



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

KAROLINA SVEDESE

**INFLUÊNCIA DA RETRAÇÃO POR SECAGEM NO DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO**

RECIFE

2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

KAROLINA SVEDESE

**INFLUÊNCIA DA RETRAÇÃO POR SECAGEM NO DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de tecnologia e geociências, como requisito para a obtenção do título de bacharel em Engenharia civil.

Orientador(a): Prof. Dr. Paulo de Araújo Regis.

Coorientador(a): Eng. Josenaldo Monteiro Fonseca de Araújo.

RECIFE

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Svedese, Karolina.

Influência da retração por secagem no dimensionamento de estruturas em
concreto armado / Karolina Svedese. - Recife, 2022.

66 p. : il., tab.

Orientador(a): Paulo de Araújo Regis

Coorientador(a): Josenaldo Monteiro Fonseca de Araújo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Civil -
Bacharelado, 2022.

1. Fissuras. 2. Estanqueidade. 3. Cura úmida. 4. Variação uniforme de
temperatura. 5. SAP2000. I. Regis, Paulo de Araújo . (Orientação). II. Araújo,
Josenaldo Monteiro Fonseca de. (Coorientação). III. Título.

620 CDD (22.ed.)

KAROLINA SVEDESE

**INFLUÊNCIA DA RETRAÇÃO POR SECAGEM NO DIMENSIONAMENTO DE
ESTRUTURAS EM CONCRETO ARMADO**

TCC apresentado ao Curso de Engenharia civil
da Universidade Federal de Pernambuco,
Centro de tecnologia e geociências, como
requisito para a obtenção do título de bacharel
em Engenharia civil.

Aprovado em: 02/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

Profº. Dr. Paulo de Araújo Regis (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

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

Eng. Josenaldo Monteiro Fonseca de Araújo (Examinador Externo)

AGRADECIMENTOS

A Deus, criador dos céus e da terra e, dono de todo conhecimento.

A minha mãe, por nunca ter medido esforços para me ajudar a realizar tudo que já conquistei até hoje. Você é meu exemplo de força e perseverança.

A minha família, por todo amor e apoio nos dias difíceis.

A Wallaces, por segurar em minhas mãos e não me deixar desistir, por me dizer que eu era capaz nas inúmeras vezes em que pensei que não era e por estar comigo em todos os momentos, bons e ruins.

Ao professor Paulo de Araújo Regis, por toda orientação e conselhos, pelo interesse e dedicação para conclusão deste trabalho. Muito obrigada.

A todo departamento de estruturas da UFPE, em especial aos professores Bernardo Horowitz e Ezio da Rocha Araújo, por todas as aulas ministradas e experiências passadas.

Aos meus supervisores Juliana Farias e Josenaldo Monteiro, por me ensinarem todos os dias as práticas dessa profissão.

A todos, que de maneira direta ou indireta contribuíram para que eu pudesse concluir mais uma etapa. Meu sincero e carinhoso, obrigada!

RESUMO

Neste trabalho estudou-se a influência da retração por secagem do concreto, no dimensionamento de estruturas em concreto armado, submetidas as condições climáticas de Recife-PE ($U = 75\%$, $T = 25^{\circ}\text{C}$). Foi observado que é possível utilizar o software comercial SAP2000 v.23 para realizar modelagens considerando os efeitos da retração, desde que seja aplicada uma variação uniforme de temperatura, que represente a deformação de retração aos elementos do modelo. Ratificou-se que a retração por secagem é diretamente proporcional à temperatura ambiente, enquanto que maiores valores de umidade relativa do ar, tendem a diminuir seus efeitos. Averiguou-se que, maiores períodos de cura úmida retardam o início da retração por secagem, resultando na diminuição do seu valor final, sem que houvessem mudanças no seu comportamento ao longo do tempo. Do estudo infere-se que a retração por secagem do concreto aumenta vertiginosamente o valor da área de aço empregada na estrutura. Ao se admitir uma classe de agressividade ambiental IV para o cálculo das armaduras mínimas indicadas pela norma, observou-se um aumento de cerca de 209,5% por face, ao se considerar os efeitos de retração. Para o local de estudo, notou-se que, para uma determinada armadura passiva, a área de aço necessária para combater os esforços de tração, oriundos da deformação por retração, sobrepujam os valores mínimos preconizados pela NBR 6118/2014 após 365 dias da concretagem, mesmo que seja estipulado uma cura úmida de 28 dias.

Palavras-chave: Fissuras; Estanqueidade; Cura úmida; Variação uniforme de temperatura, SAP2000.

ABSTRACT

This paper studied the influence of concrete shrinkage on the design of reinforced concrete structures under the climatic conditions of Recife-PE ($H = 75\%$, $T = 25^{\circ}\text{C}$). It was observed that it is possible to use the commercial software SAP2000 v.23 to perform modeling considering the effects of shrinkage, as long as a uniform temperature variation is applied, which represents the shrinkage deformation to the model elements. It was ratified that drying shrinkage is directly proportional to ambient temperature, while higher values of relative humidity tend to decrease its effects. It was verified that longer periods of wet curing delay the beginning of drying shrinkage, resulting in the decrease of its final value, without changes in its behavior over time. From the study it can be inferred that the concrete drying shrinkage increases vertiginously the value of the steel area employed in the structure. When admitting a class of environmental aggressiveness IV for the calculation of the minimum reinforcement indicated by the standard, an increase of about 209.5% per face was observed, when considering the effects of shrinkage. For the study site, it was noted that, for a given passive reinforcement, the area of steel required to combat tensile stresses from shrinkage deformation exceeds the minimum values recommended by NBR 6118/2014 after 365 days of concreting, even if a wet curing period of 28 days is stipulated.

Keywords: Cracking; Tightness; Wet curing; Uniform temperature variation, SAP2000.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama tensão-deformação típico do aço estrutural: (a) fora de escala; (b) em escala	18
Figura 2 – Diagrama tensão-deformação bilinear do concreto em tração	19
Figura 3 – Elemento sujeito a tensão axial	20
Figura 4 – Elemento sujeito a tensões biaxiais: (a) plano inclinado pq perpendicular a força que provoca a tensão; (b) tensões normais atuando no elemento	20
Figura 5 – Exsudação da água de amassamento do concreto	21
Figura 6 – Esquema de formação dos meniscos entre as partículas do concreto	22
Figura 7 – Evolução da retração autógena com diferentes relações A/C	23
Figura 8 – Evolução da retração total ao longo tempo, para diferentes condições de humidade	24
Figura 9 – Viga padrão modelado como elemento tipo frame, no SAP2000 v.23 – Condíção de contorno 1 - Engaste-apoio.....	42
Figura 10 – Parede padrão modelada como elemento tipo shell, no SAP2000 v.23 – Condíção de contorno 1 - Parede livre.....	42
Figura 11 – Deformação térmica axial de um elemento tipo frame, na condição engaste-apoio, submetido a uma $\Delta T = 10 ^\circ C$, em mm	42
Figura 12 – Deformação térmica nas direções x e z de um elemento tipo shell, na condição de parede livre, submetido a uma $\Delta T = 10 ^\circ C$, em mm	43
Figura 13 – Viga padrão (20x50) modelada como elemento tipo frame, no SAP2000 v.23, na condição bi-engastada.....	45
Figura 14 – Reações nos engastes de um elemento tipo frame, com $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$, submetido a uma $\Delta T = 10 ^\circ C$, em kN	45
Figura 15 – Reações nos engastes de um elemento tipo frame, com $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$, submetido a uma $\Delta T = 50 ^\circ C$, em kN	45
Figura 16 – Reações nos engastes de um elemento tipo frame, barra com $f_{ck} = 55 \text{ MPa}$, submetido a uma $\Delta T = 85 ^\circ C$, em kN.....	45
Figura 17 – Tensão na direção u_1 em um elemento tipo shell com $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$, submetido a uma $\Delta T = 10 ^\circ C$, em MPa	48
Figura 18 – Parede padrão modelada como elemento tipo shell, no SAP2000 v.23 – Condíção de contorno 2 - Parede engastada	50

Figura 19 – Tensão nas direções u_1 e u_3 em um elemento tipo shell com $f_{ck} = 25$ MPa, submetido a uma $\Delta T = 10$ °C, em MPa.....	50
Figura 20 – Dados climatológicos para Recife – PE, entre os anos de 1991 e 2021	51
Figura 21 - Retração por secagem do concreto ao longo do tempo para diferentes tempos de cura úmida, em Recife-PE ($T = 25$ °C, $U = 75\%$).....	54
Figura 22 – Retração por secagem do concreto em função da U e da T, para os tempos de cura úmida de 3 dias.....	58
Figura 23 – Retração por secagem do concreto em função da U e da T, para os tempos de cura úmida de 7 dias.....	58
Figura 24 – Retração por secagem do concreto em função da U e da T, para os tempos de cura úmida de 14 dias.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Taxa mínima de aço.....	36
Tabela 2 – Diâmetro máximo vs tensão máxima permitida, para $w = 0,2\text{ mm}$ e $w = 0,3\text{ mm}$	38
Tabela 3 – Deformação específica devido a variação uniforme de temperatura - $\varepsilon_{\Delta T}$, em mm/m	40
Tabela 4 – Deformação térmica dos elementos padrão - $\delta_{\Delta T}$, em mm	41
Tabela 5 – Módulo de elasticidade secante do concreto aos 28 dias.....	44
Tabela 6 – Reações nos engastes devido a uma variação uniforme de temperatura ao longo de um elemento de barra - $R_{\Delta T}$, em kN	44
Tabela 7 – Tensão axial em um elemento de barra devido a uma variação uniforme de temperatura - $\sigma_{1\Delta T}$, em MPa	46
Tabela 8 – Comparativo de tensões frame vs shell, para $\Delta T = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	47
Tabela 9 – Tensão biaxial em um elemento de casca devido a uma variação uniforme de temperatura - $\sigma_{2\Delta T}$, em MPa	49
Tabela 10 – Deformação específica total devido a retração por secagem do concreto, em Recife – PE	51
Tabela 11 – Coeficientes para o cálculo do $\beta_s(t)$ e $\beta_s(t_0)$	52
Tabela 12 – Idade fictícia do concreto para $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, em dias	52
Tabela 13 – Coeficiente relativo à retração nos instantes t e t_0 para $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $\beta_s(t)$ e $\beta_s(t_0)$	53
Tabela 14 – Retração por secagem do concreto com diferentes tempos de cura, para $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $U = 75\%$ - $\epsilon_{cs}(t, t_0)$, em mm/m	53
Tabela 15 – Tensão no concreto ao longo do tempo devido a retração para diferentes tempos de cura, para $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $U = 75\%$ - em MPa	54
Tabela 16 – Resistência a tração do concreto ($f_{ct, m}$), deformação de retração máxima (ε_{\max}) e variação de temperatura equivalente ($\Delta T_{equi.}$), para o estado biaxial de tensões ($\sigma_{2\Delta T}$)	55
Tabela 17 – Variação de temperatura equivalente a retração por secagem do concreto, para $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $U = 75\%$ - $\Delta T_{equi.}$, em $^{\circ}\text{C}$	56
Tabela 18 – Área de aço mínima, em cm^2/m	60
Tabela 19 – Armadura mínima de tração sob deformações impostas, em cm^2/m	61
Tabela 20 – Armadura de tração devido à retração, para $f_{ck} = 40\text{ MPa}$, em cm^2/m	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa e motivação	13
1.2	Objetivos gerais e específicos	14
2	TIPOS DE CARREGAMENTO (AÇÕES).....	15
2.1	Ações permanentes	15
2.2	Ações variáveis	15
2.3	Ações excepcionais	16
3	CONCEITOS BÁSICOS SOBRE TENSÃO E DEFORMAÇÃO	17
3.1	Tipos de tensão	19
3.1.1	Tensão axial	20
3.1.2	Tensão biaxial.....	20
4	RETRAÇÃO DO CONCRETO	21
4.1	Tipos e fatores que influenciam na retração do concreto	21
4.1.1	Retração plástica.....	21
4.1.2	Retração química (autógena).....	22
4.1.3	Retração térmica	23
4.1.4	Retração de carbonatação	23
4.1.5	Retração por secagem.....	23
4.2	NBR 6118/2014 x EUROCODE	24
5	CÁLCULO DA RETRAÇÃO DO CONCRETO SEGUNDO A NBR 6118/2014	26
5.1	Considerações de cálculo.....	28
5.2	Consideração da retração como uma variação uniforme de temperatura equivalente.....	28
6	CÁLCULO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES TÉRMICAS	30
6.1	Elementos estruturais padrão.....	30
6.1.1	Elemento de barra (tipo frame).....	30
6.1.2	Elemento plano (tipo shell)	31

6.2	Deformação específica devido a uma variação uniforme de temperatura ($\epsilon_{\Delta T}$)	31
6.2.1	Considerações de cálculo.....	32
6.3	Reações axiais em um elemento de barra devido a uma variação uniforme de temperatura ($R_{\Delta T}$)	32
6.3.1	Considerações de cálculo.....	33
6.4	Tensão axial em um elemento de barra devido a uma variação uniforme de temperatura ($\sigma_{1\Delta T}$)	33
6.5	Tensão biaxial em um elemento de casca devido a uma variação uniforme de temperatura ($\sigma_{2\Delta T}$)	33
6.5.1	Considerações de cálculo.....	34
6.6	Resistência à tração do concreto ($f_{ct, m}$)	34
7	CÁLCULO DA ÁREA DE AÇO	36
7.1	Área de aço mínima ($A_{s, \text{mín}}$)	36
7.2	Armadura mínima de tração sob deformações impostas ($A_{s, \text{es}}$)	37
7.2.1	Considerações de cálculo.....	37
7.3	Área de aço para elementos em tração pura (A_s)	38
8	VALIDAÇÃO DO SAP2000 v.23 PARA ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES TÉRMICAS	40
8.1	Deformação específica devido a uma variação uniforme de temperatura ($\epsilon_{\Delta T}$)	40
8.2	Reações axiais em um elemento de barra devido a uma variação uniforme de temperatura ($R_{\Delta T}$)	43
8.3	Tensão axial em um elemento de barra devido a uma variação uniforme de temperatura ($\sigma_{1\Delta T}$)	46
8.4	Tensão biaxial em um elemento plano devido a uma variação uniforme de temperatura ($\sigma_{2\Delta T}$)	48
9	AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM DO CONCRETO (ϵ_{es})	51
9.1	Caso particular – Recife-PE	51
9.1.1	Verificação quanto a resistência à tração do concreto ($f_{ct, m}$)	55
9.1.2	Relação entre a retração e a variação de temperatura.....	56

9.2	Influência da umidade relativa do ar e da temperatura ambiente na retração por secagem do concreto	57
10	ANÁLISE COMPARATIVA DA ÁREA DE AÇO	60
10.1	Área de aço mínima ($A_{s, \text{mín}}$).....	60
10.2	Armadura mínima de tração sob deformações impostas ($A_{s, \text{ecs}}$).....	61
10.3	Armadura de tração devido à retração (A_s)	61
10.4	Comparativo entre $A_{s, \text{mín.}} \times A_{s, \text{ecs}} \times A_s$	62
11	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

Entende-se como retração do concreto a redução volumétrica sofrida por um elemento de concreto devido a perda da água de amassamento. Seu início ocorre momentos após a concretagem com o início das reações químicas de pega e estende-se por toda vida útil da estrutura devido a interação ambiente-estrutura.

O processo de retração do concreto resulta no aparecimento de forças de tração no material. Essas forças, assim como outros esforços, podem ser absorvidas pelo próprio concreto, quando a resistência à tração material é maior do que a tensão gerada pelo processo de retração (RECENA, 2014). Quando a resistência à tração do concreto não é suficiente para combater os esforços devido a retração, o concreto rompe formando fissuras que comprometem a estética, a estanqueidade e a durabilidade da estrutura. Neste caso, deve-se dimensionar uma armadura suficiente para absorver as tensões devido a retração, de modo a evitar a fissuração do concreto.

Entretanto, verificar a necessidade de uma armadura para resistir os esforços de retração não é uma tarefa simples, uma vez que a retração do concreto depende de diversos fatores, entre eles, o tempo de cura do concreto, a umidade relativa do ar, a temperatura ambiente, a espessura do elemento estrutural, a consistência do concreto no momento do lançamento, a relação água/cimento, entre outros. Variáveis que tornam a verificação da fissuração de retração cansativa e imprecisa.

