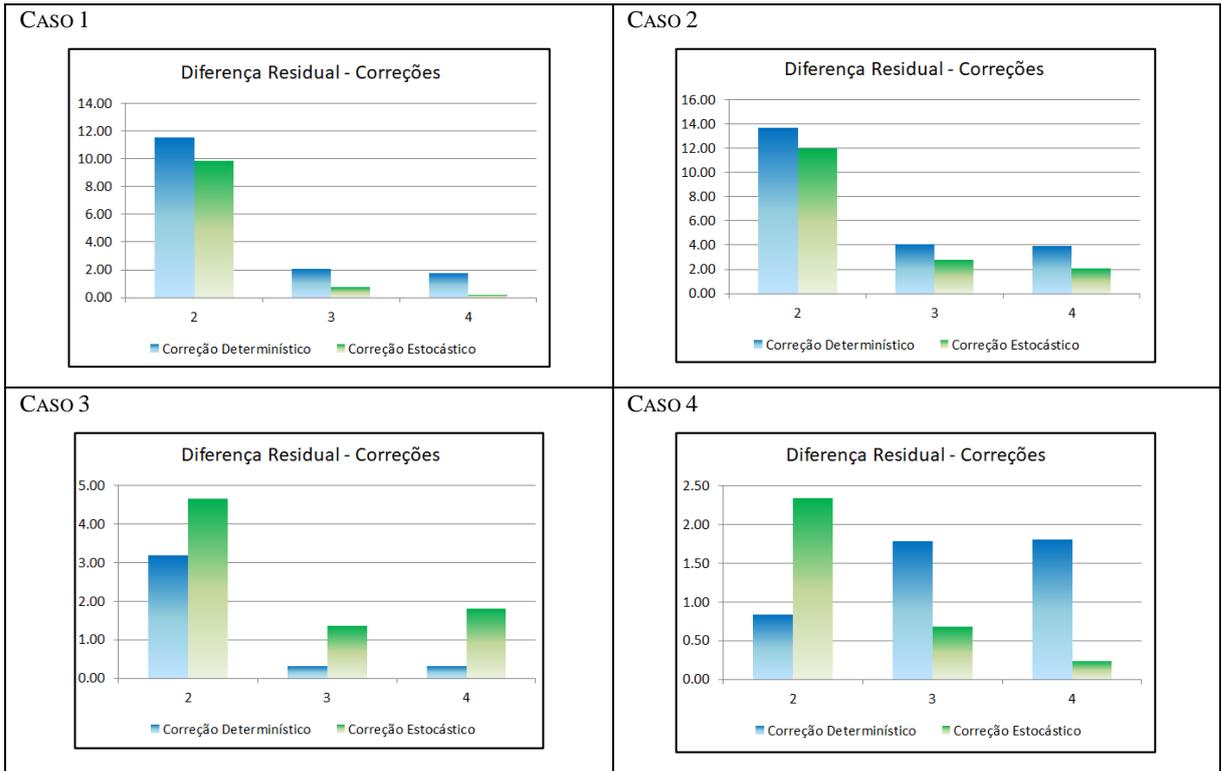


CONFIGURAÇÃO FINAL DAS CONTRA FLECHAS

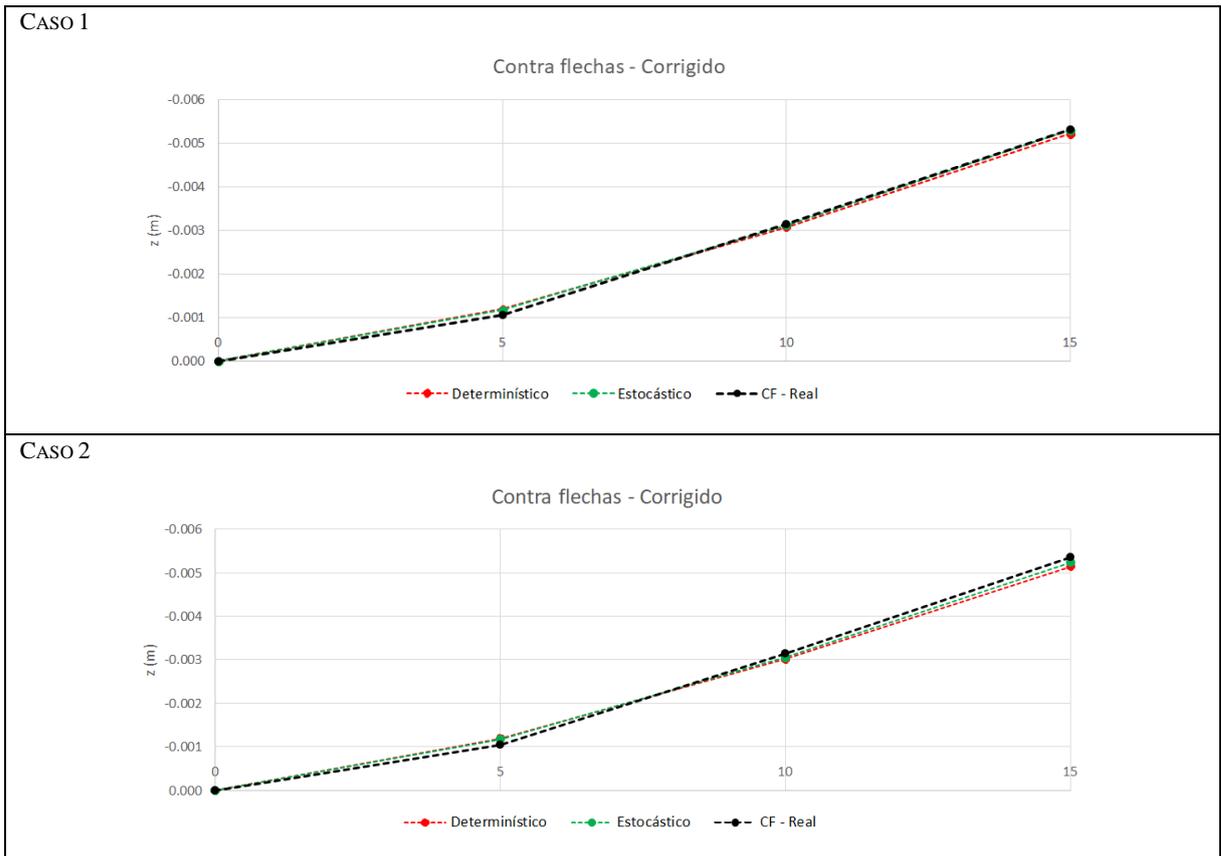


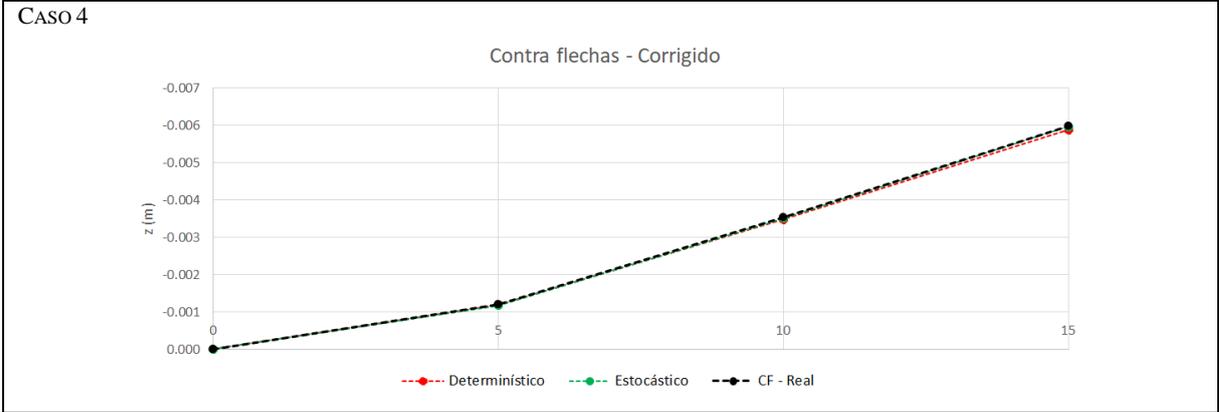
MODELO 3

PERCENTUAL DOS RESÍDUOS APÓS APLICAÇÃO DAS CONTRA FLECHAS



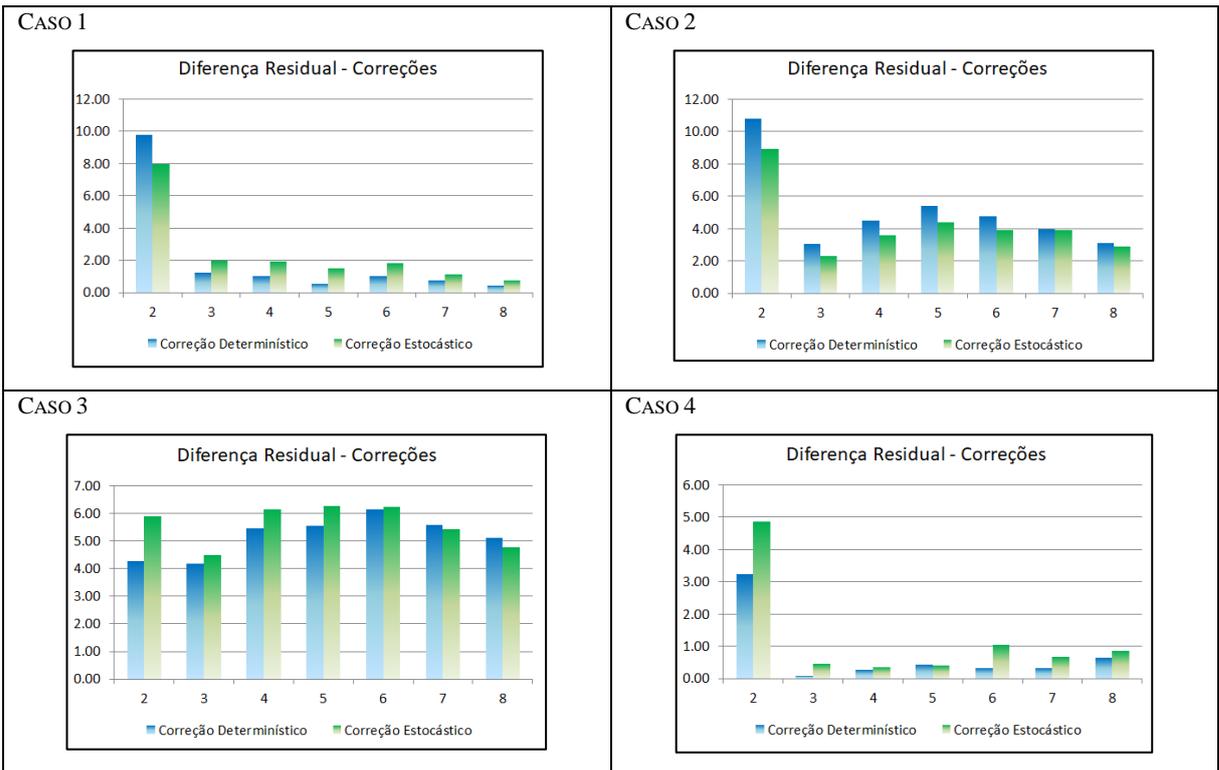
CONFIGURAÇÃO FINAL DAS CONTRA FLECHAS





MODELO 3A

PERCENTUAL DOS RESÍDUOS APÓS APLICAÇÃO DAS CONTRA FLECHAS

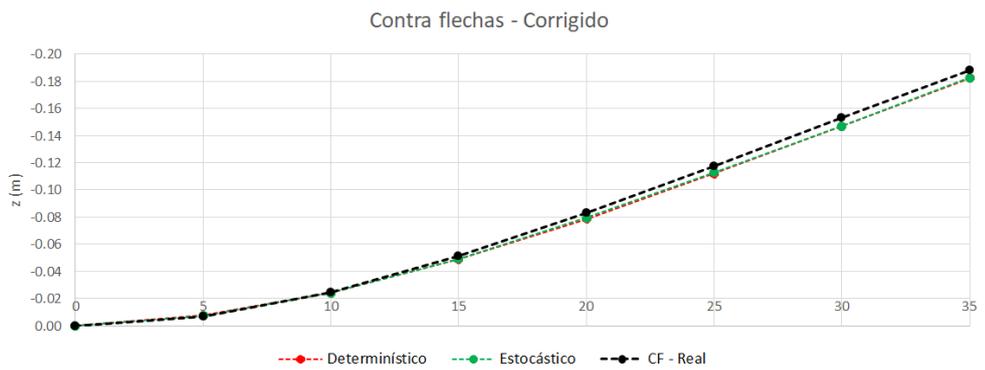


CONFIGURAÇÃO FINAL DAS CONTRA FLECHAS

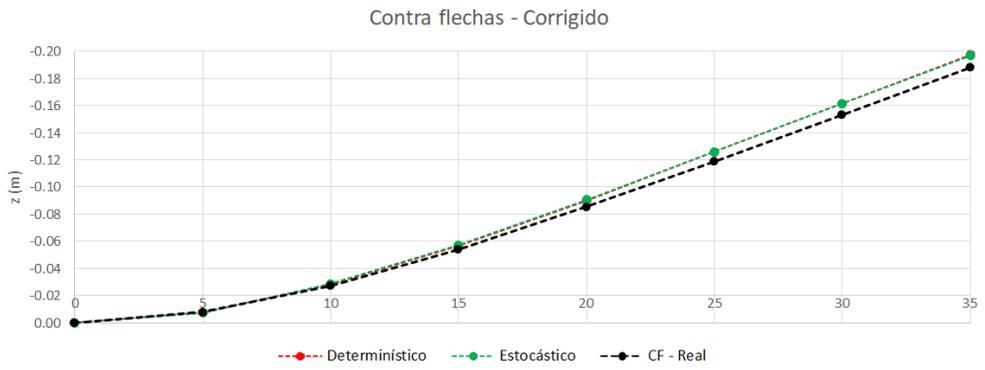
CASO 1



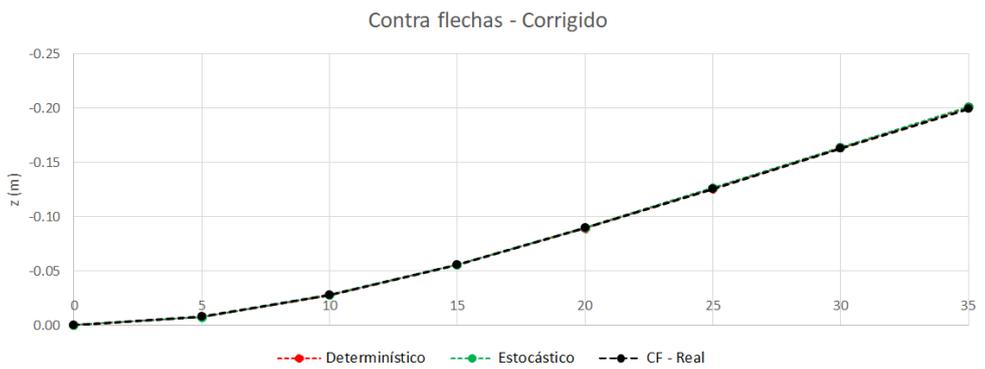
CASO 2



CASO 3



CASO 4



ANEXO F – CÓDIGOS DE PROGRAMAÇÃO

PROGRAMA PARA O CÁLCULO DE CONTRA FLECHAS EM ESTRUTURAS EM BALANÇOS SUCESSIVOS

```

% -----
% Programa para o cálculo de contra flechas em estruturas em balanço
% sucessivo
% -----
% Script file: contraflechaBS.m
%
% Proposta:
