



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ABCAEL RONALD SANTOS MELO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE E INVESTIGAÇÃO DO
AUTOAQUECIMENTO NA FADIGA DE CONCRETO

FORTALEZA

2022

ABCAEL RONALD SANTOS MELO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE E INVESTIGAÇÃO DO
AUTOAQUECIMENTO NA FADIGA DE CONCRETO

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- M485a Melo, Abcael Ronald Santos.
Avaliação da influência da umidade e investigação do autoaquecimento na fadiga de concreto / Abcael Ronald Santos Melo. – 2022.
87 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos.
1. Fadiga. 2. Módulo de Elasticidade. 3. Concreto. 4. Autoaquecimento. 5. Umidade. I. Título.
CDD 620
-

ABCAEL RONALD SANTOS MELO

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA UMIDADE E INVESTIGAÇÃO DO
AUTOAQUECIMENTO NA FADIGA DE CONCRETO

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em: 25/11/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Evandro Parente Junior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Oliveira Lucas Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus e à sua Mãe, Esposa e Filha, Maria.

Aos meus pais, Ronaldo e Cristiane.

À minha irmã e à minha namorada, Abcaelem
e Aureliana.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de iniciação científica.

Ao Prof. Dr. Lucas Feitosa de Albuquerque Lima Babadopulos, pela excelente orientação, por todo o estímulo a realizar voos mais altos e pela ajuda a “construir minha própria porta”.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. Evandro Parente Junior e Dr. Jorge Luiz Oliveira Lucas Júnior pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) e do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP) por todo o suporte necessário durante a execução dos ensaios.

Aos amigos que me acompanharam durante toda a graduação e, principalmente, no momento de elaboração deste trabalho, não citados para não haver qualquer esquecimento. A presença de vocês, bem como as conversas e gargalhadas tornaram o processo mais leve e descontraído.

À minha família e à minha namorada, que me deram todo suporte e foram os ouvidos amigos quando tudo parecia que não ia funcionar.

“Ausência de evidências não é evidência de ausência.” (TALEB, 2020, p. 272).

RESUMO

O desenvolvimento da construção civil deu visibilidade à preocupação com carregamentos dinâmicos em estruturas cada vez mais robustas. Um exemplo de comportamento ainda pouco abordado para concreto é a deterioração por fadiga, que impacta estruturas sob carregamento alternado ou sob ciclos térmicos. Os materiais, quando submetidos a repetidos ciclos de carregamento, podem apresentar perda de seção resistente, o que favorece a falha com valores de carga inferiores aos previstos estaticamente. Contudo, não há, no Brasil, um ensaio normatizado para avaliar a fadiga em concreto. Além disso, a literatura sugere que, apesar de pouco influenciar na resistência última, a umidade e a variação de temperatura têm grande efeito na resistência à fadiga de concretos. Nesse contexto, esse trabalho tem como objetivo analisar o efeito da umidade e investigar o autoaquecimento de concreto em ensaios de fadiga. Para tanto, dois estudos foram conduzidos. No primeiro, corpos de prova de concreto convencional foram moldados e ensaiados tanto quanto ao módulo de elasticidade e quanto à fadiga por tração axial com carregamento cíclico a 10 Hz nas condições seca e saturada. No segundo, cinco geometrias de corpos de prova observados na literatura foram analisadas quanto ao potencial de autoaquecimento do concreto em ensaios de fadiga. Isso foi feito em *software* de elementos finitos para solução da equação do calor considerando a dissipação de energia viscoelástica como origem do calor que produz a variação de temperatura. No primeiro estudo, observou-se que: (i) o módulo do concreto saturado é ligeiramente superior ao do concreto seco; (ii) o módulo na tração é ligeiramente inferior ao módulo na compressão; e (iii) a presença de água não interferiu na resistência à fadiga, apesar de reduzir a resistência estática. No segundo estudo, os resultados de temperatura calculados considerando a dissipação viscoelástica do concreto se aproximou de resultados obtidos na literatura, sendo uma possibilidade para o mecanismo de autoaquecimento. Considerando que a temperatura tem efeito na fadiga do concreto, conclui-se que a temperatura precisa ser acompanhada durante ensaios de fadiga.

Palavras-Chave: Fadiga, Módulo de Elasticidade, Concreto, Autoaquecimento, Umidade.