Os fatores que influenciam na retração do concreto atuam em diferentes momentos da vida útil da estrutura, cada um a sua maneira, resultando em 5 tipos diferentes de retração, sendo a retração total a soma de todas elas. A saber, cita-se a retração plástica, a retração autógena, a retração térmica, a retração por carbonatação e a retração por secagem. Sendo esta última parcela a mais expressiva de todas. Em virtude disto, a NBR 6118/2014 apresenta em sua metodologia apenas os cálculos referentes a retração por secagem, calculada em função da umidade relativa do ar, da consistência do concreto no lançamento e da espessura fictícia da peça.

Como forma de facilitar a análise do efeito da retração do concreto, propõe-se neste trabalho estabelecer uma relação entre a retração por secagem do concreto e uma variação uniforme de temperatura capaz de produzir a mesma deformação específica. Esta relação permite introduzir os efeitos da retração a um modelo analítico gerado através do SAP2000 v.23, como forma de considerar as tensões devido a retração por secagem do concreto no dimensionamento final de estruturas em concreto armado. O uso do SAP2000 v.23 para o dimensionamento de estruturas em concreto armado traz como principais vantagens uma maior

agilidade e precisão na análise dos esforços atuantes, uma vez que possibilita avaliar tantas combinações de ações quanto se queira, permitindo maior número de verificações dos estados limites e estágios de construção, reduzindo a quantidade de simplificações de cálculo por permitir configurações mais próximas à realidade quanto à superposição dos efeitos em comparação aos cálculos manuais. O software dispõe ainda da visualização tridimensional das deformações da estrutura para cada caso de carga, além de analisar os elementos estruturais trabalhando em conjunto.

Além disso, é apresentado um estudo do comportamento da retração por secagem do concreto considerando diferentes tempos de cura úmida, bem como variações na umidade relativa do ar e na temperatura ambiente. Culminando com um comparativo da área de aço necessária para resistir os esforços de retração com os valores mínimos estabelecidos pela NBR 6118/2014.

1.1 Justificativa e motivação

As fissuras são uma das principais manifestações patológicas em estruturas de concreto armado. Seu aparecimento compromete as estruturas quanto à estética, à estanqueidade e à sua durabilidade. Dentre as causas mais relevantes para formação de fissuras no concreto pode-se citar a retração, ocorrendo sempre que as tensões oriundas da redução de volume do elemento ultrapassam o limite da resistência à tração do concreto, resultando na ruptura do material por excesso de tração.

Sendo o concreto armado o principal material usado para construção de reservatórios em nosso país, tanto para armazenamento de água potável como para reservação e tratamento de águas residuárias, são inúmeros os problemas de ineficiência das estruturas devido à falta de estanqueidade. Entre outras coisas, a perda de estanqueidade devido à fissuração resulta em problemas de poluição ambiental e saúde pública, uma vez que um eventual vazamento em estruturas que comportam esgoto doméstico ou industrial por exemplo pode vir a ser um agente contaminante do solo e de aquíferos utilizados para o abastecimento humano.

Frente a isso, é essencial averiguar a influência da retração no dimensionamento de estruturas em concreto armado, a fim de assegurar a estanqueidade das estruturas destinadas à reservação, com o objetivo de mitigar as consequências de possíveis vazamentos ou infiltrações, garantindo um armazenamento seguro até a destinação final.

1.2 Objetivos gerais e específicos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar a influência da retração por secagem no dimensionamento de estruturas em concreto armado nas condições climáticas de Recife-PE. Para tal, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- Validar o uso do SAP2000 v.23 para análise de tensões e deformações térmicas em elementos de barra e de casca;
- Averiguar a necessidade da consideração da retração por secagem no cálculo da área de aço de estruturas de concreto armado;
- Investigar a influência do tempo de cura úmida, da umidade relativa do ar e da temperatura ambiente na retração por secagem do concreto;
- Estabelecer uma relação entre a deformação devido a retração por secagem do concreto e uma determinada variação uniforme de temperatura para modelagem no SAP2000 v.23;
- Analisar o impacto da retração por secagem no valor final da área de aço a ser utilizada.

2 TIPOS DE CARREGAMENTO (AÇÕES)

Para que seja feito o dimensionamento de peças estruturais é necessário conhecer todas as ações que atuam sobre o dado elementos, a fim de avaliar a influência de cada uma delas na estabilidade, funcionalidade e segurança da estrutura. Tais ações se diferenciam quanto a sua variabilidade no tempo, sendo estas classificadas pela NBR 8681/2003 como: permanentes, variáveis e excepcionais.

2.1 Ações permanentes

São consideradas ações permanentes aquelas que possuem valor constante ou que apresentam um pequeno desvio padrão, ao longo de toda vida útil da construção, bem como as ações que seu valor aumenta com o tempo, até atingir um valor limite constante.

As ações permanentes podem ainda se dividir em diretas e indiretas. Como ações permanentes diretas cita-se o peso próprio, o peso de elementos construtivos fixos e de instalações permanentes e os empuxos permanentes. Como ações permanentes indiretas cita-se a retração e a fluência do concreto, o deslocamento dos apoios, as deformações geométricas (global, local e de momento mínimo) e de protensão.

2.2 Ações variáveis

São consideradas ações variáveis aquelas que possuem desvio padrão significativo, durante toda vida da construção. Quanto a sua probabilidade de ocorrência, as ações variáveis podem ser classificadas como normais ou especiais: Sendo estas:

- Ações variáveis normais: quando a probabilidade de ocorrência é grande o suficiente para que seus efeitos sejam obrigatoriamente considerados no dimensionamento de um dado tipo de construção; e
- Ações variáveis especiais: ações sísmicas ou cargas accidentais de natureza ou de intensidade especiais, consideradas apenas quando cabíveis.

A NBR 6118/2014 diferencia ainda as ações variáveis como diretas e indiretas. Onde, são consideradas ações variáveis diretas as cargas accidentais para o uso da construção, o vento, a água e as ações que variam durante a construção. E, como ações variáveis indiretas as variações uniformes de temperatura, variações não uniformes de temperatura e as ações dinâmicas.

2.3 Ações excepcionais

São consideradas ações excepcionais aquelas que apresentam baixíssima probabilidade de ocorrência com duração extremamente curta, durante toda vida útil da construção, mas que para determinadas estruturas, devem ser consideradas para efeito de cálculo. São essas ações que não podem ser controladas por outros meios, sendo seus valores determinados por normas específicas.

3 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE TENSÃO E DEFORMAÇÃO

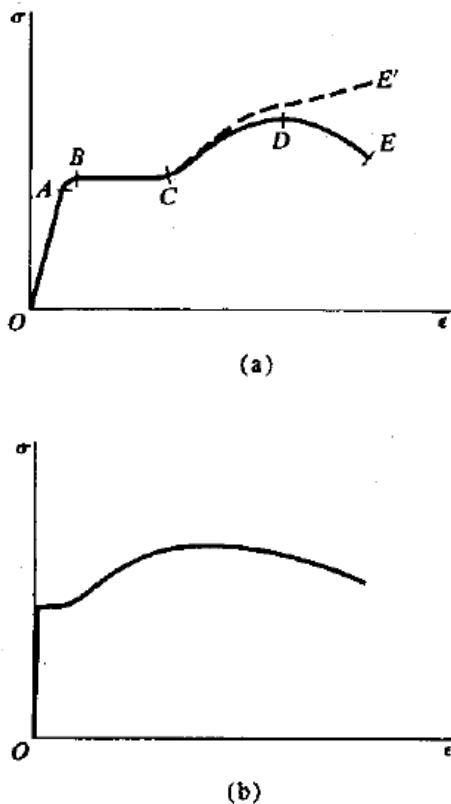
As definições de tensão e deformação são umas das mais clássicas da mecânica dos sólidos, podendo ser descritas como a resposta de um elemento sólido submetido a uma ação atuante (direta, indireta ou excepcional), se manifestando na forma de deformação. Isto é, um corpo em repouso sobre a ação de um esforço solicitante distribuído ou concentrado, tende a reagir de modo a dissipar esta ação ao longo de toda peça, resultando em deformações de alongamento ou encurtamento, reversíveis ou não, a depender da intensidade, duração e distribuição do esforço solicitante.

Timonshenko (1983) define tensão como o efeito de uma força P distribuída uniformemente sobre uma área A , podendo esta estar locada no centro geométrico da seção, resultando num esforço de tração-compressão, ou ainda, deslocada em relação ao centro geométrico da seção atuante, configurando um esforço de flexão. Já a deformação é a variação do comprimento deste elemento, podendo este ser de alongamento ou encurtamento da peça. Segundo Leonhardt e Mönning (1977), as deformações distinguem-se ainda em:

- Deformações elásticas: devido a carregamentos ou variação de temperatura. Completamente reversíveis após a retirada da ação solicitante;
- Deformações plásticas: devido a cargas elevadas de curta duração. Parcela irreversível, mesmo após o alívio de tensão;
- Deformações dependentes do tempo: decorrente das mudanças químicas da argamassa. Em especial, cita-se a retração do concreto.

A relação entre a tensão e a deformação depende principalmente do tipo de material empregado, podendo apresentar comportamentos distintos a depender da umidade relativa do ar, temperatura ambiente, entre outros fatores. A Figura 1 demonstra o diagrama de tensão-deformação com o comportamento típico de uma barra de aço estrutural sujeita a tração pura.

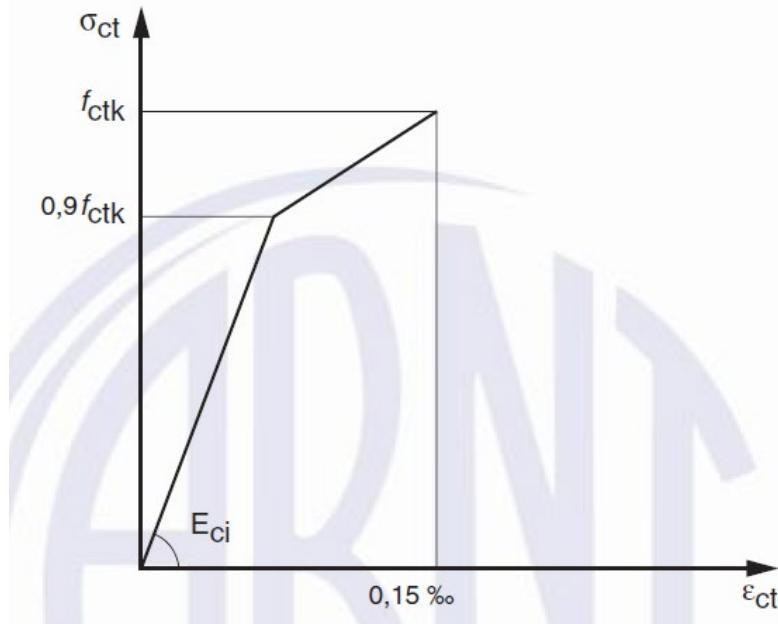
Figura 1 – Diagrama tensão-deformação típico do aço estrutural: (a) fora de escala; (b) em escala



Fonte: Timonshenko (1983)

Ao observar a Figura 1(a), é possível identificar no trecho inicial do gráfico (OA) o intervalo de tensões correspondentes as deformações plásticas, trecho onde as deformações são elásticas e a deformação do material é proporcional a tensão aplicada, sendo a inclinação do diagrama neste trecho denominada de módulo de elasticidade do material (E), propriedade inversamente proporcional a deformação do material e, o ponto A, chamado de limite de proporcionalidade. Após este ponto, no trecho AB, as deformações crescem mais rápido que o acréscimo de tensões, até que chegue à tensão de escoamento (ponto B), A partir desta encontra-se o intervalo de deformações plásticas (trecho BC), neste instante as deformações não são mais reversíveis, acrescendo até chegar ao ponto C. Daí em diante o material necessita de maiores variações de tensão para aumentar a deformação, até que chegue ao limite de tensão máxima do material (ponto D), a partir do qual a tensão decai enquanto a deformação cresce até a ruptura do aço. Diferente do aço, para o concreto no estado não fissurado, o diagrama de tensão-deformação apresenta um comportamento bilinear para esforço de tração, apresentando apenas o patamar elástico, seguindo diretamente para ruptura, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Diagrama tensão-deformação bilinear do concreto em tração



Fonte: NBR 6118 (2014)

Quando a tensão limite suportado pelo material se dá a baixas deformações classifica-se o material como frágil, enquanto aos materiais que suportam grandes deformações antes da ruptura do elemento denomina-se material dúctil. Como exemplo de material frágil pode-se citar o concreto submetido a tensão de tração, enquanto o aço é classificado como material dúctil, por suportar deformações de alongamento elevadas. Conhecer este comportamento dos materiais possibilita dimensionar peças de acordo com a sua finalidade, combinando os materiais a fim de atingir a performance desejada sempre que necessário, como a exemplo do concreto armado.

3.1 Tipos de tensão

As tensões podem atuar apenas em uma direção, coincidente ou paralela ao eixo do elemento (tensão axial), em duas direções paralelas aos eixos do elemento, atuando por tanto no plano (tensão biaxial), entre outras formas. De modo direto, neste trabalho, serão abordadas apenas as tensões axiais e biaxiais, deixando-se claro que não são os únicos tipos existentes.

3.1.1 Tensão axial

A tensão axial é o resultado de uma força perpendicular a seção transversal do elemento, é dita como tração quando sua ação tende a alongar a peça e, de compressão, quando provoca o encurtamento da peça. Quando seu ponto de aplicação coincide com o eixo da peça e, atua de maneira uniforme sobre toda seção transversal, diz-se tração-compressão pura. Quando excêntrica, diz-se flexão simples. Este tipo de tensão está associada a elementos estruturais lineares (elementos de barra) e a modelos de cálculo como o da Lei de Hooke.

Figura 3 – Elemento sujeito a tensão axial

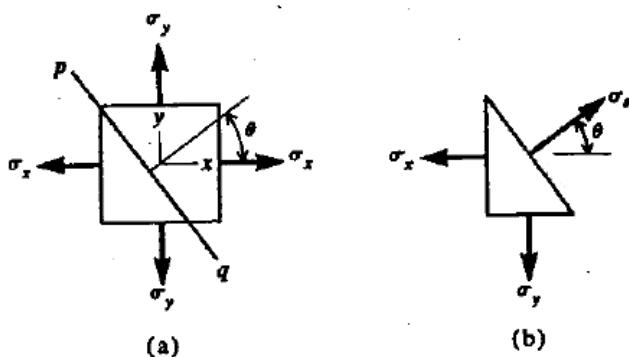


Fonte: Adaptada de Timonshenko (1983)

3.1.2 Tensão biaxial

A tensão biaxial é o resultado de uma força oblíqua aos eixos principais de inércia do elemento, tem como principal característica a correlação existente entre as deformações nas duas direções do plano. Tal relação se dá devido ao encurtamento da peça em uma direção em favor do alongamento da direção complementar. A este comportamento dá-se o nome de efeito de Poisson (ν), expresso como a relação entre a deformação lateral e a deformação principal.

Figura 4 – Elemento sujeito a tensões biaxiais: (a) plano inclinado pq perpendicular a força que provoca a tensão; (b) tensões normais atuando no elemento



Fonte: Adaptada de Timonshenko (1983)

4 RETRAÇÃO DO CONCRETO

Leonhardt e Mönning (1977) definem a retração como sendo a redução do volume final do elemento causada pela evaporação da água não consumida pela reação química de pega do concreto, não estando relacionado ao carregamento do elemento, mas sim ao tempo a partir do qual a peça foi concretada.

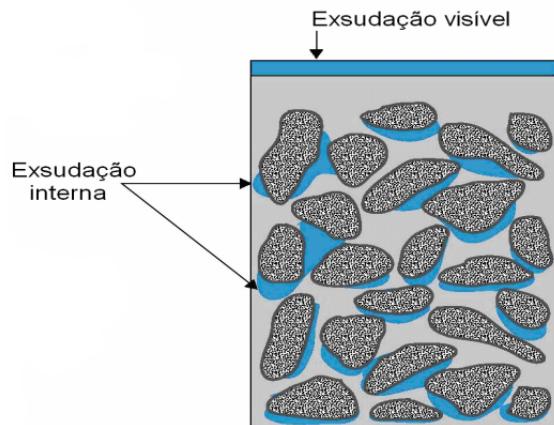
4.1 Tipos e fatores que influenciam na retração do concreto

Machado (2016) divide a retração em 5 tipos distintos, sendo a retração total a soma das seguintes parcelas: retração plástica, retração química (autógena), retração térmica, retração de carbonatação e retração por secagem.