% O programa foi desenvolvido para o cálculo de contra flechas em
% estruturas em balanço sucessivo em fase de projeto, assim como as
% devidas correções ao longo da execução.
% Para o cálculo das deformações são considerados a construção em
% estágios e o fenômeno de fluência.
% A correção durante a obra das contra flechas aplicadas na estrutura é
% realizada através de um processo de otimização caracterizando o
% concreto através das deformações ocorridas em campo.
%
% Revisões do programa:
%   Data           Programador           Descrição das Revisões
%   -----
%   02/09/19       Mariella Falcão           Código Original/Versão 1
%
global nsteps
%% Informações sobre o Programa
% -----

disp('>>>> UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO <<<<');
disp('>>>> CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS <<<<');
disp('>>>> PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL <<<<');
disp('>>>> ÁREA DE ESTRUTURAS <<<<');
disp('>>>> CÁLCULO E CORREÇÃO DE CONTRA FLECHAS EM ESTRUTURAS EXECUTADAS PELO MÉTODO
DO BALANÇO SUCESSIVO <<<<');
disp(' ');
disp('-----')
disp('>>>> Programa para o cálculo de contra flechas em estruturas em balanço
sucessivo <<<<');
disp('-----')

%% Escolha do processo a ser realizado
disp('>> SERÁ REALIZADO CÁLCULO DE CONTRA FLECHAS DE PROJETO (0) OU <<');
disp('>> CORREÇÃO DE CONTRA FLECHAS NA EXECUÇÃO (1) <<');
PCF=input('');

%% Cálculo de contra flecha de projeto
if PCF==0
    tic
    nsteps=0;
    Incremental_Tempo_1D_1;
    fcontraflecha;
    format shortG

    CF
    CFabsg = CFabs
    toc
else
%% Correção de contra flecha durante a execução
    tic
    nsteps=0;

    Incremental_Tempo_1D_1;
    for nsteps=1:nTS-1
        optimdeform;
        Incremental_Tempo_1D_1;
        fcontraflecha;