ABSTRACT

The development of civil construction gave visibility to the concern with dynamic loads in increasingly robust structures. An example of behavior that is still little addressed for concrete is fatigue deterioration, which impacts structures under alternating loading or under thermal cycling. Materials, when subjected to repeated loading cycles, may present loss of resistant section, which favors failure with load values lower than those predicted statically. However, in Brazil, there is no standardized test to assess fatigue in concrete. Furthermore, the literature suggests that, despite having little influence on the ultimate strength, conditioning to moisture and temperature variation have a great effect on the fatigue strength of concrete. In this context, this work aims to analyze the effect of the humidity and investigate the self-heating of concrete in fatigue tests. For that, two studies were conducted. In the first, specimens of conventional concrete were prepared and tested for their modulus of elasticity and for their fatigue behavior with direct tension with cyclic loading with 10 Hz in dry and in saturated conditions. In the second, five test geometries observed in the literature were analyzed with respect to the potential for self-heating of the concrete during fatigue tests. This was done in finite element software for heat equation solution considering viscoelastic energy dissipation as heat source producing temperature variation. In the first study, it was observed that: (i) saturated concrete modulus is slightly higher than that of dry concrete; (ii) the modulus in tension is slightly lower than the modulus in compression; and (iii) the presence of water did not interfere with the fatigue strength, despite reducing the static strength. In the second study, the temperature results calculated considering the viscoelastic dissipation of the concrete approached the results obtained in the literature, in a way it is a plausible explanation for the phenomenon. Considering that the temperature may affect the fatigue results, it is concluded that the temperature needs to be monitored during fatigue tests.

Keywords: Fatigue, Modulus of elasticity, Concrete, Self-heating, Humidity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de ruptura em um único ciclo.....	18
Figura 2 – Exemplo de falha por fadiga.....	19
Figura 3 – Conexões entre origem de autores sobre fadiga de concreto na base da Scopus...	21
Figura 4 – Exemplo de curva de Wöhler.....	24
Figura 5 – Exemplo de curva de degradação.....	26
Figura 6 – Comparação de torre eólica com outras construções.....	27
Figura 7 – Esquema dos fatores que influenciam a fadiga de concreto e interrelações entre os fatores intervenientes.....	28
Figura 8 – Modelo de atuação da força do vento em torre eólica	29
Figura 9 – Configurações de ensaio usuais para fadiga em concreto.....	29
Figura 10 – Esquema do acúmulo de tensões devido a presença de água.....	32
Figura 11 – Arranjo molecular do C-S-H: A) Condição seca, B) Condição saturada.....	32
Figura 12 – Impacto da água no C-S-H: A) Na estrutura molecular, B) Nas ligações químicas.....	33
Figura 13 – Exemplo de distribuição de temperatura imediatamente antes da ruptura.....	34
Figura 14 – Exemplo do impacto da frequência no aumento de temperatura.....	35
Figura 15 – Exemplo de abrasão de corpo de prova durante ensaio de fadiga.....	35
Figura 16 – Equivalência de dissipação de energia: A) elastoplástica e B) viscoelástica.....	37
Figura 17 – Componentes módulo complexo.....	39
Figura 18 – Conceito de ângulo de fase.....	39
Figura 19 – Exemplo de malha para modelagem computacional com MEF para solução de um problema de aquecimento de fundações volumosas de concreto massa.....	40
Figura 20 – Exemplo de análise mecânica com elementos finitos.....	41
Figura 21 – Fluxograma representando o planejamento da pesquisa.....	43
Figura 22 – Granulometria dos agregados.....	44
Figura 23 – Abatimento do concreto.....	45
Figura 24 – Extração dos CPs.....	45
Figura 25 – Corpos de prova extraídos para execução dos ensaios de determinação do módulo e fadiga.....	45
Figura 26 – Colagem dos targets.....	46