4.1.1 Retração plástica

A retração plástica caracteriza-se pela exsudação da água contida no concreto enquanto ainda fresco, isto é, momentos antes do início da pega. A evaporação da água de amassamento através da superfície livre da peça, ou ainda a absorção da água pelos agregados ou pela fôrma (quando de madeira), leva a contração do concreto nesta área, sendo essa perda mais crítica para o concreto o quanto antes ela ocorrer.

Figura 5 – Exsudação da água de amassamento do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro (2006)

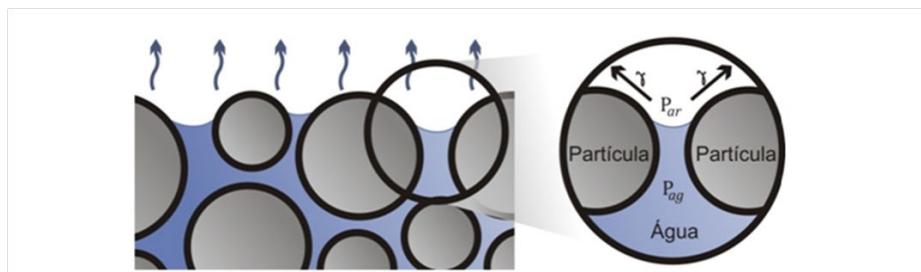
Alguns fatores podem acelerar essa evaporação da água, como por exemplo a largura da superfície em contato da peça com o ar, condições climáticas como a temperatura ambiente, a velocidade do vento, além da exposição direta ao sol. Outro fator que influencia na retração plástica é a relação água/cimento. Embora uma alta relação água/cimento seja prejudicial em termos de resistência, em termos de retração plástica ajuda a diminuir seus efeitos, uma vez que essa alta taxa compensa a água perdida na exsudação, enquanto uma baixa relação água/cimento não deixa margens para perdas.

4.1.2 Retração química (autógena)

A retração autógena é definida como uma variação do volume sem perda de umidade para o ambiente sendo, portanto, de natureza exclusivamente química (VIEIRA, 2018). Ocorre durante o processo de hidratação do cimento, em especial em concretos de alto desempenho, que consume a água formando substâncias como o hidróxido de cálcio, a etringita e o silicato de cálcio hidratado, que possuem volume menor que a água e o cimento, retraindo o concreto. Somando-se a este efeito da retração referente ao fenômeno de auto dissecção.

A auto dissecção do concreto é o fenômeno físico-químico que ocorre durante o processo de hidratação do cimento devido à redução da água livre nos poros do concreto, gerando a formação de meniscos capilares cuja tensão superficial faz contrair a pasta (NUNES E FIGUEIREDO, 2007).

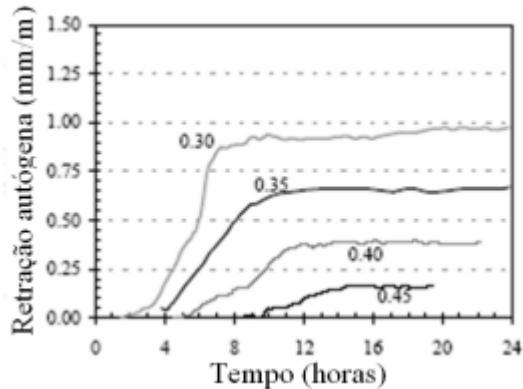
Figura 6 – Esquema de formação dos meniscos entre as partículas do concreto



Fonte: Rodrigues e Bauer (2013)

Dentre os fatores que influenciam na evolução da retração autógena, destaca-se a relação água/cimento, diminuindo os efeitos da retração quanto maior for a relação A/C, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Evolução da retração autógena com diferentes relações A/C



Fonte: ISHIDA *at all* (1997)

4.1.3 Retração térmica

A retração térmica ocorre devido a liberação de calor proveniente do processo de endurecimento do concreto. Durante o período de pega ocorrem reações químicas exotérmicas que, inicialmente, provocam um aumento no volume do elemento estrutural. Este excesso de calor é transmitido do interior do objeto para o ambiente, diminuindo assim de volume durante o resfriamento.

4.1.4 Retração de carbonatação

Para Santos (2017), a retração por carbonatação do concreto tem como causa a reação entre o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente na pasta do cimento hidratado com o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera, resultando em carbonato de cálcio (CaCO_3), composto químico com menor volume que os reagentes. Sua ocorrência depende da existência de umidade e seu avanço ocorre da superfície do elemento para o interior da peça estrutural com o avanço do processo.

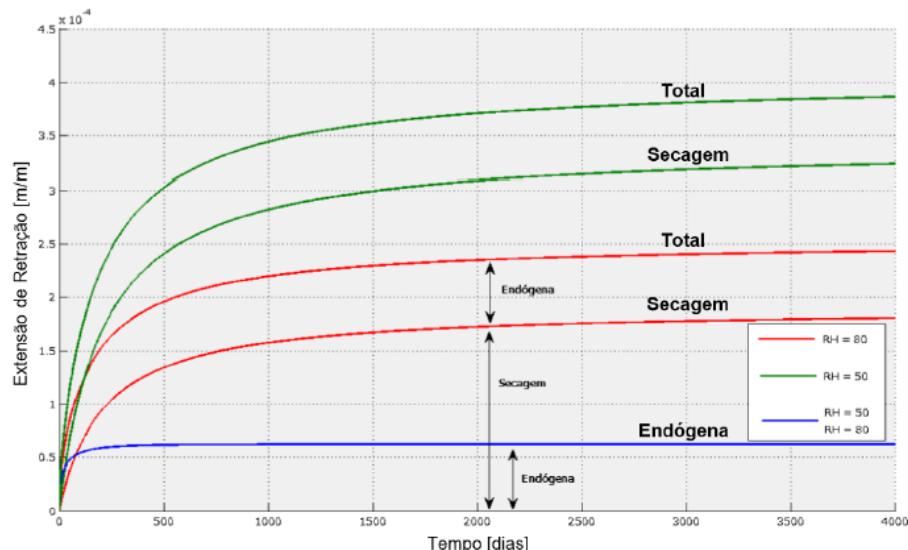
4.1.5 Retração por secagem

Segundo Bisschop (2003), a retração por secagem pode ser definida como a deformação dependente do tempo devido à perda de água do concreto para o ambiente em condições de temperatura e umidade relativa do ar constantes.

Machado (2016) acrescenta que a retração por secagem do concreto é um processo duradouro com tendência de estabilização após vários anos, além de ser a maior parcela da retração total do concreto (Figura 8), sendo mais expressiva quanto maior for a relação água/cimento.

Ainda segundo Machado (2016), a retração por secagem do concreto não é uniforme ao longo da espessura, deste modo a superfície da peça tende a retrair mais rápido que o núcleo, uma vez que as faces externas estão em contato direto com o ar e as ações do vento, umidade relativa do ar e temperatura ambiente. Concluindo que, quanto maior a espessura do elemento, maior a variação da tensão de tração ao longo da espessura.

Figura 8 – Evolução da retração total ao longo tempo, para diferentes condições de umidade



Fonte: Machado (2016)

4.2 NBR 6118/2014 x EUROCODE

A NBR 6118/2014 trata em seu anexo A, entre outras coisas, sobre a retração do concreto. Nela, define-se como hipóteses básicas que o valor da retração do concreto depende dos seguintes fatores:

- Umidade relativa do ar;
- Consistência do concreto no lançamento; e
- Espessura fictícia da peça.

Todavia, não se especifica no anexo A da NBR 6118/2014 quais parcelas da retração são levadas em consideração pelo método ali demonstrado. No entanto, ao comparar o método empregado pela norma brasileira com a metodologia de cálculo disposta no EN 1992-1-1 (2010), percebe-se que, enquanto a norma europeia trata a retração total como a soma da retração por secagem do concreto e a retração autógena, a norma brasileira leva em consideração apenas a retração por secagem. Esta simplificação feita pela NBR é possivelmente atribuída ao fato de a retração por secagem representar a maior parcela da retração total, enquanto a retração autógena ocorre apenas nos primeiros dias após a concretagem, sem sofrer influência do meio externo, como pode ser observado na Figura 8.

5 CÁLCULO DA RETRAÇÃO DO CONCRETO SEGUNDO A NBR 6118/2014

Para o cálculo da retração do concreto foi empregada a metodologia exposta no Anexo A da NBR 6118/2014, que considera a retração ao longo do tempo como sendo a retração por secagem do concreto, como explicado no item 4.2. A sequência de cálculo encontra-se descrita a seguir.

$$\varepsilon_{cs}(t, t_0) = \varepsilon_{cs\infty} \times [\beta_s(t) - \beta_s(t_0)] \quad (1)$$

Sendo,

$$\varepsilon_{cs\infty} = \varepsilon_{1s} \times \varepsilon_{2s} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{1s} = \frac{1}{10^4} \times \left(-8,09 + \frac{U}{15} - \frac{U^2}{2284} - \frac{U^3}{133765} + \frac{U^4}{7608150} \right) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{2s} = \frac{33 + 2 \times h_{fic}}{20,8 + 3 \times h_{fic}} \quad (4)$$

$$\beta_s(t) = \frac{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + A\left(\frac{t}{100}\right)^2 + B\left(\frac{t}{100}\right)}{\left(\frac{t}{100}\right)^3 + C\left(\frac{t}{100}\right)^2 + D\left(\frac{t}{100}\right) + E} \quad (5)$$

Onde,

- $\varepsilon_{cs}(t, t_0)$ é o valor da retração ocorrido no instante de tempo t , para um tempo de cura úmida t_0 ;
- $\varepsilon_{cs\infty}$ é o valor total da retração no tempo infinito;
- ε_{1s} considerando um abatimento entre 5 cm e 9 cm e $40\% \leq U \leq 90\%$;
- h_{fic} a espessura fictícia da peça, expressa em cm;
- $\beta_s(t)$ e $\beta_s(t_0)$ são relativos à retração nos instantes t e t_0 ;
- t é a idade fictícia do concreto na idade de análise, em dias;
- t_0 é a idade fictícia do concreto no momento em que a retração começa a agir (imediatamente após o término da cura úmida), também chamado de grau de maturidade do concreto, expressa em dias;
- $A = 40$;
- B, C, D e E são respectivamente,

$$B = 116h^3 - 282h^2 + 220h - 4,8 \quad (6)$$

$$C = 2,5h^3 - 8,8h + 40,7 \quad (7)$$

$$D = -75 + 585h^2 + 496h - 6,8 \quad (8)$$

$$E = -169h^4 + 88h^3 + 584h^2 - 39h + 0,8 \quad (9)$$

Com h (espessura fictícia), especialmente para B , C , D e E , expressa em metros, respeitando o seguinte intervalo: $0,05 \text{ m} \leq h \leq 1,6 \text{ m}$.

Quanto ao cálculo da h_{fic} , tem-se que:

$$h_{fic} = \gamma \times \frac{2 \times A}{u_{ar}} \quad (10)$$

Sendo,

$$\gamma = 1 + e^{-7,8+0,1U} \quad (11)$$

Onde,

γ é valido para valores de $U \leq 90\%$;

A é a área da seção transversal da peça; e

u_{ar} é a parte do perímetro esterno da seção transversal que está em contato com o ar;

No tocante ao cálculo do grau de maturidade (idade fictícia), a NBR 6118/2014 defini que:

$$t = \alpha \sum_i \frac{T_i + 10}{30} \times \Delta t_{ef,i} \quad (12)$$

Dos quais,

t é a idade fictícia, em dias;

α é o coeficiente relativo à velocidade de endurecimento do cimento, fixado em $\alpha=1$ pela NBR 6118/2014 (Tabela A.2) para todos os tipos de cimento, para análises de retração;

T_i é a temperatura média diária do ambiente, em graus Celsius;

$\Delta t_{ef,i}$ é o intervalo de tempo durante o qual a T_i se manteve constante, em dias.

5.1 Considerações de cálculo

Para o cálculo do u_{ar} , adotou-se como critério de medição a soma das duas arestas maiores da seção transversal do elemento, considerando a continuidade da peça para ambos os lados nas faces menores. Tal seção foi definida para os elementos de casca como um trecho da seção total do elemento de casca padrão, medindo 20 cm x 100 cm, a fim de avaliar a retração em termos da deformação específica ε_{cs} .

Quanto ao cálculo da t , fez-se as seguintes considerações:

- Para a T_i : considerou-se o intervalo de -5 °C a 50 °C de modo a abranger as mais diversas situações climáticas, com valores calculados a cada 5 °C;
- Para t_0 : admitiu-se que a T_i se manterá constante durante os seguintes intervalos de tempo ($\Delta t_{ef,0}$): 3 dias, 7 dias, 14 dias e 28 dias (intervalos de tempo de cura úmida usuais);
- Para t : admitiu-se que a T_i se manterá constante durante os seguintes intervalos de tempo (Δt_{ef}): 28 dias, 90 dias (3 meses), 180 dias (6 meses), 270 dias (9 meses), 365 dias (1 ano), 730 dias (2 anos), 1825 dias (5 anos), 3650 dias (10 anos), 7300 dias (20 anos), 10950 dias (30 anos), 14600 dias (40 anos) e 18250 dias (50 anos, que equivale ao tempo de vida útil do concreto).

5.2 Consideração da retração como uma variação uniforme de temperatura equivalente

A fim de aplicar o efeito da deformação devido a retração por secagem do concreto a um modelo em elementos finitos utilizando o SAP2000 v.23, optou-se por estabelecer uma relação direta entre a retração por secagem do concreto e uma variação uniforme de temperatura que corresponda ao mesmo efeito de deformação. Esta simplificação é possível pois ambas as ações provocam o mesmo tipo de tensão quando aplicadas ao concreto, além de se tratar de um carregamento de fácil aplicação aos elementos estruturais no SAP2000.

Como estabelecido na equação (17), a deformação específica devida a uma variação de temperatura é função do coeficiente de dilatação térmica do material (α), neste caso o concreto, e a variação de temperatura aplicada. Assim, para que seja encontrada a ΔT que equivale a uma determinada deformação específica, basta apenas dividir essa deformação pelo α . Deste modo:

$$\Delta T = \frac{\varepsilon}{\alpha} \quad (13)$$

De outro modo, sabendo que o coeficiente de dilatação térmica do concreto é um valor constante igual a 10^{-5} , para ε em mm/m, pode-se definir a variação de temperatura equivalente como:

$$\Delta T_{equi.} = \varepsilon \times 10^2 \quad (14)$$

Como se sabe, a deformação específica em questão é a retração por secagem do concreto (ε_{cs}). Podendo a equação (14) ser escrita da seguinte maneira:

$$\Delta T_{equi.} = \varepsilon_{cs} \times 10^2 \quad (15)$$

Como o cálculo da retração por secagem é extenso e depende de diversos fatores, desenvolveu-se como produto deste trabalho, algumas tabelas com valores calculados para a uma parede padrão sob as condições definidas no item 6.1.

6 CÁLCULO DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES TÉRMICAS

Em busca de validar o uso do software comercial SAP2000 v.23 para análises de tensões e deformações oriundas de uma variação de temperatura uniformemente distribuída, utilizou-se alguns modelos de calibração para que fosse avaliada a compatibilidade dos resultados obtidos para elementos lineares (tipo frame) e elementos planos (tipo shell). Adotou-se para isso dois elementos estruturais como padrão, para que a partir destes fosse calculado pelos métodos clássicos as seguintes grandezas:

- Deformação específica devida a uma variação uniforme de temperatura ($\epsilon_{\Delta T}$);
- Reações axiais em um elemento de barra devido a uma variação uniforme de temperatura ($R_{\Delta T}$);
- Tensão axial em um elemento de barra devido a uma variação uniforme de temperatura ($\sigma_{1\Delta T}$);
- Tensão biaxial em um elemento de casca devido a uma variação uniforme de temperatura ($\sigma_{2\Delta T}$).

Tais resultados servirão como parâmetro de comparação para os valores obtidos a partir dos modelos de calibração em elementos finitos via SAP2000 v.23.