```

```

format shortG
CFcorr
clear CFcorrabs
CFcorrabs(1,1:2)=CFcorr(1,1:2);
for i=3:nTN
    CFcorrabs=[CFcorrabs ((CFcorrabs(1,i-1)-CFcorrabs(1,i-2))/DadosGeo(1,i-2))
*DadosGeo(1,i-1)+CFcorrabs(1,i-1)+CFcorr(1,i)];
end
CFcorrabs
CFabs
CFR = [0    -0.001878    -0.005801    -0.010345];
CFProj = [0 -0.001741    -0.005433    -0.009727];

figure,
plot(noxy(1,:),-(CFR),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','b');
%plot(noxy(1,1:end-1),-(CFR),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','b'); %
biengastada
hold on
plot(noxy(1,:),-(CFProj),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','k');
%plot(noxy(1,1:end-1),-(CFProj),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','k'); %
biengastada
hold on
plot(noxy(1,:),-(CFcorrabs),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','r');

%plot(noxy(1,1:end-1),-(CFcorrabs(1,1:end-1)),'LineWidth',
1,'Marker','o','Color','r'); %biengastada
title('Contra flechas');
legend('CF correta','CF determinística projeto ','CF determinística corrigida
');
toc
end
end
% resultado

```

```

% Script file: Incremental_Tempo_1D_1.m
%
% Proposta:
% O programa foi desenvolvido para calcular as deformações em uma viga
% construída em estágios, ou seja, com análise incremental. Também é
% possível considerar na análise o efeito de fluência.
%
% Revisões do programa:
%
%      Data          Programador          Descrições das Revisões
%      -----          -
%      02/07/15      Mariella Falcão          Código Original
%      15/10/15      Mariella Falcão          Alteração para inclusão dos
%                               efeitos da fluência
%      28/06/18      Mariella Falcão          Ajuste para inclusão dos
%                               efeitos do tempo
%      05/06/19      Mariella Falcão          Revisão Geral
%      02/09/19      Mariella Falcão          Versão 1

%% Dados de entrada
fdados;

%% Matriz de Rigidez
if nS~=0
    if char(Fluencia)=='n'
        frigidezstage;
    else
        frigidezstagef;
    end
else
    frigidez
end

%% Cálculo das Forças Externas
if nS~=0
    if char(Fluencia)=='n'
        ffexternostage;
    else
        ffexternostagef;
    end
else

```



```

if i==1
    PP(1,stage{2,i})=-prop{4,stage{2,i}}*prop{12,stage{2,i}};
else
    if sum(stage{2,i})~=sum(stage{2,i-1})
        aux=size(stage{2,i-1},2)+1;
        for j=aux:size(stage{2,i},2)
            PP(1,stage{2,i}(1,j))=-prop{4,stage{2,i}(1,j)}*prop{12,stage{2,i}(1,
j)}};
        end
    end
end

% -----
% >>>>>> Cargas Distribuídas
% -----
QT=zeros(1,size(prop,2));
QTaux1=zeros(1,size(prop,2));
if stage{6,i}~=0
    for j=1:size(stage{6,i},2)
        aux=DadosCargaQ(1,stage{6,i}(1,j));
        QTaux1(1,aux)=DadosCargaQ(2,stage{6,i}(1,j));
    end
    QT=QT+QTaux1;
end

QTaux2=zeros(1,size(prop,2));
if stage{7,i}~=0
    for j=1:size(stage{7,i},2)
        aux=DadosCargaQ(1,stage{7,i}(1,j));
        QTaux2(1,aux)=-DadosCargaQ(2,stage{7,i}(1,j));
    end
    QT=QT+QTaux2;
end

% -----
% >>>>>> Cargas Totais no Segmento
% -----
Q=PP+QT;
% -----
% >>>>>> Cálculo dos Hiperestáticos
% -----
% Hiperestáticos iniciais e finais em cada nó:
R=zeros(nTN,1);
M=zeros(nTN,1);
for j=1:size(stage{2,i},2)
    Raux=zeros(nTN,1);
    Maux=zeros(nTN,1);
    Raux(prop{1,stage{2,i}(1,j)})=Q(1,j).*prop{3,stage{2,i}(1,j)}/2;
    Raux(prop{2,stage{2,i}(1,j)})=Q(1,j).*prop{3,stage{2,i}(1,j)}/2;
    Maux(prop{1,stage{2,i}(1,j)})=Q(1,j).*prop{3,stage{2,i}(1,j)}.^2/12;
    Maux(prop{2,stage{2,i}(1,j)})=-Q(1,j).*prop{3,stage{2,i}(1,j)}.^2/12;

    R=R+Raux;
    M=M+Maux;
end

% Hiperestáticos em cada nó:
F0=zeros(6*nTN,1);
for j=1:nTN
    F0(j*6-4,1)=-R(j);
    F0(j*6,1)=-M(j);
end
stage{12,i}=F0;
end

```



```

% -----
% >>>>>> Cargas Totais no Segmento
% -----
Q=PP+QT;
% -----
% >>>>>> Cálculo dos Hiperestáticos
% -----
% Hiperestáticos iniciais e finais em cada nó:
R=zeros(nTN,1);
M=zeros(nTN,1);
for j=stage{2,i}
    Raux=zeros(nTN,1);
    Maux=zeros(nTN,1);

    Raux(prop{1,j})=Q(1,j).*prop{3,j}/2;
    Raux(prop{2,j})=Q(1,j).*prop{3,j}/2;
    Maux(prop{1,j})=Q(1,j).*prop{3,j}.^2/12;
    Maux(prop{2,j})=-Q(1,j).*prop{3,j}.^2/12;

    R=R+Raux;
    M=M+Maux;
end

% Hiperestáticos em cada nó:
F0=zeros(2*nTN,1);
for j=1:nTN
    F0(j*2-1,1)=-R(j);
    F0(j*2,1)=-M(j);
end

% estágios impares ou inicial
F0i(:,i)=F0;

% estágios pares ou final
aux=stage{2,i};
for k=1:i
    if k==i
        F0f(:,k,i)=F0;
    else
        F0f(:,k,i)=F0i(:,k)*((fif(k,k,i)-fif(k,k,i-1))/(1+fif(i,k,i)));
    end
end
end
end