Figura 27 – Colagem dos endplates.....	46
Figura 28 – Exemplo de falha do material por fadiga.....	48
Figura 29 – Geometria de análise: A) Considerando o atuador, B) Desconsiderando o atuador, C) Eixos de simetria.....	50
Figura 30 – Efeito da presença do atuador durante as simulações: A) Resultados com atuador, B) Resultados sem atuador.....	50
Figura 31 – Valores de referência do <i>skewness</i> da malha.....	51
Figura 32 – Exemplo do impacto do tamanho do elemento: A) Na duração da simulação, B) Na qualidade da malha.....	51
Figura 33 – Exemplo de resultado (utilizado para definir a malha de elementos finitos a ser utilizada) de temperatura após 30.000s para malhas de: A) 5 mm, B) 10mm, C) 20 mm, D) 30 mm, E) 40 mm.....	52
Figura 34 – Convergência de malha: A) Temperatura máxima, B) Temperatura mínima.....	54
Figura 35 – Exemplo de estabilização da temperatura.....	55
Figura 36 – Determinação do ângulo de fase do equipamento: A) Ângulo de fase, B) Curva tensão x deformação para 10 Hz.....	56
Figura 37 – Exemplo de sinais de tensão e de deformação do concreto nos ensaios de determinação: A) Do valor absoluto do módulo complexo com compressão, B) Da resistência à fadiga a tração.....	57
Figura 38 – Efeito da frequência no módulo complexo de A) CPs saturados e B) CPs secos.....	59
Figura 39 – Efeito da frequência no ângulo de fase de A) CPs saturados, B) CPs secos, C) Comparação dos resultados.....	60
Figura 40 – Resultados de módulo para 10 Hz.....	61
Figura 41 – Comparação de resultados na compressão e na tração: A) Módulo, B) Ângulo de fase.....	62
Figura 42 – Exemplo de curva de degradação do módulo e aumento do ângulo de fase: A) No estado saturado, B) No estado seco.....	64
Figura 43 – Exemplos de ruptura: A) No estado saturado, B) No estado seco.....	66
Figura 44 – Representação dos resultados obtidos em curva de Wöhler.....	67
Figura 45 – Exemplo de aumento da histerese ao longo dos ciclos: A) CP saturado, B) CP seco.....	69
Figura 46 – Energia acumulada ao longo dos ciclos	70
Figura 47 – Exemplo de energia equivalente.....	71

Figura 48 – Exemplo de variação de temperatura: A) Em toda a geometria, B) Apenas na superfície do CP.....	71
Figura 49 – Exemplo de variação da temperatura do centro ao longo do tempo.....	72
Figura 50 – Efeito da geometria na variação da temperatura no centro do CP.....	73
Figura 51 – Efeito do coeficiente de troca de calor convectiva na variação da temperatura no centro do CP.....	74
Figura 52 – Resultados da literatura comparado aos resultados das simulações por geometria: A) D100 x H200, B) D100 x H 280, C) D100 x H 300, D) D60 x H 180, E) D60 x H120.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Massa específica e massa unitária.....	44
Tabela 2 – Carregamento.....	47
Tabela 3 – Propriedades dos materiais (default)	48
Tabela 4 – Geometrias analisadas e temperaturas iniciais.....	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
C-S-H	<i>Calcium Silicate Hydrate</i> , em português Silicato de Cálcio Hidratado
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CP	Corpo de Prova
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
INSA	<i>Institut National des Sciences Appliquées</i>
LMCC	Laboratório de Materiais de Construção Civil
LMP	Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
MEF	Método dos Elementos Finitos
PIBIC	Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica
ReoM	Grupo de Pesquisa em Reologia de Materiais

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal
c	Calor específico
Ca_s	Átomo de cálcio nas camadas
Ca_w	Átomo de cálcio entre as camadas
D	Relação de amortecimento do material
d	Diâmetro
E''	Componente imaginária do módulo complexo
E'	Componente real do módulo complexo
E_c	Valor absoluto do módulo complexo na compressão
E_t	Valor absoluto do módulo complexo na tração
E^*	Módulo complexo
E	Módulo de elasticidade
F	Força aplicada
f	Frequência de carregamento
h	Coeficiente de troca de calor convectiva
I	Momento de inércia
k	Condutividade térmica
L, H	Comprimento
M	Momento em torno do eixo neutro
O_s	Átomo de oxigênio das cadeias de silicato
O_w	Átomo de oxigênio da molécula de água
q	Fluxo de calor por convecção
\dot{q}	Liberação de calor volumétrica
Si-O_s	Cadeia de silicato
S_{max}	Razão de tensão máxima
T	Temperatura
T_{centro}	Temperatura no centro do corpo de prova
T_i	Temperatura inicial