6.1 Elementos estruturais padrão

Para os dois elementos estruturais descritos a seguir aplica-se: concreto estrutural com resistência característica a compressão aos 28 dias (f_{ck}) variando entre 20 MPa e 90 MPa, com seção homogênea (concreto simples). Ambos expostos as condições de variação de temperatura e umidade relativa do ar ambiente.

6.1.1 Elemento de barra (tipo frame)

Como elemento de barra define-se daqui em diante uma viga com seção transversal de 20 cm de base e 50 cm de altura, medindo 5,0 m de comprimento. Podendo esta assumir duas condições de contorno:

- I. Engaste-apoio;
- II. Bi-engastada.

6.1.2 Elemento plano (tipo shell)

Como elemento plano define-se daqui em diante uma parede com 20 cm de espessura, 3,0 m de altura e 5,0 m de comprimento. Podendo esta assumir duas condições de contorno:

- I. Parede livre (permitindo a deformação no plano xz);
- II. Parede engastada (restringindo a deformação em todos os bordos).

6.2 Deformação específica devido a uma variação uniforme de temperatura ($\varepsilon_{\Delta T}$)

Tomando como ponto de partida o elemento de barra e o elemento plano, ambos sob a condição de contorno I (engaste-apoio / parede livre), expostos a uma variação de temperatura ΔT , é possível observar uma deformação de alongamento, para valores de ΔT positivo, e encurtamento, ao considerar valores de ΔT negativos. Esta deformação é denominada de deformação térmica ($\delta_{\Delta T}$) e seu valor é proporcional ao comprimento do elemento, como pode ser observado na equação (16). Entretanto, se faz mais interessante analisar esta grandeza em termos de deformação específica. A qual determina a deformação sofrida por comprimento linear, levando em consideração apenas o tipo do material do elemento, como mostra a equação (17).

$$\delta_{\Delta T} = \varepsilon_{\Delta T} \times L \quad (16)$$

$$\varepsilon_{\Delta T} = \alpha \times \Delta T \quad (17)$$

Onde,

$\delta_{\Delta T}$ é a deformação térmica;

$\varepsilon_{\Delta T}$ é a deformação específica devido a uma variação uniforme de temperatura;

L é o comprimento ao longo do qual a variação de temperatura atua;

α é o coeficiente de dilatação térmica do material;

ΔT é a variação uniforme de temperatura a qual o elemento está submetido.

6.2.1 Considerações de cálculo

Para o cálculo da $\varepsilon_{\Delta T}$ dos elementos padrão foi considerado um $\alpha = 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ (coeficiente de dilatação térmica referente ao concreto), bem como valores de ΔT variando entre $5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, calculando as $\varepsilon_{\Delta T}$ a cada intervalo de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

6.3 Reações axiais em um elemento de barra devido a uma variação uniforme de temperatura ($R_{\Delta T}$)

Agora supondo que a barra se encontra sob a condição de contorno II (bi engastada). Isto é, a partir de agora existem restrições nas extremidades da barra que impedem as deformações de alongamento e encurtamento, resultando no surgimento de tensões internas responsáveis por equilibrar e conter essas deformações, para que a deformação total seja nula. Assim, tem-se que:

$$\delta_{total} = \delta_{\Delta T} - \delta_R \quad (18)$$

Admitindo que a tensão resultante da $\delta_{\Delta T}$ é uniformemente distribuída em toda seção transversal da barra, tem-se então que a tensão (σ) é a razão entre a resultante (R) e a área da seção transversal da barra (A) sob a qual ela é aplicada (equação (19)),

$$\sigma = \frac{R}{A} \quad (19)$$

Como é sabido, segundo a lei de Hooke, a tensão (σ) equivale ao produto do módulo de elasticidade do material (E) pela deformação específica (ε) ocorrida (equação (20)).

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (20)$$

Deste modo, após algumas manipulações algébricas, obtém-se a equação que determina a força resultante no engaste devido a uma variação de temperatura ao longo da barra em função da área da seção transversal da barra (A) e do módulo de elasticidade do material (E), conforme descrito na equação (21).

$$R = \varepsilon_{\Delta T} \times A \times E \quad (21)$$

6.3.1 Considerações de cálculo

Conforme recomendado pela NBR 6118/2014, para a análise do comportamento de um elemento estrutural ou seção transversal, pode ser adotado um módulo de elasticidade único para os esforços de tração e compressão, sendo este igual ao módulo de deformação secante (E_{cs}). O qual é calculado conforme a equação (22)

$$E_{cs} = \alpha_i \times E_{ci} \quad (22)$$

Onde,

$$\alpha_i = 0,8 + 0,2 \times \frac{f_{ck}}{80} \leq 1 \quad (23)$$

$$E_{ci} = \alpha_E \times 5600 \times \sqrt{f_{ck}} \quad (24)$$

para f_{ck} entre 20 MPa e 50 MPa, e

$$E_{ci} = 21,5 \times 10^3 \times \alpha_E \times \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \quad (25)$$

para f_{ck} entre 55 MPa e 90 MPa. Sendo, $\alpha_E = 1$, admitindo como agregado graúdo granito e gnaisse.

6.4 Tensão axial em um elemento de barra devido a uma variação uniforme de temperatura ($\sigma_{1\Delta T}$)

Uma vez calculada a reação axial no engaste, seguindo a relação exposta na equação (19), é possível inferir o valor da tensão axial que está atuando em um elemento de barra devido a uma $\sigma_{1\Delta T}$ por meio da substituição direta dos valores na equação.

6.5 Tensão biaxial em um elemento de casca devido a uma variação uniforme de temperatura ($\sigma_{2\Delta T}$)

Para que sejam avaliadas as tensões geradas por uma ΔT atuando sob a superfície de um elemento plano (tipo shell), toma-se como método de cálculo o estado de tensões biaxiais, onde os esforços de tração e compressão estão restritos ao plano xy .

Conforme demonstrado por Timonshenko (1983), considerando ainda que a lei de Hooke é válida, tem-se que, as tensões nas direções x e y são definidas como descrito nas equações (26) e (27).

$$\sigma_x = \frac{(\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) x E}{1 - \nu^2} \quad (26)$$

$$\sigma_y = \frac{(\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) x E}{1 - \nu^2} \quad (27)$$

Onde,

σ_x e σ_y são respectivamente, as tensões nas direções x e y;

ε_x e ε_y correspondem as deformações específicas nas direções x e y, provocadas por uma ΔT ;

E é o módulo de elasticidade; e

ν o coeficiente de Poisson.

6.5.1 Considerações de cálculo

Para todos os cálculos envolvendo tensões biaxiais em um elemento de casca devido a uma variação uniforme de temperatura, admitiu-se:

- Plano de trabalho: plano xz, uma vez que a análise é referente a uma parede;
- Deformações específicas iguais para as duas direções, isto é, $\varepsilon_x = \varepsilon_z = \varepsilon_{\Delta T}$. E por tanto,
- $\sigma_x = \sigma_z = \sigma_{2\Delta T}$;
- Módulo de elasticidade $E = E_{cs}$, conforme exposto anteriormente; e
- Coeficiente de Poisson $\nu = 0,2$ conforme recomendado pela NBR 6118/2014.

Assim,

$$\sigma_{2\Delta T} = \frac{(\varepsilon_{\Delta T} + \nu \varepsilon_{\Delta T}) x E_{cs}}{1 - \nu^2} \quad (28)$$

6.6 Resistência à tração do concreto ($f_{ct,m}$)

Na falta de ensaios que possibilitem determinar o valor da resistência à tração direta do concreto (f_{ct}) em função da resistência à tração indireta ($f_{ct,sp}$) ou da resistência à tração na flexão ($f_{ct,f}$), a mesma poderá ser determinada, conforme especificado pela NBR 6118/2014,

como sendo equivalente ao seu valor médio $f_{ct,m}$. A qual é definida em função do f_{ck} como visto nas equações (29) e (30).

$$f_{ct,m} = 0,3 \times f_{ck}^{2/3} \quad (29)$$

Para $f_{ck} \leq 50$ MPa, e

$$f_{ct,m} = 2,12 \times \ln(1 + 0,11 \times f_{ck}) \quad (30)$$

para $55 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 90 \text{ MPa}$.

Assim, é possível determinar, a partir da lei de Hooke, o valor da deformação de retração máxima ($\varepsilon_{máx}$), para o estado axial de tensões (equação (31)) e para o estado biaxial de tensões (equação (32)), de acordo com cada f_{ck} . Logo,

$$\varepsilon_{máx} = \frac{f_{ctm}}{E_{cs}} \quad (31)$$

$$\varepsilon_{máx} = \frac{f_{ctm} \times (1 - \nu^2)}{E_{cs} \times (1 + \nu)} \quad (32)$$

7 CÁLCULO DA ÁREA DE AÇO

7.1 Área de aço mínima ($A_{s,\min}$)

A NBR 6118/2014 estabelece uma taxa de aço mínima necessária para garantir o escoamento da peça de acordo com o f_{ck} utilizado, isto é, uma taxa de aço mínima necessária evitar a ruptura brusca do concreto após a formação da primeira fissura. Esta taxa mínima corresponde a área de aço necessária para resistir ao momento mínimo capaz de produzir a ruptura da seção de concreto simples, sendo este valor não inferior a 0,15%. A área de aço mínima é, portanto, calculada em função da taxa mínima aço (ρ_{\min}) e da geometria do elemento estrutural, conforme descrito pela equação (33).

$$A_{s,min} \geq \rho_{\min} \cdot b \cdot h \quad (33)$$

Os valores da ρ_{\min} equivalente a cada f_{ck} encontram-se na Tabela 1, adaptada da NBR 6118/2014. Esses valores são definidos, considerando o uso de aço CA-50, relação $d/h = 0,8$, $\gamma_c = 1,4$ e $\gamma_s = 1,15$.

Tabela 1 – Taxa mínima de aço

f_{ck} (MPa)	ρ_{\min} (%)
20	0,150
25	0,150
30	0,150
35	0,164
40	0,179
45	0,194
50	0,208
55	0,211
60	0,219
70	0,233
80	0,245
90	0,256

Fonte: Adaptado de NBR 6118:2014

A norma permite, no entanto, que esta taxa mínima não seja atingida apenas nos casos em que a armadura é calculada para suportar um momento fletor maior ou igual ao dobro do momento fletor de projeto, exceto no caso de elementos em balanço.

7.2 Armadura mínima de tração sob deformações impostas ($A_{s, \text{ecs}}$)

Por se tratar de uma análise de deformações oriunda da retração por secagem do concreto, faz-se necessário o cálculo da área de aço de tração sob deformações impostas, seguindo as diretrizes impostas pela NBR 6118/2014, que determina um valor mínimo para esta armadura de tração desde que sejam tomadas medidas tecnológicas que restrinjam esses esforços, conforme descrito a seguir, a partir da equação (34).

$$A_{s, \text{ecs}} = k \times k_c \times f_{ct, \text{ef}} \times \frac{A_{ct}}{\sigma_s} \quad (34)$$

Onde,

$A_{s, \text{ecs}}$ é a área de aço na zona tracionada (devido a retração);

k é o coeficiente relacionado a forma como a tensão de tração é gerada (deformação imposta intrínseca ou extrínseca);

k_c é o coeficiente que leva em consideração a distribuição das tensões na seção, imediatamente antes da fissuração (tração pura, flexão simples, etc.);

$f_{ct, \text{ef}}$ é a resistência média à tração efetiva do concreto no instante em que se formam as primeiras fissuras;

A_{ct} é a área de concreto na zona tracionada; e

σ_s é a tensão máxima permitida na armadura imediatamente após a formação da fissura.

7.2.1 Considerações de cálculo

Frente a espessura reduzida do elemento padrão ($h = 20$ cm), admitiu-se que a retração ocorre de maneira uniforme sobre toda seção transversal da peça, estando essa, portanto, submetida a condição de tração pura, isto é, A_{ct} é igual a área da seção transversal (A). Essa consideração também implica no valor de $k_c = 1,0$, conforme definido pelo NBR 6118/2014.

Outros valores adotados conforme recomendação da NBR 6118/2014 são:

- $k = 0,8$: seção retangular, com $h \leq 0,3$ m, submetida a deformações impostas de natureza intrínseca (retração por secagem do concreto); e
- $f_{ct,ef} = 3$ MPa: valor mínimo para situações onde a idade em que se supõe a ocorrência da fissuração não puder ser definida com valor confiável.

Quanto a σ_s considerar-se-á o disposto na Tabela 2, adaptada da NBR 6118/2014, que determina a tensão máxima permitida na armadura imediatamente após a formação da fissura para cada bitola, para a abertura de fissura máxima não ultrapasse os limites de 0,2 mm ou 0,3 mm. Valores de abertura de fissura máxima exigido para estruturas expostas a classes de agressividade ambiental (CAA) II, III e IV.

Tabela 2 – Diâmetro máximo vs tensão máxima permitida, para $w = 0,2$ mm e $w = 0,3$ mm

σ_s (MPa)	$\varnothing_{\text{máx}}$ (mm)	
	$w = 0,2$ mm	$w = 0,3$ mm
160	25	32
200	16	25
240	12,5	20
280	8	16
320	6	12,5
360	---	10
400	---	8

Fonte: Adaptado de NBR 6118:2014

Para fins de cálculo, determina-se, pois, para a parede padrão, uma abertura de fissura máxima de 0,2 mm e, portanto, CAA IV.

7.3 Área de aço para elementos em tração pura (A_s)

Para tração pura, a área de aço a ser utilizada deverá ser suficiente para que a tensão atuante nas barras seja menor, ou no máximo igual a tensão de escoamento do aço (f_y). Para que isso seja garantido, partindo a equação (19), obtém-se:

$$f_{yd} = \frac{\sigma_{2\Delta T} x A}{A_s} \quad (35)$$

Simplificando a equação, deixando tudo em função de A_s , temos:

$$A_s = \frac{1,15 \times \sigma_{2\Delta T} \times A}{f_{yd}} \quad (36)$$

Onde,

A_s é a área de aço necessária para suportar o esforço de tração;

$\sigma_{2\Delta T}$ é a tensão biaxial as direções x e z, provocadas pela retração por secagem do concreto;

A é a seção transversal do elemento de referência, $A = 2 \times 10^3 \text{ cm}^2$ (trecho da seção transversal da parede padrão medindo 20 cm x 100 cm); e

f_{yd} é a tensão de escoamento de projeto do aço, para CA-50, $f_{yd} = 435 \text{ MPa}$.

8 VALIDAÇÃO DO SAP2000 v.23 PARA ANÁLISE DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES TÉRMICAS

8.1 Deformação específica devido a uma variação uniforme de temperatura ($\varepsilon_{\Delta T}$)

Aplicando o intervalo de ΔT prenunciado no item 7.2.1 a equação (17), obtém-se os valores das deformações específica devido a uma variação uniforme de temperatura ($\varepsilon_{\Delta T}$), apresentados na Tabela 3. Tais valores são necessários para definir a deformação térmica ($\delta_{\Delta T}$) sofrida pelos elementos padrão quando submetidos ao mesmo intervalo de ΔT , como exposto na Tabela 4.