```

```

% Script file: feinterno.m
%
% Proposta:
% A função feinterno é utilizada para definir o vetor dos hiperestáticos
% aplicados aos nós da viga no script Incremental_Tempo_1D_1.m
%
% Revisões do programa:
%   Data           Programador           Descrições das Revisões
%   -----           -----           -----
%   15/01/15       Mariella Falcão       Código Original
%   02/07/15       Mariella Falcão       Ajuste para Fluência
%   23/10/15       Mariella Falcão       Ajuste para efeitos de tempo e
%                               análise incremental
%   25/07/18       Mariella Falcão       Ajuste Geral
%   28/03/19       Mariella Falcão       Ajuste Geral
%   02/09/19       Mariella Falcão       Versão 1
%
%% Forças Internas
% -----
% >>>>>> Peso Próprio
% -----

```



```

        for j=1:(i-1)
            soma=soma+CFrel(j,i+1);
        end
        CFrel(i,i+1)=CFabs(1,i+1)-soma;
    end
end
for j=(i+2):nTN
    somacf=sum(DadosGeo(1,i:j-1));
    CFrel(i,j)=((CFrel(i,i+1)-CFrel(i,i))/DadosGeo(1,i))*somacf;
end
end
for i=1:nTS
    CFcorr(1,i+1)=CFrel(i,i+1);
end
end
end

```

```

% Script file: optimdeform.m
%
% Proposta:
% O programa foi desenvolvido para otimizar a diferença entre as
% deformações de um projeto com as deformações ocorridas em campo, de
% maneira a achar os parâmetros (fck e RH) que possam reajustar o projeto
% para que se aproxime da realidade
%
% Revisões do programa:
%
%      Data          Programador          Descrição das Revisões
%      -----          -
%      06/08/19      Mariella Falcão          Código Original
%
global x0
global deltastd
global nsteps
global nnoexec
global novox
format long
% Ponto inicial para otimização
DadosCampo=xlsread('DadosCampo.xlsx','DadosCampo','B3:Z12');
nnoexec=nsteps+1;
deltastd=[];
for i=1:nsteps
    for j=1:nnoexec
        if DadosCampo(i,j)~=0
            deltastd=[deltastd; DadosCampo(i,j)];
        end
    end
end
end
if nsteps==1
    deltastd=[10^-16;deltastd];
    limite=(1-((deltastd(end))/resultado(2*nsteps,nsteps+3)));
else
    deltastd=deltastd;
    resultlimit=[];
    for i=1:nsteps
        resultlimit=[resultlimit resultado(2*i,4:i+3)];
    end
    limite=1-(deltastd./resultlimit');
end
end

fck0=DadosGeo(5,end);

```

```

H0=DadosGeo(6,end);
x0=[fck0,H0];

% Definindo alteração no passo para o comando lsqnonlin
options = optimset('lsqnonlin');
optnew = optimset(options,'FinDiffRelStep',1e-4,'TolFun',1e-4);

% Otimizando a função
[x,resnorm,residual,exitflag,output] = lsqnonlin(@analysisDriver,x0,[20 40],[70 99],\
optnew);

% Resultado da Otimização

fprintf('Valor de fck otimizado para projeto: %9.3f tonf/m^2 \n',x(1));
fprintf('Valor de Umidade relativa otimizada para projeto: %6.2f\n',x(2));
fprintf('Residuo entre os novos valores de projeto e valores de leitura: %10.2e\n',\
resnorm);
fprintf('Número de iterações realizadas: %d\n',output.iterations);
novox(:,nsteps)=x';

```

```

function FunObj = analysisDriver(var)
% A função FunObj é utilizada para encontrar a função objetivo que
% representa as diferenças de deformação de um de um projeto com as
% deformações ocorridas em campo, considerando os parâmetros (fck e RH)
% para que possam reajustar o projeto e assim este se aproxime da
% realidade
%
% Revisões do programa:
%      Data          Programador          Descrições das Revisões
%      -----          -----          -----
%      06/08/19      Mariella Falcão      Código Original
%
global deltastd
global nsteps
global nnoexec
format long

Incremental_Tempo_1D_1;

% Leitura dos dados de deslocamento através de tabela do programa
delta=[];
for i=2:2:2*nsteps
    for j=3:(2+nnoexec)
        if resultado(i,j)~=0
            delta=[delta; resultado(i,j)];
        end
    end
end

% Na execução do primeiro segmento é necessário mais de um ponto, sendo
% assim, é acrescentado o ponto do engaste.
if nsteps==1
    delta=[10^-16;delta];
else
    delta=delta;
end
% Obtenção da Função Objetivo
FunObj=(delta./deltastd)-1;