Δt	Tempo
T_s	Temperatura na superfície
T_∞	Temperatura ambiente
W_{EP}	Energia elastoplástica dissipada a cada ciclo por unidade de volume
W_{VE}	Energia viscoelástica dissipada a cada ciclo por unidade de volume
y	Distância em relação ao eixo neutro
$\Delta \log N_f$	Diferença máxima de ciclos de vida de fadiga na escala logarítmica
ε	Deformação
ε^R	Pseudodeformação
ε_0	Amplitude de deformação
φ	Ângulo de fase
φ_c	Ângulo de fase na compressão
φ_{EP}	Ângulo de fase equivalente no comportamento elastoplástico
φ_t	Ângulo de fase na tração
ρ	Densidade
σ	Tensão
σ_0	Amplitude de tensão
σ_a	Tensão máxima aplicada
σ_{LF}	Tensão para o limite de fadiga
σ_m	Tensão causada durante a flexão
σ_r	Tensão de resistência
σ_t	Tensão causada pela tração indireta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Problema de pesquisa e questões motivadores	20
1.2 Problema de pesquisa	21
1.3 Questões motivadoras	22
2 OBJETIVOS	23
2.1 Objetivo geral	23
2.2 Objetivos específicos	23
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1 Fenômeno de fadiga	24
3.2 Configurações de ensaios usuais	29
3.3 Efeito da umidade na fadiga	31
3.4 Efeito da temperatura na fadiga	34
3.5 Dissipação de energia em carregamentos alternados	36
3.6 Modelagem computacional	39
4 MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1 Caracterização dos materiais utilizados	43
4.2 Ensaios dinâmicos	46
4.3 Modelagem computacional	48
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
5.1 Ensaios dinâmicos	56
5.2 Modelagem computacional	70
6 CONCLUSÃO	79
REFERÊNCIAS	82

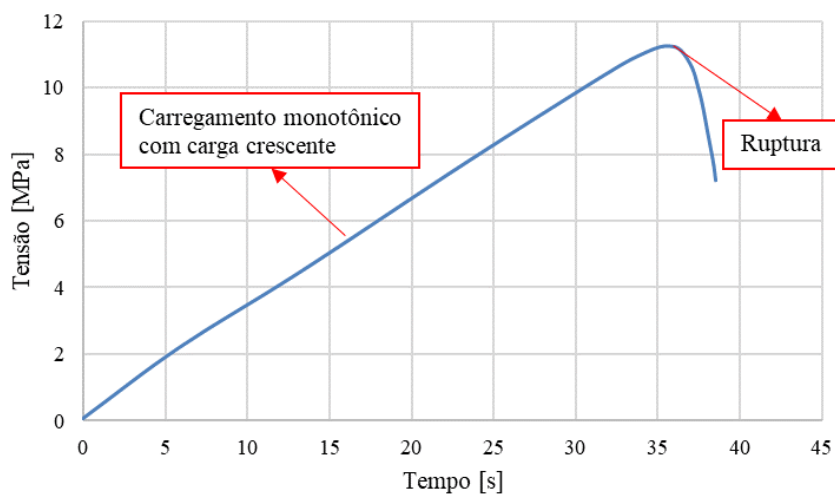
1 INTRODUÇÃO

A necessidade de desenvolver novos materiais de engenharia e verificar suas condições de uso para fins de projeto é uma demanda da indústria e tem o potencial de gerar produtos mais eficientes tecnicamente, mais economicamente viáveis e menos ambientalmente impactantes. Isto é particularmente importante na área da engenharia civil, onde as intervenções possuem alto custo e consomem um grande volume de insumos naturais (solo, rocha e água) e industrializados (cimento Portland, aço e polímeros, etc.).

Sublinham-se situações desafiadoras de construção (incluindo o transporte de material, determinante para a produtividade) e de uso dos materiais, como grandes volumes de concretagem (fundações de torres eólicas, grandes edificações e barragens), concretagem submersa, solicitações dinâmicas, entre outros. Nota-se a importância de conhecer as propriedades dos materiais, de maneira mais fundamental, de modo que a aplicação das técnicas de caracterização e de simulação ocorra de maneira mais assertiva, permitindo melhor previsão de comportamento, e propiciando melhores seleção de materiais e dimensionamento de estruturas.

É comum se avaliar o nível de carregamento que produz a falha (ruptura) em um ciclo apenas, o que é denominado resistência última, conforme exemplificado no resultado de ensaio de resistência à compressão simples de concretos apresentado na Figura 1.