Tabela 3 – Deformação específica devido a variação uniforme de temperatura - $\varepsilon_{\Delta T}$, em mm/m

ΔT (°C)	$\varepsilon_{\Delta T}$ (mm/m)
5	0,05
10	0,10
15	0,15
20	0,20
25	0,25
30	0,30
35	0,35
40	0,40
45	0,45
50	0,50
55	0,55
60	0,60
65	0,65
70	0,70
75	0,75
80	0,80
85	0,85
90	0,90
95	0,95
100	1,00

Fonte: A autora (2022)

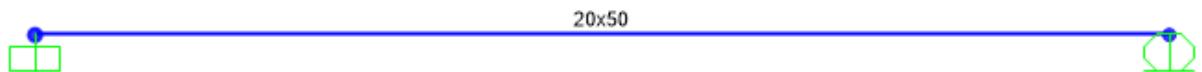
Tabela 4 – Deformação térmica dos elementos padrão - $\delta_{\Delta T}$, em mm

ΔT (°C)	$\epsilon_{\Delta T}$ (mm/m)	$\delta_{\Delta T}$ (mm)		
		Viga		Parede
		x	x	z
5	0,05	0,25	0,25	0,15
10	0,10	0,50	0,50	0,30
15	0,15	0,75	0,75	0,45
20	0,20	1,00	1,00	0,60
25	0,25	1,25	1,25	0,75
30	0,30	1,50	1,50	0,90
35	0,35	1,75	1,75	1,05
40	0,40	2,00	2,00	1,20
45	0,45	2,25	2,25	1,35
50	0,50	2,50	2,50	1,50
55	0,55	2,75	2,75	1,65
60	0,60	3,00	3,00	1,80
65	0,65	3,25	3,25	1,95
70	0,70	3,50	3,50	2,10
75	0,75	3,75	3,75	2,25
80	0,80	4,00	4,00	2,40
85	0,85	4,25	4,25	2,55
90	0,90	4,50	4,50	2,70
95	0,95	4,75	4,75	2,85
100	1,00	5,00	5,00	3,00

Fonte: A autora (2022)

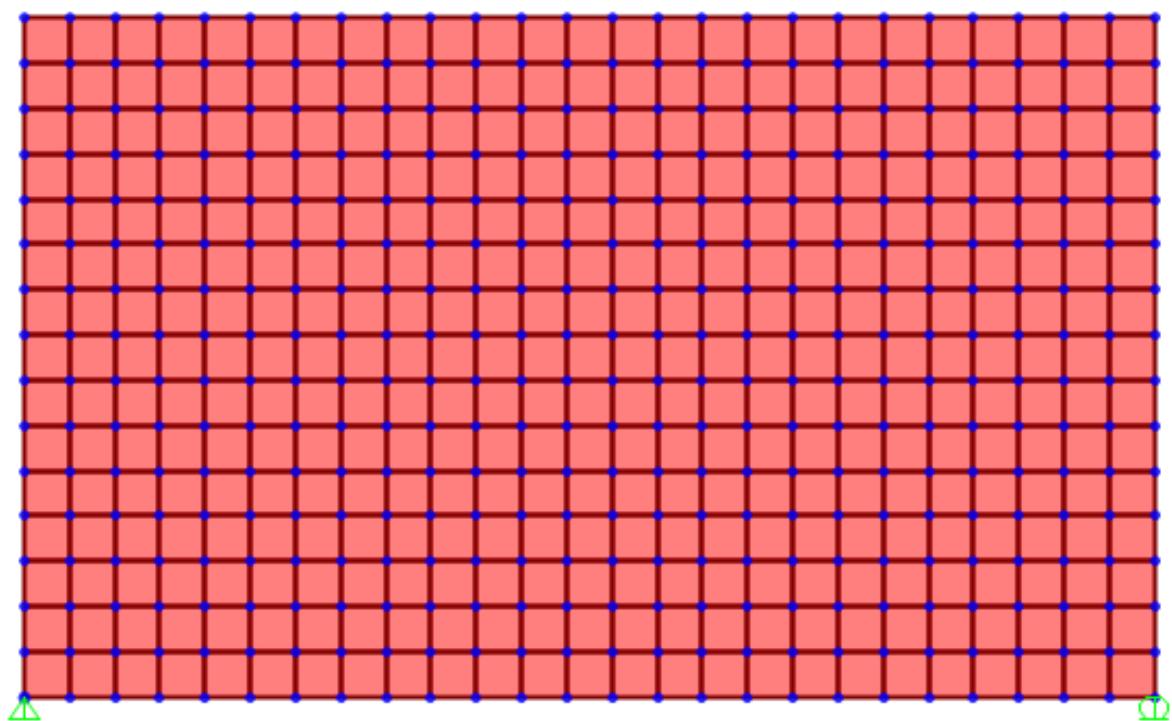
Ao realizar a modelagem dos elementos padrão no SAP2000 v.23, utilizando para a viga um elemento tipo frame, na condição de contorno 1 (engaste-apoio, como na Figura 9) e, para a parede um elemento tipo shell, discretizado em uma malha de 20x20 cm², na condição de contorno 1 (parede livre, como na Figura 10), obtiveram-se os mesmos valores de deformação apresentados na Tabela 4. Como exemplo, podem ser observados na Figura 11 e na Figura 12, os valores obtidos para $\delta_{\Delta T}$ na direção x (u₁) da viga e, nas direções x (u₁) e z (u₃) da parede, quando submetidas a uma $\Delta T = 10$ °C

Figura 9 – Viga padrão modelado como elemento tipo frame, no SAP2000 v.23 – Condição de contorno 1 - Engaste-apoio



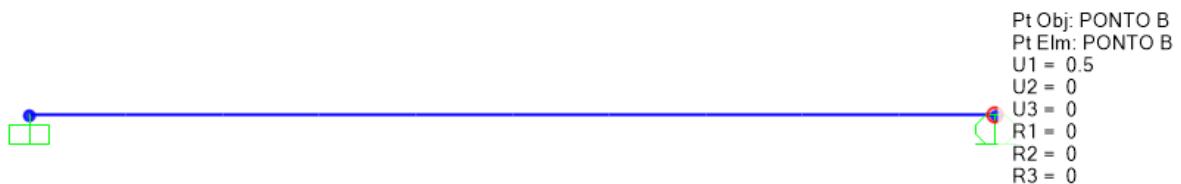
Fonte: A autora (2022)

Figura 10 – Parede padrão modelada como elemento tipo shell, no SAP2000 v.23 – Condição de contorno 1 - Parede livre



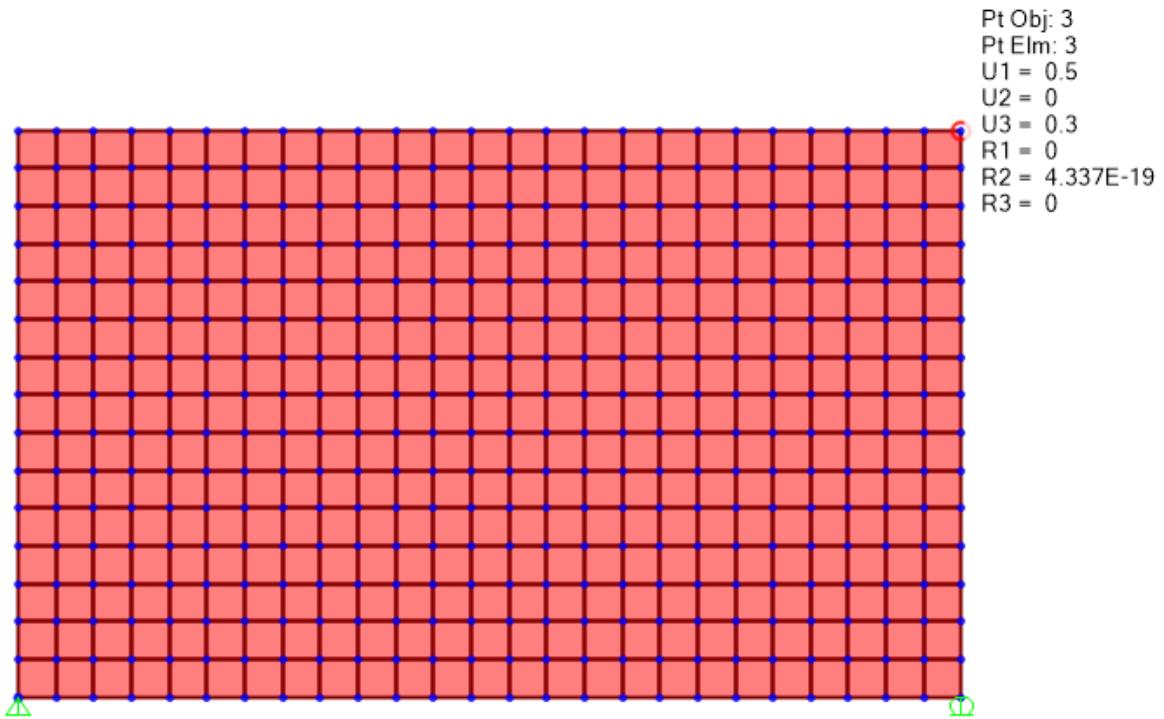
Fonte: A autora (2022)

Figura 11 – Deformação térmica axial de um elemento tipo frame, na condição engaste-apoio, submetido a uma $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$, em mm



Fonte: A autora (2022)

Figura 12 – Deformação térmica nas direções x e z de um elemento tipo shell, na condição de parede livre, submetido a uma $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, em mm



Fonte: A autora (2022)

Tais resultados tornam válido o uso do software SAP2000 v.23 para análise de deformações térmicas, tanto em elementos tipo frame quanto em elementos tipo shell.

8.2 Reações axiais em um elemento de barra devido a uma variação uniforme de temperatura ($R_{\Delta T}$)

Partindo para a condição de contorno 2, onde a viga encontra-se bi-engastada, é possível calcular, como demonstrado pela equação (21), a reação axial nos engastes da viga, resultantes da ΔT a qual a barra está submetida. Para tal, faz-se necessário também, calcular o módulo de elasticidade secante do concreto (E_{cs}). Propriedade que depende do módulo de elasticidade inicial do concreto e do coeficiente α_i , todos conforme descrito no item 3.3.2 deste trabalho. Assim, considerando diferentes valores de f_{ck} é possível calcular os valores dos E_{ci} , α_i e E_{cs} , apresentados na Tabela 5, para que a partir destes, fossem calculados os valores da reação em diversas configurações, conforme visto na Tabela 6.

Tabela 5 – Módulo de elasticidade secante do concreto aos 28 dias

f_{ck} (MPa)	E_{ci} (MPa)	α_i	E_{cs} (MPa)
20	25044	0,850	21287
25	28000	0,863	24150
30	30672	0,875	26838
35	33130	0,888	29403
40	35418	0,900	31876
45	37566	0,913	34279
50	39598	0,925	36628
55	40632	0,938	38093
60	41612	0,950	39531
70	43443	0,975	42357
80	45132	1	45132
90	46703	1	46703

Fonte: A autora (2022)

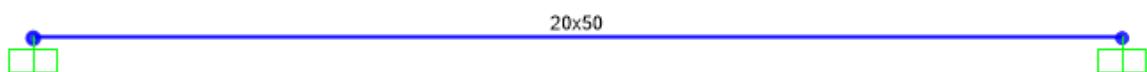
Tabela 6 – Reações nos engastes devido a uma variação uniforme de temperatura ao longo de um elemento de barra - $R_{\Delta T}$, em kN

f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
E_{cs} (MPa)	21287	24150	26838	29403	31876	34279	36628	38093	39531	42357	45132	46703	
$\varepsilon_{\Delta T}$ (mm/m)	0,05	106,44	120,75	134,19	147,01	159,38	171,39	183,14	190,46	197,66	211,79	225,66	233,52
	0,10	212,87	241,50	268,38	294,03	318,76	342,79	366,28	380,93	395,31	423,57	451,32	467,03
	0,15	319,31	362,25	402,58	441,04	478,14	514,18	549,42	571,39	592,97	635,36	676,98	700,55
	0,20	425,75	483,00	536,77	588,06	637,52	685,58	732,56	761,86	790,63	847,14	902,64	934,06
	0,25	532,18	603,75	670,96	735,07	796,89	856,97	915,70	952,32	988,28	1058,93	1128,30	1167,58
	0,30	638,62	724,50	805,15	882,09	956,27	1028,37	1098,84	1142,79	1185,94	1270,72	1353,96	1401,10
	0,35	745,06	845,25	939,34	1029,10	1115,65	1199,76	1281,98	1333,25	1383,60	1482,50	1579,62	1634,61
	0,40	851,49	966,00	1073,54	1176,12	1275,03	1371,16	1465,13	1523,72	1581,25	1694,29	1805,28	1868,13
	0,45	957,93	1086,75	1207,73	1323,13	1434,41	1542,55	1648,27	1714,18	1778,91	1906,08	2030,95	2101,64
	0,50	1064,37	1207,50	1341,92	1470,15	1593,79	1713,95	1831,41	1904,65	1976,57	2117,86	2256,61	2335,16
	0,55	1170,81	1328,25	1476,11	1617,16	1753,17	1885,34	2014,55	2095,11	2174,22	2329,65	2482,27	2568,67
	0,60	1277,24	1449,00	1610,30	1764,17	1912,55	2056,74	2197,69	2285,58	2371,88	2541,43	2707,93	2802,19
	0,65	1383,68	1569,75	1744,50	1911,19	2071,92	2228,13	2380,83	2476,04	2569,54	2753,22	2933,59	3035,71
	0,70	1490,12	1690,50	1878,69	2058,20	2231,30	2399,52	2563,97	2666,50	2767,19	2965,01	3159,25	3269,22
	0,75	1596,55	1811,25	2012,88	2205,22	2390,68	2570,92	2747,11	2856,97	2964,85	3176,79	3384,91	3502,74
	0,80	1702,99	1932,00	2147,07	2352,23	2550,06	2742,31	2930,25	3047,43	3162,51	3388,58	3610,57	3736,25
	0,85	1809,43	2052,75	2281,26	2499,25	2709,44	2913,71	3113,39	3237,90	3360,16	3600,37	3836,23	3969,77
	0,90	1915,86	2173,50	2415,46	2646,26	2868,82	3085,10	3296,53	3428,36	3557,82	3812,15	4061,89	4203,29
	0,95	2022,30	2294,25	2549,65	2793,28	3028,20	3256,50	3479,67	3618,83	3755,48	4023,94	4287,55	4436,80
	1,00	2128,74	2415,00	2683,84	2940,29	3187,58	3427,89	3662,81	3809,29	3953,13	4235,72	4513,21	4670,32

Fonte: A autora (2022)

Os valores apresentados na Tabela 6 podem ser reproduzidos modelando no SAP2000 v.23 um elemento tipo frame, com as mesmas dimensões e mesmo material da viga padrão, considerando a segunda condição de contorno (barra bi-engastada, como visto na Figura 13). Aplicando a este elemento o mesmo intervalo de variação de temperatura uniformemente distribuída ao longo do comprimento aplicado ao modelo de cálculo manual. Alguns exemplos dos resultados obtidos podem ser observados na Figura 14, na Figura 15 e na Figura 16.

Figura 13 – Viga padrão (20x50) modelada como elemento tipo frame, no SAP2000 v.23, na condição bi-engastada



Fonte: A autora (2022)

Figura 14 – Reações nos engastes de um elemento tipo frame, com $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$, submetido a uma $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, em kN



Fonte: A autora (2022)

Figura 15 – Reações nos engastes de um elemento tipo frame, com $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$, submetido a uma $\Delta T = 50^\circ\text{C}$, em kN



Fonte: A autora (2022)

Figura 16 – Reações nos engastes de um elemento tipo frame, barra com $f_{ck} = 55 \text{ MPa}$, submetido a uma $\Delta T = 85^\circ\text{C}$, em kN



Fonte: A autora (2022)

Frente aos resultados obtidos, torna-se válido o uso do SAP2000 v.23 para o cálculo das reações axiais nos engastes, resultantes de uma variação uniforme de temperatura atuante sobre a viga.

8.3 Tensão axial em um elemento de barra devido a uma variação uniforme de temperatura ($\sigma_{1\Delta T}$)

Aplicando os valores de reação, obtidos na Tabela 6

Tabela 6, na equação (19), tem-se, para a viga padrão, um elemento de barra com seção transversal de 20 cm x 50 cm, os valores da tensão axial uniformemente distribuída por toda seção transversal da viga, devido a uma variação uniforme de temperatura ($\sigma_{1\Delta T}$). Tais resultados encontram-se detalhados na Tabela 7, para todos os valores de f_{ck} e ΔT admitidos.