```

PROGRAMA PARA O CÁLCULO DE CONTRA FLECHAS EM ESTRUTURAS EM BALANÇOS SUCESSIVOS COM VARIÁVEIS ALEATÓRIAS

```

% -----
% Programa para o cálculo de contra flechas em estruturas em balanço
% sucessivo com variáveis aleatórias
% -----
% Script file: contraflechaBS_var.m
%
% Proposta:
% O programa foi desenvolvido para o cálculo de contra flechas em
% estruturas em balanço sucessivo em fase de projeto, assim como as
% devidas correções ao longo da execução.
% Para o cálculo das deformações são considerados a construção em
% estágios e o fenômeno de fluência.
% A correção durante a obra das contra flechas aplicadas na estrutura é
% realizada através de um processo de otimização caracterizando o
% concreto através das deformações ocorridas em campo.
% O diferencial é a utilização de variáveis aleatórias, o uso de Monte
% Carlo para inclusão de uma análise probabilística
%
% Revisões do programa:
%
%   Data           Programador           Descrições das Revisões
%   -----
%   02/09/19      Mariella Falcão           Código Original/Versão 1
%
global nsteps
%% Informações sobre o Programa
% -----
disp('>>>> UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO <<<<');
disp('>>>> CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS <<<<');
disp('>>>> PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL <<<<');
disp('>>>> ÁREA DE ESTRUTURAS <<<<');
disp('>>>> CÁLCULO E CORREÇÃO DE CONTRA FLECHAS EM ESTRUTURAS EXECUTADAS PELO MÉTODO
DO BALANÇO SUCESSIVO <<<<');
disp(' ');
disp('-----')
disp('>>>> Programa para o cálculo de contra flechas em estruturas em balanço
sucessivo com variáveis aleatórias <<<<');
disp('-----')

%% Escolha do processo a ser realizado
disp('>> SERÁ REALIZADO CÁLCULO DE CONTRA FLECHAS DE PROJETO (0) OU <<');
disp('>> CORREÇÃO DE CONTRA FLECHAS NA EXECUÇÃO (1) <<');
PCF=input('');
CFR = [0 -0.007746 -0.027586 -0.055695 -0.089391 -0.125305 -0.162737
-0.199498];
CFProj = [0 -0.007370 -0.026404 -0.053434 -0.085505 -0.120266 -0.156095
-0.192016];

%% Cálculo de contra flecha de projeto
if PCF==0
tic
nsteps=0;
Incremental_Tempo_1D_1_var;
fcontraflecha_var;
format shortG
CFMC_var

```

```

CFabsMC_var

flexs(1:nTN,1:N)=CFabsMC(1,:,1:N);
[ss,ks]=sort(flexs(end,1:N));
qs=[0.1,0.25,0.5,0.75,0.9];

Fqs=flexs(1:nTN,ks(qs*N))';

figure,
boxplot(-flexs',noxy(1,:))
%boxplot(-flexs(1:end-1,:)',noxy(1,1:end-1)) %biengastada
hold on
plot(-Fqs','LineWidth',1,'Marker','o')
%plot(-Fqs(:,1:end-1)','LineWidth',1,'Marker','o') %biengastada

figure,
boxplot(-flexs',noxy(1,:))
%boxplot(-flexs(1:end-1,:)',noxy(1,1:end-1)) %biengastada
hold on
plot(-(CFabsg),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','r');
%plot(-(CFabsg(1,1:end-1)),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','r'); %biengastada
hold on
plot(-(CFabsMC_var),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','k');
%plot(-(CFabsMC_var(1,1:end-1)),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','k'); %
biengastada
title('Contra flecha determinística x estocástica');
legend('CF determinística','CF estocástica');
toc

RdMC=CFabsMC-CFR;
% histdMC(:,1)=-RdMC(1,2,:);
% figure, hist(histdMC)
% hold on
% title('Histograma resíduo do 1º nó');
%
% histdMC(:,1)=-RdMC(1,nTN,:);
% figure, hist(histdMC)
% title('Histograma resíduo do último nó');

residuos(1:nTN,1:N)=-RdMC(1,:,1:N);
figure, boxplot(residuos',noxy(1,:))
hold on

plot(-(CFabsg-CFR),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','r');
hold on
plot(-(CFabsMC_var-CFR),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','k');
title('Resíduo determinístico x estocástico');
legend('Resíduo determinístico','Resíduo estocástico');
else
%% Correção de contra flecha durante a execução
tic
nsteps=0;
Incremental_Tempo_1D_1_var;
for nsteps=1:nTS-1
    optimdeform_var;

```

```

Incremental_Tempo_1D_1_var;
fcontraflecha_var;
format shortG
CFcorr
clear CFcorrabs_var
CFcorrabs_var(1,1:2)=CFcorr(1,1:2);

for i=3:nTN
    CFcorrabs_var=[CFcorrabs_var ((CFcorrabs_var(1,i-1)-CFcorrabs_var(1,i-2))
/DadosGeo(1,i-2))*DadosGeo(1,i-1)+CFcorrabs_var(1,i-1)+CFcorr(1,i)];
end
CFabsMC_var
CFcorrabs_var

figure,
plot(noxy(1,:),-(CFR),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','b');
%plot(noxy(1,1:end-1),-(CFR),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','b'); %
biengastada

hold on
plot(noxy(1,:),-(CFcorrabs_var),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','r');
%plot(noxy(1,1:end-1),-(CFcorrabs_var(1,1:end-1)),'LineWidth',
1,'Marker','o','Color','r'); %biengastada
title('Contra flechas');
legend('CF correta','CF estocática projeto ','CF estocática corrigida ');
toc
CFcorrabs=[0    -0.007495    -0.027607    -0.055541    -0.089016    -0.125718
-0.163254    -0.200790];

RdMC=CFabsMC-CFR;
%RdMC=CFabsMC(1,1:end-1,:)-CFR;    %biengastada

%    histdMC(:,1)=-RdMC(1,2,:);
%    figure, hist(histdMC)
%    title('Histograma resíduo do 1º nó');
%
%    histdMC(:,1)=-RdMC(1,nTN,:);
%    figure, hist(histdMC)
%    title('Histograma resíduo do último nó');

residuos(1:nTN,1:N)=-RdMC(1,:,1:N);
%residuos(1:nTN-1,1:N)=-RdMC(1,:,1:N);    %biengastada
figure, boxplot(residuos',noxy(1,:))
%figure, boxplot(residuos',noxy(1,1:end-1))    %biengastada
hold on
plot(-(CFcorrabs-CFR),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','r');
hold on
plot(-(CFcorrabs_var-CFR),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','k');

%plot(-(CFcorrabs_var(1,1:end-1)-CFR),'LineWidth',1,'Marker','o','Color','k');
%biengastada
title('Resíduo determinístico x estocástico');
legend('Resíduo determinístico','Resíduo estocástico');

end
end

```

```

% Script file: Incremental_Tempo_1D_1_var.m
%
% Proposta:
% O programa foi desenvolvido para calcular as deformações em uma viga
% construída em estágios, ou seja, com análise incremental. Também é
% possível considerar na análise o efeito de fluência. Com o uso de
% variáveis aleatórias
%
% Revisões do programa:
%
%      Data          Programador          Descrições das Revisões
%      -----          -----          -----
%      02/07/15      Mariella Falcão          Código Original
%      15/10/15      Mariella Falcão          Alteração para inclusão dos
%                               efeitos da fluência
%      28/06/18      Mariella Falcão          Ajuste para inclusão dos
%                               efeitos do tempo
%
%      05/06/19      Mariella Falcão          Revisão Geral
%      03/11/19      Mariella Falcão          Versão 1
%
%% Dados de entrada
% -----
fdados_var;
%rng(0)
rng(1234)
N=100;
for n=1:N
%% Efeitos diferidos no tempo

% Fluência
% -----
ffluencia_statistic_var;

%% Matriz de Rigidez
% -----
frigidezstagef_var;

%% Cálculo das Forças Externas
% -----
ffexternostagef_var;

%% Cálculo do Esforços Internos
% -----
feinternostagef_var;

%% Cálculo dos Deslocamentos e Coordenadas dos nós em cada Estágio de Construção
% -----
fdeslocamentostagef_var;

%% Resultados
% -----
fresultado_var;
dMC(:, :, n) = resultado;
end

```

```

% stage: Dados dos Estágios de Construção;
% Duração do Estágio:
stage{1,i}=DuracaoStage(i,1);

% Geometria Adicionada:
% Elemento:
stage{2,i}=[];
for j=1:nTS
    if AtivacaoStage{i,j}=='s'
        stage{2,i}=[stage{2,i} j];
    end
end

% Tempo do Estágio:
stage{3,i}=[];
if i==1
    stage{3,i}=DuracaoStage(i,1);
else
    for j=1:size(stage{2,i})
        stage{3,i}=stage{3,i-1}+DuracaoStage(i,1);
    end
end

% -----

% Carregamentos Nodais Ativados:
% Nome do carregamento Nodal:
CargaP=[];
exP=size(AtivacaoP,2);
if exP~=0
    for j=1:exP
        if i==1
            if AtivacaoP{i,j}=='s'
                CargaP=[CargaP j];
            end
        else
            if AtivacaoP{i,j}=='s' & AtivacaoP{i-1,j}=='n'
                CargaP=[CargaP j];
            end
        end
    end
end
stage{4,i}=CargaP;

% Carregamentos Nodais Desativados:
% Nome do carregamento Nodal:
CargaP=[];
if i~=1
    for j=1:exP
        if AtivacaoP{i-1,j}=='s' & AtivacaoP{i,j}=='n'
            CargaP=[CargaP j];
        end
    end
end
stage{5,i}=CargaP;

% -----

% Carregamentos Distribuidos Ativados:
% Nome do carregamento Distribuidos:
CargaQ=[];
exQ=size(AtivacaoQ,2);
if exQ~=0
    for j=1:exQ
        if i==1
            if AtivacaoQ{i,j}=='s'
                CargaQ=[CargaQ j];
            end
        end
    end
end

```



```

end
t(i,j)=t0(i,j)+stage{l,i}; % idade da peça no final do estágio
end

% Dados dimensões nominais
mL = prop{3,j}; % L: comprimento
mA = prop{4,j}; % A: área
mu = prop{5,j}; % u: perímetro
mI = prop{6,j}; % I: inércia
fck = prop{7,j}; % fck: Resistência à Compressão do Concreto
deltaf = 8;
mfc = fck + deltax; % fc: Resistência à Compressão Média do Concreto

mRH = prop{8,j}; % RH: Umidade Relativa
RH0=100; % 100% umidade relativa

% Desvio padrão de acordo com JCSS
dpL = 0.01; % dpH = 0.004+0.006*h quando a dimensão for menor 1.0 m
% dpA = 0.0231*mA; % CoV = 0.0231 retangulo pequeno
% dpu = 0.0106*mu; % CoV = 0.0106 retangulo pequeno
% dpI = 0.0426*mI; % CoV = 0.0426 retangulo pequeno
dpA = 0.089*mA;
dpu = 0.0013*mu;
dpI = 0.0136*mI;

% Conjunto de amostras
Ls = rnL*dpL + mL;
L(j)=Ls;
As = rnG*dpA + mA;
us = rnG*dpu + mu;
Is = rnG*dpI + mI;

% resistência
sigmaf = 4.85; % 1.65*S, onde S=4.85
sigmalogf = sqrt(log(sigmaf^2/(mfc^2)+1));
mulogf = log((mfc^2)/sqrt(sigmaf^2+mfc^2));
yfc=mulogf + rnfc*sigmalogf;
fcs=exp(yfc);

% Umidade Relativa
sigma = 18.4376; % ver dados histograma
sigmalog = sqrt(log(sigma^2/((100-mRH)^2)+1));
mulog = log(((100-mRH)^2)/sqrt(sigma^2+(100-mRH)^2));
yRH=mulog +rnRH*sigmalog;
xRH=exp(yRH);
RHs = 100 - xRH;

% Amostras das variáveis
% Cálculados
% h: Espessura média
hs = 2*(As/us)*1000;
h0 = 100; % 100mm espessura média

% Cálculo do Coeficiente de fluência inicial(Umidade relativa);
fiRHs = 1+((1-(RHs/RH0))/(0.46*(hs/h0)^(1/3)));

% Cálculo do Coeficiente de fluência inicial(betafcm)
fcm0 = 10; % 10 MPa
betafcms = 5.3/(fcs/fcm0)^0.5;

% Cálculo do Coeficiente de fluência inicial(betat0)
t1 = 1; % 1 dia
for m=1:i
betat0 = 1/(0.1+(t0(m,j)/t1)^0.2);

% Cálculo do Coeficiente de fluência inicial
fi0s = fiRHs*betafcms*betat0;