Tabela 7 – Tensão axial em um elemento de barra devido a uma variação uniforme de temperatura - $\sigma_{1\Delta T}$, em MPa

f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
E_{cs} (MPa)	21287	24150	26838	29403	31876	34279	36628	38093	39531	42357	45132	46703
$\varepsilon_{\Delta T}$ (mm/m)	0,05	1,06	1,21	1,34	1,47	1,59	1,71	1,83	1,90	1,98	2,12	2,26
0,10	2,13	2,42	2,68	2,94	3,19	3,43	3,66	3,81	3,95	4,24	4,51	4,67
0,15	3,19	3,62	4,03	4,41	4,78	5,14	5,49	5,71	5,93	6,35	6,77	7,01
0,20	4,26	4,83	5,37	5,88	6,38	6,86	7,33	7,62	7,91	8,47	9,03	9,34
0,25	5,32	6,04	6,71	7,35	7,97	8,57	9,16	9,52	9,88	10,59	11,28	11,68
0,30	6,39	7,25	8,05	8,82	9,56	10,28	10,99	11,43	11,86	12,71	13,54	14,01
0,35	7,45	8,45	9,39	10,29	11,16	12,00	12,82	13,33	13,84	14,83	15,80	16,35
0,40	8,51	9,66	10,74	11,76	12,75	13,71	14,65	15,24	15,81	16,94	18,05	18,68
0,45	9,58	10,87	12,08	13,23	14,34	15,43	16,48	17,14	17,79	19,06	20,31	21,02
0,50	10,64	12,08	13,42	14,70	15,94	17,14	18,31	19,05	19,77	21,18	22,57	23,35
0,55	11,71	13,28	14,76	16,17	17,53	18,85	20,15	20,95	21,74	23,30	24,82	25,69
0,60	12,77	14,49	16,10	17,64	19,13	20,57	21,98	22,86	23,72	25,41	27,08	28,02
0,65	13,84	15,70	17,44	19,11	20,72	22,28	23,81	24,76	25,70	27,53	29,34	30,36
0,70	14,90	16,91	18,79	20,58	22,31	24,00	25,64	26,67	27,67	29,65	31,59	32,69
0,75	15,97	18,11	20,13	22,05	23,91	25,71	27,47	28,57	29,65	31,77	33,85	35,03
0,80	17,03	19,32	21,47	23,52	25,50	27,42	29,30	30,47	31,63	33,89	36,11	37,36
0,85	18,09	20,53	22,81	24,99	27,09	29,14	31,13	32,38	33,60	36,00	38,36	39,70
0,90	19,16	21,74	24,15	26,46	28,69	30,85	32,97	34,28	35,58	38,12	40,62	42,03
0,95	20,22	22,94	25,50	27,93	30,28	32,56	34,80	36,19	37,55	40,24	42,88	44,37
1,00	21,29	24,15	26,84	29,40	31,88	34,28	36,63	38,09	39,53	42,36	45,13	46,70

Fonte: A autora (2022)

Posto isso, modelou-se então a mesma viga padrão, considerando-a não mais como uma barra, mas agora como uma casca (elemento plano, tipo shell), com espessura de 20 cm e altura de 50 cm, discretizada em uma malha de 25x25 cm², submetidas as mesmas variações uniforme de temperatura aplicada ao elemento de barra. Tal modelagem se deu, com o objetivo de avaliar o comportamento das tensões internas a casca na direção longitudinal (u_1) em elementos de casca onde a altura é significativamente menor que o comprimento, analisando sua compatibilidade com os resultados de tensões geradas pelas reações nos engastes ao longo de todo elemento linear (Equação (19)).

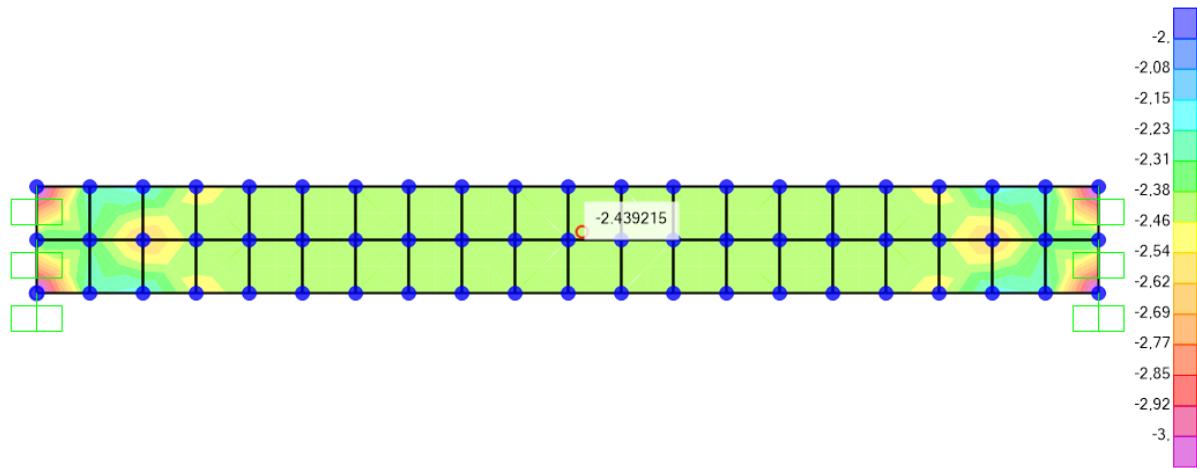
Tomando como exemplo uma $\Delta T = 10$ °C, para qualquer que seja o f_{ck} , é possível observar que, para uma malha de 25x25 cm², as tensões no elemento de casca são 1% maiores que no elemento de barra, conforme exposto na Tabela 8, havendo ainda um aumento das tensões próximo aos engastes, como pode ser observado na Figura 17. Resultado considerado aceitável, tendo em vista que o elemento tipo shell não possibilita a mesma condição de engastamento que o elemento tipo frame (engastamento perfeito). Além disso, ao considerar a viga como um elemento de casca permite-se que existam deformações em duas direções, o que justifica a concentração de tensões nas extremidades da barra. De maneira análoga, os resultados podem ser observados para as demais variações de temperatura.

Tabela 8 – Comparativo de tensões frame vs shell, para $\Delta T = 10$ °C

f_{ck} (MPa)	$R_{\Delta T}$ (kN)	$\sigma_{1\Delta T}$ (MPa)	$\sigma_{2\Delta T}$ (MPa)	Erro (%)
20	212,87	2,13	2,15	+1,003%
25	241,50	2,42	2,44	+1,003%
30	268,38	2,68	2,71	+1,003%
35	294,03	2,94	2,97	+1,003%
40	318,76	3,19	3,22	+1,003%
45	342,79	3,43	3,46	+1,003%
50	366,28	3,66	3,70	+1,003%
55	380,93	3,81	3,85	+1,003%
60	395,31	3,95	3,99	+1,003%
70	423,57	4,24	4,28	+1,003%
80	451,32	4,51	4,56	+1,003%
90	467,03	4,67	4,72	+1,003%

Fonte: A autora (2022)

Figura 17 – Tensão na direção u_1 em um elemento tipo shell com $f_{ck} = 25$ MPa, submetido a uma $\Delta T = 10$ °C, em MPa



Fonte: A autora (2022)

De posse destes resultados, é possível inferir que para o estado mais simples de tensão (tensão axial), o uso do SAP2000 v.23 é válido, visto que houve convergência de resultados e embora tenha-se observado uma discrepância, mesmo que pequena nas tensões, quando utilizado elemento de casca, sua aplicação é perfeitamente aceitável para situações de análise envolvendo deformações axiais devido a uma variação uniforme de temperatura.

8.4 Tensão biaxial em um elemento plano devido a uma variação uniforme de temperatura ($\sigma_{2\Delta T}$)

Dando continuidade à análise, avançando para o estado biaxial de tensões, apresenta-se agora os resultados obtidos para parede padrão, conforme descrita anteriormente, submetida a uma variação uniforme de temperatura em duas direções (x e z), para que sejam avaliadas as tensões no plano xz, considerando como condição de contorno os quatro bordos engastados. Para esta condição de contorno, espera-se que as deformações sejam nulas em ambas as direções, com tensão biaxial com valor uniforme sob todo plano, calculada conforme a equação (28).

Os valores da tensão biaxial calculada para a parede padrão com todos os bordos engastados para cada ΔT aplicada e cada f_{ck} utilizado podem ser observados na Tabela 9.

Tabela 9 – Tensão biaxial em um elemento de casca devido a uma variação uniforme de temperatura - $\sigma_{2\Delta T}$, em MPa

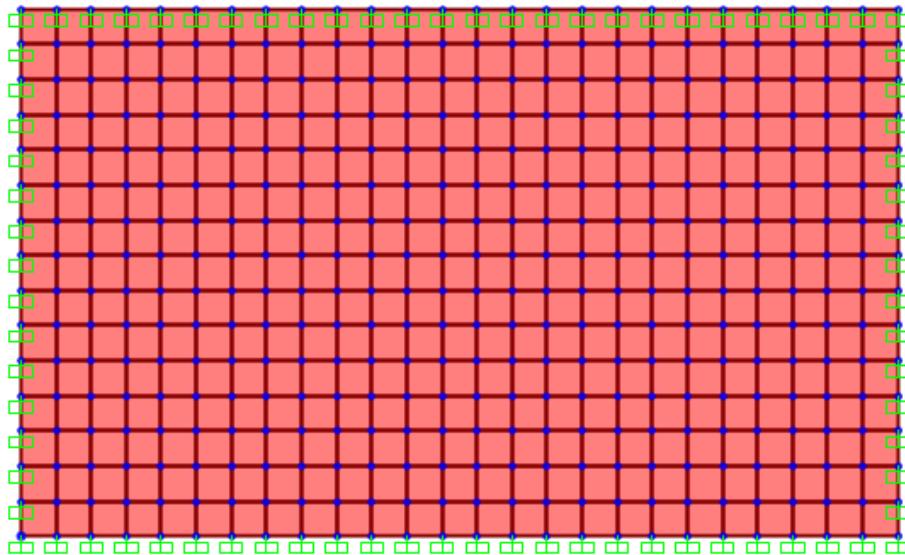
f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
E_{cs} (MPa)	21287	24150	26838	29403	31876	34279	36628	38093	39531	42357	45132	46703	
ε_{AT} (mm/m)	0,05	1,33	1,51	1,68	1,84	1,99	2,14	2,29	2,38	2,47	2,65	2,82	2,92
0,10	2,66	3,02	3,35	3,68	3,98	4,28	4,58	4,76	4,94	5,29	5,64	5,84	
0,15	3,99	4,53	5,03	5,51	5,98	6,43	6,87	7,14	7,41	7,94	8,46	8,76	
0,20	5,32	6,04	6,71	7,35	7,97	8,57	9,16	9,52	9,88	10,59	11,28	11,68	
0,25	6,65	7,55	8,39	9,19	9,96	10,71	11,45	11,90	12,35	13,24	14,10	14,59	
0,30	7,98	9,06	10,06	11,03	11,95	12,85	13,74	14,28	14,82	15,88	16,92	17,51	
0,35	9,31	10,57	11,74	12,86	13,95	15,00	16,02	16,67	17,29	18,53	19,75	20,43	
0,40	10,64	12,08	13,42	14,70	15,94	17,14	18,31	19,05	19,77	21,18	22,57	23,35	
0,45	11,97	13,58	15,10	16,54	17,93	19,28	20,60	21,43	22,24	23,83	25,39	26,27	
0,50	13,30	15,09	16,77	18,38	19,92	21,42	22,89	23,81	24,71	26,47	28,21	29,19	
0,55	14,64	16,60	18,45	20,21	21,91	23,57	25,18	26,19	27,18	29,12	31,03	32,11	
0,60	15,97	18,11	20,13	22,05	23,91	25,71	27,47	28,57	29,65	31,77	33,85	35,03	
0,65	17,30	19,62	21,81	23,89	25,90	27,85	29,76	30,95	32,12	34,42	36,67	37,95	
0,70	18,63	21,13	23,48	25,73	27,89	29,99	32,05	33,33	34,59	37,06	39,49	40,87	
0,75	19,96	22,64	25,16	27,57	29,88	32,14	34,34	35,71	37,06	39,71	42,31	43,78	
0,80	21,29	24,15	26,84	29,40	31,88	34,28	36,63	38,09	39,53	42,36	45,13	46,70	
0,85	22,62	25,66	28,52	31,24	33,87	36,42	38,92	40,47	42,00	45,00	47,95	49,62	
0,90	23,95	27,17	30,19	33,08	35,86	38,56	41,21	42,85	44,47	47,65	50,77	52,54	
0,95	25,28	28,68	31,87	34,92	37,85	40,71	43,50	45,24	46,94	50,30	53,59	55,46	
1,00	26,61	30,19	33,55	36,75	39,84	42,85	45,79	47,62	49,41	52,95	56,42	58,38	

Fonte: A autora (2022)

Ao Analisar os resultados obtidos através da modelagem de um elemento tipo shell com as mesmas características da parede padrão, discretizado em uma malha de $20 \times 20 \text{ cm}^2$, na segunda condição de contorno citada, foi possível ratificar o comportamento das tensões condizente com o prenunciado neste item e com os valores previamente calculados, expostos na Tabela 9.

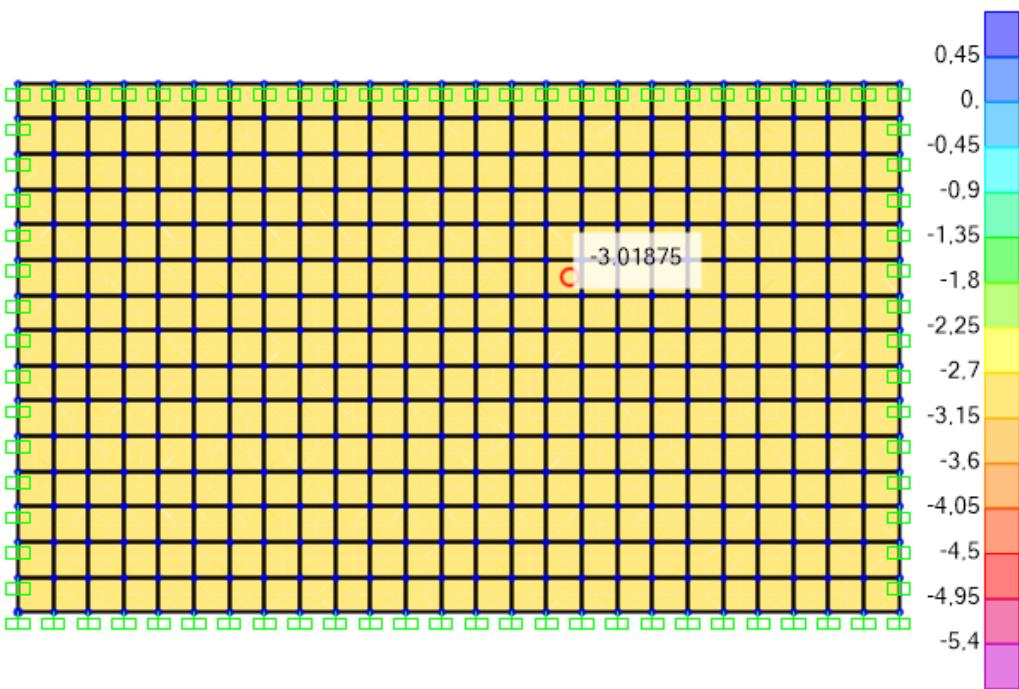
A Figura 18 e a Figura 19 ilustram os resultados do modelo em elementos finitos.

Figura 18 – Parede padrão modelada como elemento tipo shell, no SAP2000 v.23 – Condição de contorno 2 - Parede engastada



Fonte: A autora (2022)

Figura 19 – Tensão nas direções u_1 e u_3 em um elemento tipo shell com $f_{ck} = 25$ MPa, submetido a uma $\Delta T = 10$ °C, em MPa



Fonte: A autora (2022)

Desta forma, assim como para o caso da viga padrão, fica comprovada a validade do SAP2000 v.23 para a análise de tensões em elementos tipo shell oriundas de uma variação de temperatura uniforme aplicada.

9 AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO POR SECAGEM DO CONCRETO (ϵ_{cs})

No intuito de facilitar a discussão e análise dos resultados, expõe-se neste capítulo apenas os valores da retração por secagem do concreto, calculados considerando a parede padrão submetida às condições climáticas de Recife-PE, além de alguns outros gráficos essenciais para a explicação do comportamento da retração ao longo do tempo, bem como a influência de fatores climáticos neste comportamento.

9.1 Caso particular – Recife-PE

Segundo dados do Climate-data (Dados climáticos para cidades mundiais), para a cidade do Recife – PE, entre os anos de 1991 e 2021 a temperatura média anual ficou em torno dos 25,7 °C, enquanto a umidade relativa do ar média anual ficou na casa dos 76,3%, valores calculados com base nas médias mensais apresentadas na Figura 20. Adotou-se, pois, por simplificação, $T = 25$ °C e $U = 75\%$.