```



```

% Desvio padrão de acordo com JCSS
dpF1P = 0.041*F1P;
dpF1M = 0.041*F1M;

% Conjunto de amostras
F1Ps = rn*dpF1P + F1P;
F1Ms = rn*dpF1M + F1M;

% Amostras das variáveis
F1(aux*2-1,1)=F1(aux*2-1,1)+F1Ps;
F1(aux*2,1)=F1(aux*2,1)+F1Ms;
end
end

F=F+F1;
Faux(:,i)=F;

F2=zeros(2*nTN,1);
if stage{5,i}~=0
for j=1:size(stage{5,i},2)
aux=DadosCargaP(1,stage{5,i}(1,j));
F2P=DadosCargaP(2,stage{5,i}(1,j));
F2M=DadosCargaP(3,stage{5,i}(1,j));

% Desvio padrão de acordo com JCSS
dpF2P = 0.041*F2P;
dpF2M = 0.041*F2M;

% Conjunto de amostras
F2Ps = rn*dpF2P + F2P;
F2Ms = rn*dpF2M + F2M;

% Amostras das variáveis
F2(aux*2-1,1)=F(aux*2-1,1)-F2Ps;
F2(aux*2,1)=F(aux*2,1)-F2Ms;
end
end

F=F+F2;

% estágios impares ou inicial
Fi(:,i)=F;

% estágios pares ou final
aux=stage{2,i};
for k=1:i
if k==i
Ff(:,k,i)=F;
else
Ff(:,k,i)=Fi(:,k)*((fifs(k,k,i)-fifs(k,k,i-1))/(1+fifs(i,k,i)));
end
end
end
end

```

```

% Script file: feinternostagef_var.m
%
% Proposta:
% A função feinternostagef_var é utilizada para definir o vetor dos
% hiperestáticos aplicados aos nós da viga em cada estágio por processo
% estocástico no script Incremental_Tempo_1D_1_var.m
%
% Revisões do programa:
%


| Data     | Programador     | Descrições das Revisões |
|----------|-----------------|-------------------------|
| 15/01/15 | Mariella Falcão | Código Original         |
| 02/07/15 | Mariella Falcão | Ajuste para Fluência    |


```



```

% -----
% >>>>>> Cargas Distribuídas
% -----
QT=zeros(1,size(prop,2));
QTaux1=zeros(1,size(prop,2));
if stage{6,i}~=0
    for j=1:size(stage{6,i},2)
        aux=DadosCargaQ(1,stage{6,i}(1,j));
        QTaux1(1,aux)=DadosCargaQ(2,stage{6,i}(1,j));
    end
    QT=QT+QTaux1;
end

QTaux2=zeros(1,size(prop,2));
if stage{7,i}~=0
    for j=1:size(stage{7,i},2)
        aux=DadosCargaQ(1,stage{7,i}(1,j));
        QTaux2(1,aux)=-DadosCargaQ(2,stage{7,i}(1,j));
    end
    QT=QT+QTaux2;
end

% -----
% >>>>>> Cargas Totais no Segmento
% -----
Q=PP+QT;
% -----
% >>>>>> Cálculo dos Hiperestáticos
% -----
% Hiperestáticos iniciais e finais em cada nó:
R=zeros(nTN,1);
M=zeros(nTN,1);
for j=stage{2,i}
    Raux=zeros(nTN,1);
    Maux=zeros(nTN,1);

    Raux(prop{1,j})=Q(1,j).*L(j)/2;
    Raux(prop{2,j})=Q(1,j).*L(j)/2;
    Maux(prop{1,j})=Q(1,j).*L(j).^2/12;
    Maux(prop{2,j})=-Q(1,j).*L(j).^2/12;

    R=R+Raux;
    M=M+Maux;
end

% Hiperestáticos em cada nó:
F0=zeros(2*nTN,1);
for j=1:nTN
    F0(j*2-1,1)=-R(j);
    F0(j*2,1)=-M(j);
end

% estágios ímpares ou inicial
F0i(:,i)=F0;

% estágios pares ou final
aux=stage{2,i};
for k=1:i
    if k==i
        F0f(:,k,i)=F0;
    else
        F0f(:,k,i)=F0i(:,k)*((fifs(k,k,i)-fifs(k,k,i-1))/(1+fifs(i,k,i)));
    end
end
end
end

```



```

        dMC_var(i,j) = median(vetor);
    end
end

```

```

function FunObj = analysisDriver_var(var)
% A função FunObj é utilizada para encontrar a função objetivo que
% representa as diferenças de deformação de um de um projeto com as
% deformações ocorridas em campo, considerando os parâmetros (fck e RH)
% para que possam reajustar o projeto e assim este se aproxime da
% realidade por processo estocástico
%
% Revisões do programa:
%   Data          Programador          Descrições das Revisões
%   -----          -
%   06/08/19      Mariella Falcão          Código Original
%   03/11/19      Mariella Falcão          Versão 1
%
global deltastd
global nsteps
global nnoexec
format long

Incremental_Tempo_1D_1_var;
fmediadMC_var;

dMC_var;
% Leitura dos dados de deslocamento através de tabela do programa
delta=[];
for i=2:2:2*nsteps
    for j=3:(2+nnoexec)
        if dMC_var(i,j)~=0
            delta=[delta; dMC_var(i,j)];
        end
    end
end

% Na execução do primeiro segmento é necessário mais de um ponto, sendo
% assim, é acrescentado o ponto do engaste.
if nsteps==1
    delta=[10^-16;delta];
else
    delta=delta;
end

% Obtenção da Função Objetivo
FunObj=(delta./deltastd)-1;

```