Figura 20 – Dados climatológicos para Recife – PE, entre os anos de 1991 e 2021

	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	<th>Junho</th> <th>Julho</th> <th>Agosto</th> <th>Setembro</th> <th>Outubro</th> <th>Novem- bro</th> <th>Dezembro</th>	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novem- bro	Dezembro
Temperatura média (°C)	26,6	26,8	26,9	26,4	25,7	24,7	24,1	24,1	24,7	25,7	26,4	26,7
Temperatura mínima (°C)	24,4	24,6	24,6	24,3	23,8	23	22,4	22,2	22,7	23,4	24	24,4
Temperatura máxima (°C)	29,6	29,8	29,8	29,2	28,1	27	26,3	26,5	27,4	28,7	29,6	29,7
Chuva (mm)	66	71	88	113	124	140	130	82	55	42	35	42
Umidade(%)	74%	75%	76%	79%	82%	82%	81%	78%	75%	72%	70%	72%
Dias chuvosos (d)	14	14	16	16	18	18	18	16	13	11	10	12
Horas de sol (h)	6,9	7,0	6,9	6,5	6,0	5,9	5,8	6,1	6,0	6,2	6,6	6,9

Fonte: Recife (2022)

Assim, conforme as equações (1) a (12), admitindo as condições supracitadas, temos:

Tabela 10 – Deformação específica total devido a retração por secagem do concreto, em Recife – PE

U (%)	ϵ_{1s}	γ	h_{frc} (cm)	ϵ_{2s}	$\epsilon_{cs\omega}$ (mm/m)
75	-0,0005	1,74	34,82	0,82	-0,3727

Fonte: A autora (2022)

Tabela 11 – Coeficientes para o cálculo do $\beta_s(t)$ e $\beta_s(t_0)$

U (%)	h_{frc} (m)	A	B	C	D	E
75	0,35	40	42,51	37,74	233,64	59,24

Fonte: A autora (2022)

Tabela 12 – Idade fictícia do concreto para $T = 25^\circ\text{C}$, em dias

t (dias)	
$\Delta t_{ef,0}$ (dias)	t
3	4
7	8
14	16
28	33
28	33
90	105
180	210
270	315
365	426
730	852
1825	2129
3650	4258
7300	8517
10950	12775
14600	17033
18250	21292

Fonte: A autora (2022)

Tabela 13 – Coeficiente relativo à retração nos instantes t e t_0 para $T = 25^\circ\text{C}$ – $\beta_s(t)$ e $\beta_s(t_0)$

$\beta_s(t)$ e $\beta_s(t_0)$		
t_0	4	0,02
	8	0,05
	16	0,08
	33	0,13
	33	0,13
	105	0,26
	210	0,38
	315	0,47
	426	0,54
	852	0,72
	2129	0,90
	4258	0,97
	8517	1,00
	12775	1,00
	17033	1,01
	21292	1,01

Fonte: A autora (2022)

Tabela 14 – Retração por secagem do concreto com diferentes tempos de cura, para $T = 25^\circ\text{C}$ e $U = 75\%$ - $\epsilon_{cs}(t, t_0)$, em mm/m

$\epsilon_{cs}(t, t_0)$ (mm/m)												
Δt_{ef} (dias)	28	90	180	270	365	730	1825	3650	7300	10950	14600	18250
Δt_{ef0} (dias)	3	0,0401	0,0880	0,1327	0,1659	0,1934	0,2591	0,3278	0,3544	0,3642	0,3659	0,3662
	7	0,0308	0,0787	0,1235	0,1567	0,1841	0,2499	0,3185	0,3451	0,3550	0,3566	0,3570
	14	0,0182	0,0661	0,1109	0,1441	0,1715	0,2373	0,3059	0,3325	0,3423	0,3440	0,3443
	28	0,0000	0,0479	0,0927	0,1259	0,1533	0,2191	0,2877	0,3143	0,3241	0,3258	0,3261

Fonte: A autora (2022)

A Tabela 15 mostra como a tensão no concreto se desenvolve ao longo da sua vida útil. Valores calculados de acordo com a equação (28), utilizando ϵ_{cs} no lugar de $\epsilon_{\Delta T}$.

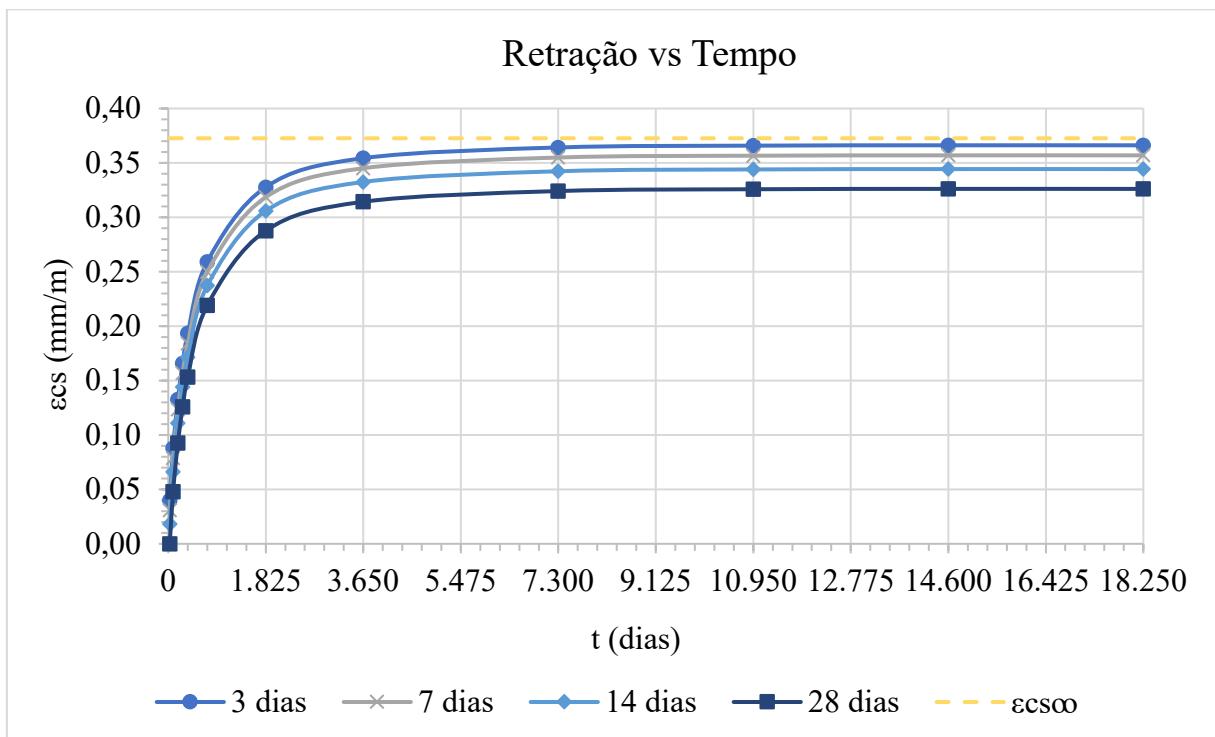
Tabela 15 – Tensão no concreto ao longo do tempo devido a retração para diferentes tempos de cura, para $T = 25^{\circ}\text{C}$ e $U = 75\%$ - em MPa

		$\sigma_{2\Delta T}$ (MPa)											
Δt_{ef} (dias)		28	90	180	270	365	730	1825	3650	7300	10950	14600	18250
$\Delta t_{ef,0}$ (dias)	3	1,60	3,50	5,29	6,61	7,71	10,33	13,06	14,12	14,51	14,58	14,59	14,59
	7	1,23	3,14	4,92	6,24	7,34	9,96	12,69	13,75	14,14	14,21	14,22	14,22
	14	0,73	2,63	4,42	5,74	6,83	9,45	12,19	13,25	13,64	13,71	13,72	13,72
	28	0,00	1,91	3,69	5,02	6,11	8,73	11,46	12,52	12,92	12,98	12,99	12,99

Fonte: A autora (2022)

O gráfico ilustrado na Figura 21 mostra como a retração se desenvolve ao longo da vida útil do concreto para diferentes tempos de cura úmida.

Figura 21 - Retração por secagem do concreto ao longo do tempo para diferentes tempos de cura úmida, em Recife-PE ($T = 25^{\circ}\text{C}$, $U = 75\%$)



Fonte: A autora (2022)

Neste gráfico, é possível observar o crescimento expressivo da retração até os 10 anos de idade do concreto (3650 dias), com tendência de estabilização pelo resto de sua vida útil. Comportamento comum aos quatro tempos de cura admitidos, que se diferem entre si no valor da retração de forma constante ao longo dos anos, mostrando a relevância do tempo de cura úmida na diminuição das deformações de retração por secagem do concreto. Outro ponto que

pode ser observado em relação as curvas é que, para uma cura de 28 dias, na idade de observação igual a 28 dias, a retração é nula, assim como também ocorreria se tivesse sido calculada para os pares 3-3, 7-7 e 14-14. Este resultado já era esperado, tendo em vista que a retração por secagem só se inicia após a interrupção do processo de cura úmida. Fato que explica a diferença no valor da retração nas quatro condições, visto que a cura úmida apenas retarda o início da retração, mas não muda o seu comportamento.

9.1.1 Verificação quanto a resistência à tração do concreto ($f_{ct,m}$)

Uma vez que as deformações oriundas da retração por secagem do concreto são responsáveis por produzir tensões de tração no concreto, torna-se necessário verificar se tais deformações não ultrapassam o limite admissível pelo concreto, formando fissuras. Esta verificação pode ser feita, comparando os valores da ϵ_{cs} obtidos com os valores máximos admissíveis para o concreto, na situação em estudo.

Frente a isto, para fins de verificação, calcula-se a resistência a tração do concreto como descrito nas equações (29) e (30), a partir da qual, determina-se a deformação específica máxima do concreto (equação (32)) para cada f_{ck} admitido, no estado biaxial de tensões. Resultados apresentados na Tabela 16, a qual também apresenta a $\Delta T_{equi.}$ para cada $\epsilon_{máx}$ obtida segundo a equação (14).

Tabela 16 – Resistência a tração do concreto ($f_{ct,m}$), deformação de retração máxima ($\epsilon_{máx}$) e variação de temperatura equivalente ($\Delta T_{equi.}$), para o estado biaxial de tensões ($\sigma_{2\Delta T}$)

f_{ck} (MPa)	E_{cs} (MPa)	f_{ctm} (MPa)	$\epsilon_{máx}$ (mm/m)	$\Delta T_{equi.}$ (°C)
20	21287	2,21	0,0831	8,3
25	24150	2,56	0,0850	8,5
30	26838	2,90	0,0863	8,6
35	29403	3,21	0,0873	8,7
40	31876	3,51	0,0881	8,8
45	34279	3,80	0,0886	8,9
50	36628	4,07	0,0889	8,9
55	38093	4,14	0,0870	8,7
60	39531	4,30	0,0870	8,7
70	42357	4,59	0,0866	8,7
80	45132	4,84	0,0858	8,6
90	46703	5,06	0,0867	8,7

Fonte: A autora (2022)

Ao se comparar, pois, a Tabela 16 com a Tabela 14, constata-se que para concretos submetidos a cura úmida de apenas 3 dias, a partir dos 3 meses de idade (90 dias), a deformação provocada pela retração por secagem já é maior que a $\varepsilon_{\text{máx}}$ permitida para qualquer que seja o f_{ck} adotado para o concreto. De forma análoga, ao atingir os 6 meses de idade (180 dias), a ε_{cs} é superior a $\varepsilon_{\text{máx}}$ permitida para todos os tempos de cura admitidos (3, 7, 14 e 28 dias), significando por tanto que o concreto se encontra fissurado ainda no início de sua vida útil. Tal constatação prova a relevância de se considerar a retração no dimensionamento de estruturas em concreto armado, em especial quando se busca estanqueidade da estrutura.

Posto isso, tendo em vista a complexidade de se acrescentar os efeitos da retração aos modelos de análise gerados por softwares como o SAP2000, toma-se como uma saída viável correlacionar a ε_{cs} com uma determinada ΔT_{equi} . Tornando a consideração dos efeitos da ε_{cs} mais prática no dia a dia das análises das estruturas.

9.1.2 Relação entre a retração e a variação de temperatura

Para os valores de retração expostos na Tabela 14, calculou-se a variação de temperatura equivalente (ΔT_{equi}) conforme a equação (15), como mostra a Tabela 17. Cada valor deste representa, portanto, que ΔT resulta na mesma deformação específica que a retração por secagem em cada idade do concreto desejada, considerando os tempos de cura pré-fixados. Por exemplo, para um reservatório a ser construído na cidade do Recife-PE, no que se deseja garantir a estanqueidade durante os 10 primeiros anos de uso (3650 dias), ao qual será garantido a um tempo de cura úmida de 7 dias, deve-se aplicar uma ΔT_{equi} igual a 34,5 °C ao modelo analítico, para que seu efeito seja levado em consideração na hora de realizar o cálculo dos esforços atuantes no elemento estrutural na modelagem em elementos finitos no SAP2000 v.23, software que mostrou-se válido para análises de tensões e deformações provenientes de variações uniformes de temperatura.

Tabela 17 – Variação de temperatura equivalente a retração por secagem do concreto, para $T = 25$ °C e $U = 75\%$
- ΔT_{equi} , em °C

Δt_{equi} para $T = 25$ °C e $U = 75\%$												
Δt_{ef} (dias)	28	90	180	270	365	730	1825	3650	7300	10950	14600	18250
$\Delta t_{ef,0}$ (dias)	3	-4,0	-8,8	-13,3	-16,6	-19,3	-25,9	-32,8	-35,4	-36,4	-36,6	-36,6
	7	-3,1	-7,9	-12,3	-15,7	-18,4	-25,0	-31,9	-34,5	-35,5	-35,7	-35,7
	14	-1,8	-6,6	-11,1	-14,4	-17,2	-23,7	-30,6	-33,2	-34,2	-34,4	-34,4
	28	0,0	-4,8	-9,3	-12,6	-15,3	-21,9	-28,8	-31,4	-32,4	-32,6	-32,6

Fonte: A autora (2022)

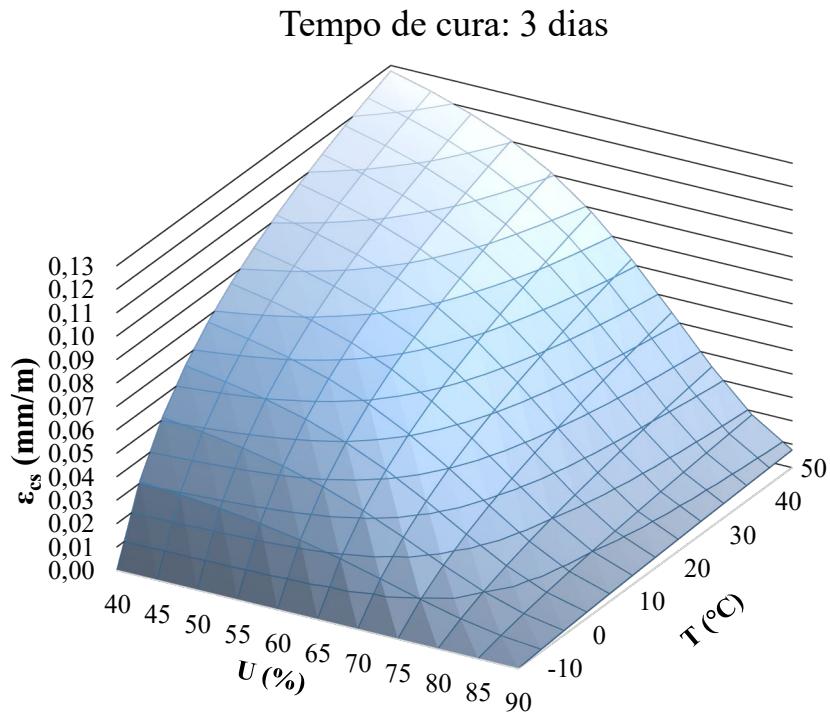
Vale lembrar que, por se tratar de uma deformação de retração (encurtamento), a variação de temperatura a ser aplicada deverá ter sinal negativo.

9.2 Influência da umidade relativa do ar e da temperatura ambiente na retração por secagem do concreto

Estudando os resultados obtidos para os cálculos da ε_{cs} na parede padrão, em termos das diversas umidades relativas do ar e temperaturas ambiente consideradas, construiu-se os gráficos dispostos na Figura 22 (para um tempo de cura de 3 dias), na Figura 23 (considerando um tempo de cura de 7 dias) e na Figura 24 (com tempo de cura de 14 dias), para que se avaliasse o comportamento da retração na idade de 28 dias após a concretagem, idade esta escolhida para desforma da estrutura. A partir desses gráficos fica ainda mais claro, isto é, pode-se visualizar de forma direta o efeito da cura úmida na ε_{cs} sob diversas condições de U e T.

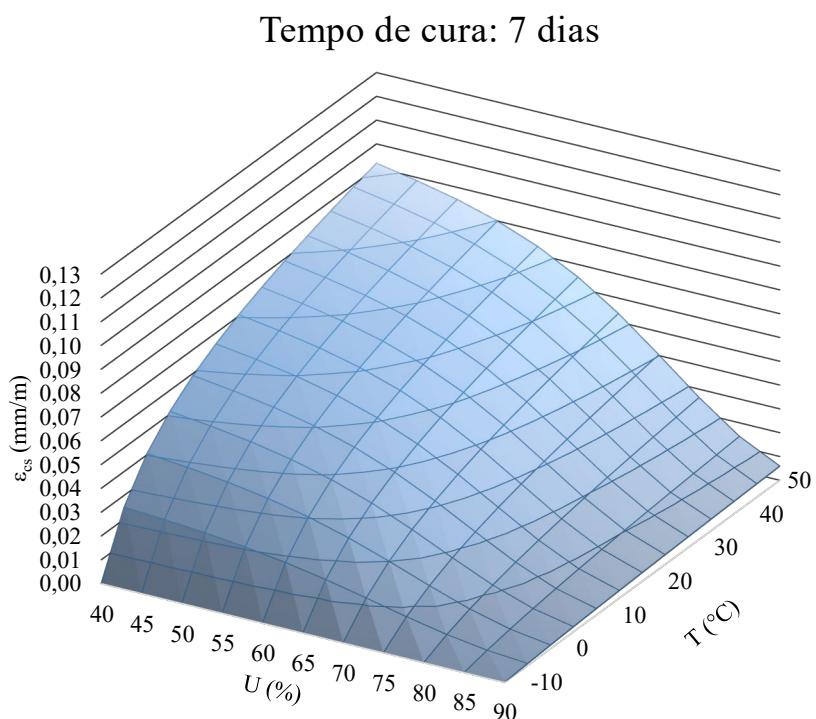
De forma direta, é possível afirmar que para uma U constante, variando-se a temperatura ambiente, o valor da ε_{cs} cresce, sendo sua taxa de crescimento maior quanto menor for a umidade relativa do ar. Por outro lado, ao fixar uma T, nota-se que a ε_{cs} decresce, conforme a U aumenta, sendo sua taxa de decrescimento maior quanto maior for a T. Ainda sobre as curvas da U x ε_{cs} , é observado que para T = -10 °C a retração é nula independente da umidade, devido a paralisação do processo químico de pega do concreto (Leonhardt e Mönning, 1977). Enquanto para umidade máxima (U = 90%), a retração não é nula para qualquer temperatura, apresentando valores baixos, mas crescentes. Fazendo, pois, um comparativo entre os gráficos, ratifica-se o que já havia sido dito no item anterior, a respeito da cura úmida não altera o comportamento da retração por secagem, mas apenas retarda-la, uma vez que, para mesma idade do concreto (28 dias), há um abatimento na superfície do gráfico, mantendo-se o comportamento supracitado.

Figura 22 – Retração por secagem do concreto em função da U e da T, para os tempos de cura úmida de 3 dias



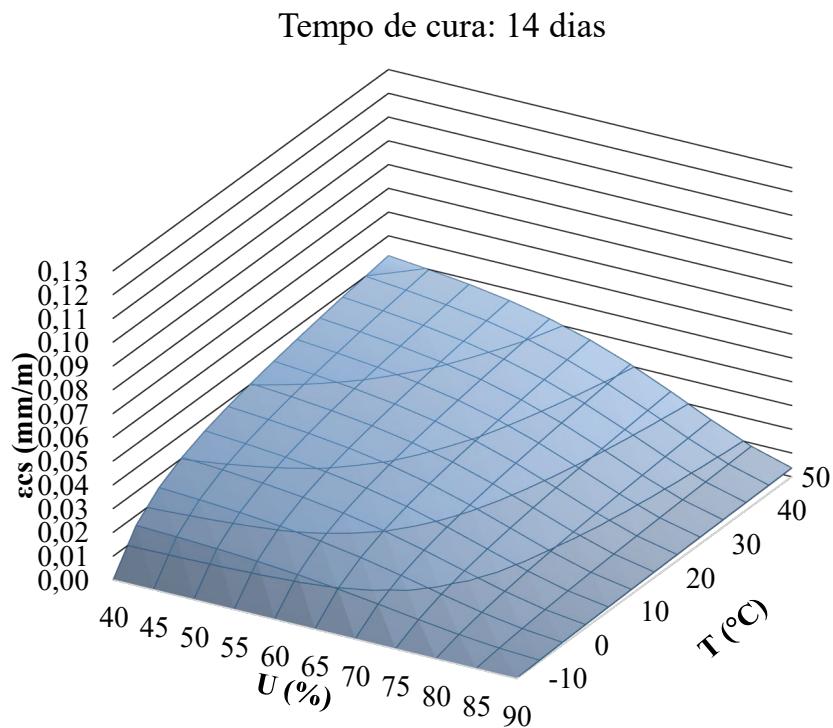
Fonte: A autora (2022)

Figura 23 – Retração por secagem do concreto em função da U e da T, para os tempos de cura úmida de 7 dias



Fonte: A autora (2022)

Figura 24 – Retração por secagem do concreto em função da U e da T, para os tempos de cura úmida de 14 dias



Fonte: A autora (2022)

10 ANÁLISE COMPARATIVA DA ÁREA DE AÇO

Sintetizando as considerações já tomadas até o momento, define-se aqui, para fins de cálculo e, comparação da área de aço a ser empregada devido aos esforços de retração, um elemento estrutural plano (parede) com espessura de 20 cm, a qual será tomada a altura de 100 cm no intuito de calcular a área de aço por metro. Admite-se que a parede está exposta a um ambiente com CAA IV, o que pressupõe um $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$ e $w = 0,2 \text{ mm}$. Quanto as condições climáticas, admite-se $U = 75\%$ e $T = 25^\circ\text{C}$, a exemplo de Recife-PE.

10.1 Área de aço mínima ($A_{s, \min}$)

A Tabela 18 mostra os valores de área de aço mínima para garantir o escoamento da peça, calculada considerando uma seção transversal de 20 cm x 100 cm, conforme descrito na equação (33). Para a parede em estudo, destaca-se a área de aço correspondente ao f_{ck} de 40 MPa, com taxa mínima $\rho_{\min} = 0,179\%$.

Tabela 18 – Área de aço mínima, em cm^2/m

f_{ck} (MPa)	ρ_{\min} (%)	$A_{s, \min}$ (cm^2/m)
20	0,150%	3,00
25	0,150%	3,00
30	0,150%	3,00
35	0,164%	3,28
40	0,179%	3,58
45	0,194%	3,88
50	0,208%	4,16
55	0,211%	4,22
60	0,219%	4,38
70	0,233%	4,66
80	0,245%	4,90
90	0,256%	5,12

Fonte: A autora (2022)

10.2 Armadura mínima de tração sob deformações impostas ($A_{s, \text{ecs}}$)

A Tabela 19 mostra os valores de área de aço mínima de tração sob deformações impostas, calculadas considerando as tensões máximas para cada bitola de modo a garantir uma abertura de fissura máxima de 0,2 mm, conforme demonstrado na equação (34).

Tabela 19 – Armadura mínima de tração sob deformações impostas, em cm^2/m

σ_s (MPa)	$\varnothing_{\text{máx}}$ (mm)	$A_{s, \text{ecs}}$ (cm^2/m)	$A_{s, \text{ecs}} / \text{face}$ (cm^2/m)
160	25	30,00	15,00
200	16	24,00	12,00
240	12,5	20,00	10,00
280	8	17,14	8,57
320	6	15,00	7,50

Fonte: A autora (2022)

10.3 Armadura de tração devido à retração (A_s)

A Tabela 20 mostra os valores de área de aço de tração necessária ao longo da vida útil do concreto, calculados conforme a equação (36), considerando os valores de tensão expostos na Tabela 15.

Tabela 20 – Armadura de tração devido à retração, para $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$, em cm^2/m

As (cm^2/m)												
Δt_{ef} (dias)	28	90	180	270	365	730	1825	3650	7300	10950	14600	18250
$\Delta t_{ef,0}$ (dias)	3	8,44	18,53	27,96	34,96	40,74	54,59	69,06	74,65	76,73	77,08	77,15
	7	6,49	16,58	26,01	33,01	38,79	52,65	67,11	72,71	74,78	75,13	75,20
	14	3,83	13,93	23,35	30,35	36,13	49,99	64,45	70,05	72,12	72,47	72,54
	28	0,00	10,09	19,52	26,52	32,30	46,15	60,62	66,21	68,29	68,64	68,71

Fonte: A autora (2022)

Para esses valores, no entanto, é possível notar que a área de aço necessária apresenta grande variação ao decorrer dos anos. Neste sentido, entende-se que por não ser possível acrescentar aço a estrutura sem que haja alteração do seu arranjo inicial quanto a distribuição de tensões na seção transversal devido a retração, deve-se desde o primeiro momento, utilizar uma área de aço suficiente a atender os esforços de tração na idade desejada, isto é, período o

qual se pretende que a estrutura tenha o funcionamento esperado sem que seja necessário manutenções corretivas quanto a deformação excessiva.

Como citado no item 10.1.2, para um período de 10 anos de uso, garantindo a estanqueidade da estrutura, considerando um período de cura úmida de 7 dias, seria então necessária a distribuição de $72,71 \text{ cm}^2/\text{m}$ de aço pela seção transversal da peça. Tal área corresponde a 8Ø25 c/ 12,5 por face da seção transversal, arranjo inviável do ponto de vista executivo uma vez que para uma estrutura com 20 cm de espessura, exposta a CAA IV, o cobrimento mínimo para garantir a proteção das armaduras é igual a 5 cm e, considerando que a mesma área de aço é necessária nas duas direções, não haveria espaço entre as barras para que fossem envolvidas por concreto, garantindo sua aderência, condição necessária para se configurar como concreto armado.

10.4 Comparativo entre $A_{s, \text{mín.}}$ x $A_{s, \text{ecs}}$ x A_s

Ao comparar os valores de $A_{s, \text{ecs}}$ / face apresentados na Tabela 19 ao valores mínimos exigidos pela norma para garantia do escoamento (Tabela 18), percebe-se que a área de aço mínima por face para garantir o limite de fissuração é bem maior que a $A_{s, \text{mín.}}$ praticada quando não se considera o efeito da retração por secagem do concreto.

Ao comparar os valores de A_s apresentados na Tabela 20 com aqueles apresentados na Tabela 19 é possível observar que 1 ano após a concretagem, sobre as condições climáticas do Recife-PE, a área de aço necessária já excede a mínima para deformações impostas, ainda que adotada cura úmida de 28 dias.

11 CONCLUSÃO

Por meio deste trabalho, provou-se a validade o uso do SAP2000 v.23 para análises de tensões e deformações térmicas em elementos de barra e de casca obtendo-se alta precisão nos resultados, uma vez que as modelagens realizadas no software comercial apresentaram resultados iguais ou com diferença da ordem de +1,003% quando comparados aos métodos matemáticos consolidados da mecânica dos sólidos.

Conclui-se ainda que a consideração dos efeitos da retração por secagem no dimensionamento de estruturas em concreto armado é indispensável para garantir a estanqueidade da estrutura, visto que com o resultado dos cálculos constatou-se que tais esforços são suficientes para exceder a deformação máxima suportada pela resistência a tração do concreto 6 meses após a concretagem para todos os tempos de cura considerados, quando a estrutura está submetida a condições climáticas como as de Recife-PE ($U = 75\%$ e $T = 25^{\circ}\text{C}$).

Através dos resultados apresentados, mostrou-se que maiores períodos de cura úmida retardam o início da retração por secagem diminuindo sua amplitude ao longo de toda vida útil do concreto. Constatou-se também que para uma mesma temperatura ambiente, em locais onde a umidade relativa do ar é baixa a deformação de retração é mais expressiva que em locais com umidade mais elevada. De maneira análoga, para uma mesma umidade relativa do ar, a deformação por retração cresce à medida que a temperatura ambiente aumenta. Notou-se ainda uma relação inversa entre a umidade e a temperatura, mostrando que o efeito do aumento da temperatura sobre a retração por secagem é maior quanto menor for a umidade, enquanto a variação da umidade causa maiores impactos em temperaturas mais elevadas. Tais observações permitem afirmar que, para qualquer que seja a combinação de $U \times T$, para umidades abaixo de 75% e temperaturas acima de 25°C haverá ruptura do concreto por deformação excessiva de retração.

Por fim, ao se comparar os resultados obtidos para os cálculos da área de aço mínima de escoamento, da área de aço mínima de tração sob deformações impostas e da área de aço necessária devido as tensões resultantes da retração por secagem, conclui-se que a retração por secagem do concreto aumenta significativamente o valor da área de aço a ser utilizada. Dado que, ao avaliar os resultados obtidos para as armaduras mínimas indicadas pela norma, quando especificada CAA IV, observou-se um aumento de pelo menos 209,5% por face para o caso em que se considera a retração por secagem do concreto. Viu-se ainda que, para uma estrutura submetida a $U = 75\%$ e $T = 25^{\circ}\text{C}$, a área de aço necessária para combater os esforços de tração

devido a deformação de retração supera os valores mínimos recomendado pela norma após o primeiro ano da concretagem mesmo se adotado um período de cura úmida de 28 dias.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, p. 238. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas - Procedimento.** Rio de Janeiro, p. 18. 2003.

BISSCHOP, J., Drying shrinkage cracking at early ages. In: A. Bentur (ed), Proceedings of the early age cracking in cementitious systems, RILEM, France, pp. 27-33, 2002.

CEN. EUROCÓDIGO 2: **Projeto de estruturas de betão - Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios (Versão Portuguesa).** Bruxelas: Cen, 2004.

ISHIDA, Tetsuya; CHAUBE, Rajesh P.; KISHO, Toshihan; MAEKAWA, Koichi. **Micro-physical approach to coupled autogenous and drying shrinkage of concrete.** JSCE Nº 578/V-37. November. 1997.

LEONHARDT, FRITZ; MÖNNIG, E.; FRIDMAN, David. Construções de concreto, volume 1: princípios básicos do dimensionamento de estruturas de concreto armado. **Tradução de: David Fridman.** Rio de Janeiro: Interciência, 1977.

MACHADO, Gabriel Vistas. **Efeitos das Deformações Impostas nas Estruturas:** estudo das paredes. 2016. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Técnico Lisboa, Lisboa, 2016.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo JM; CONCRETE-MICROSTRUCTURE, Properties. Materials. **McGrawHill, PJM, United States,** p. 85-86, 2006.

NUNES, N. L., FIGUEIREDO, A. D., 2007, “Retração do concreto de cimento Portland”, Boletim Técnico, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil, 59p., São Paulo.

RECENA, Fernando Piazza. **Retração do concreto.** EDIPUCRS, 2014.

RECIFE. CLIMATE-DATA. **Climate-Data**: dados climáticos para cidades mundiais. DADOS CLIMÁTICOS PARA CIDADES MUNDIAIS. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/pernambuco/recife-5069/>. Acesso em: 28 nov. 2022.

RODRIGUES, Giana Sousa Sena; BAUER, Elton. **Retração por Secagem a Baixas Idades em Concretos Estruturais**. 2013. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Laboratório de Ensaio de Materiais, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

SANTOS, José Cícero Araújo dos. **COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE VIGAS PROTENDIDAS BI APOIADAS COM CONTINUIDADE POSTERIOR**. 2017. 57 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

TIMOSHENKO, Stephen P.; GERE, J. E. Mecânica dos Sólidos; vol. 1. **LTC editora**, 1983.

VIEIRA, Amanda Pereira. **AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA DE CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO PRODUZIDOS COM CINZA DA CASCA DE ARROZ**. 2018. 183 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.