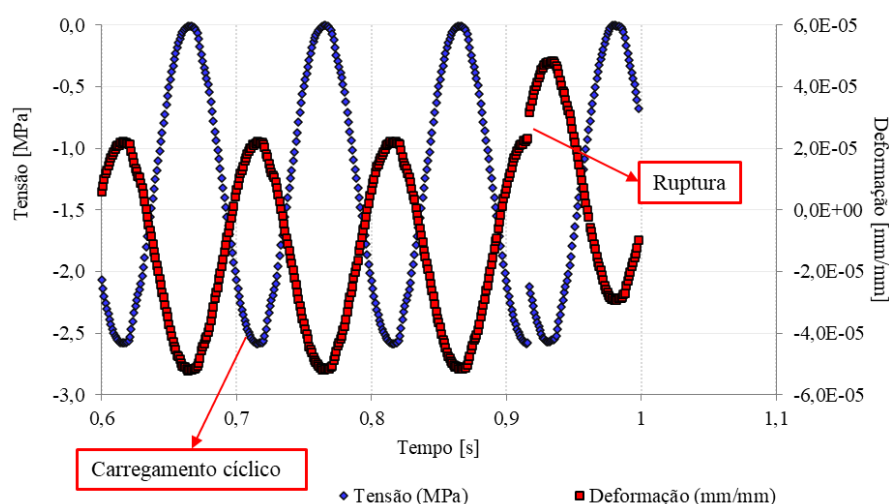
Figura 1 – Exemplo de ruptura em um único ciclo



Fonte: Elaborada pelo autor

Enquanto isso, algumas estruturas deterioram ao longo do tempo com a repetição de ciclos de carregamento, em um fenômeno conhecido como fadiga. Isto é exemplificado com o que se apresenta na Figura 2, com ciclos de carregamento logo antes e logo após a falha por fadiga do concreto. O processo produz a ruptura a partir da formação e do crescimento de microfissuras em um componente estrutural (BARONI, 2010), que eventualmente coalescem em uma microfissura e produzem a falha.

Figura 2 – Exemplo de falha por fadiga



Fonte: Elaborada pelo autor

A ruptura pode ocorrer sem que o nível de tensões ultrapasse o que costuma ser considerado como o limite elástico do material (CAIXETA, 2010), desde que sejam aplicados ciclos suficientes. A falha por fadiga é influenciada pelos seguintes fatores: carregamento, condições ambientais e frequência do carregamento (KACHKOUCH *et al.*, 2022). Potencialmente, qualquer tensão que varie no tempo pode provocar ruptura por fadiga, sendo que amplitudes de carregamento maiores provocam ruptura com menor quantidade de repetição de ciclos.

Entre as condições ambientais, espera-se o efeito de condições de umidade (CERVO; BALBO, 2004; ONESCHKOW *et al.*, 2020), que podem variar de uma peça estrutural para outra, sendo esperadas condições mais úmidas em peças de fundação, por exemplo. Nesse sentido, há indicativos de que a presença de água reduz a resistência à fadiga do concreto na compressão (SOERENSEN *et al.*, 2011; ALI *et al.*, 2022). Somado a este fator, há indícios de que temperaturas mais altas tornam as deformações

maiores e reduzem a vida de fadiga do concreto (SAINZ-AJA *et al.*, 2021). Observou-se que há autoaquecimento durante ensaios de fadiga de materiais cimentícios a compressão (ELSMEIER *et al.*, 2016; OTTO *et al.*, 2018; MYRTJA *et al.*, 2021; SAINZ-AJA *et al.*, 2021; MARKERT *et al.*, 2022). Sendo assim, é possível que os ensaios realizados em laboratório para prever falha por fadiga não reproduzam o fenômeno da fadiga em campo, em outras temperaturas.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar o impacto da variação da umidade e do autoaquecimento de concreto em ensaios de fadiga. Alguns autores apontam que o módulo do concreto saturado é ligeiramente superior ao do concreto seco e a presença de água reduz a resistência estática (HOU *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2020). Outros estudos apontam que o efeito é desprezível (MOR *et al.* 1992). Enquanto isso, aponta-se a fricção como responsável pelo aumento de temperatura (OTTO *et al.*, 2018, SAINZ-AJA *et al.*, 2021), mas há, sempre que medido, uma variação da temperatura durante ensaios de fadiga por compressão dependente da frequência não justificada pela fricção, podendo ser um indicativo de efeitos viscoelásticos.

Este trabalho foi desenvolvido no Grupo de Pesquisa em Reologia de Materiais (ReoM), com apoios do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) e do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos (LMP). Fez parte do projeto de cooperação internacional UFC/INSA-Rouen “*Challenges with respect to aerogenerators` foundation in coastal zones*”. Além disso, teve o financiamento do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

1.1 Relevância do estudo e questões motivadores

O crescimento populacional tem ocasionado uma demanda maior por energia, sendo preferencial ambientalmente o uso das fontes de energias limpas, como a produzida com torres eólicas, são necessárias. A aplicação do concreto pode ser verificada nas fundações dessas torres, e eventualmente no restante da estrutura, e a sua falha pode acarretar perdas.

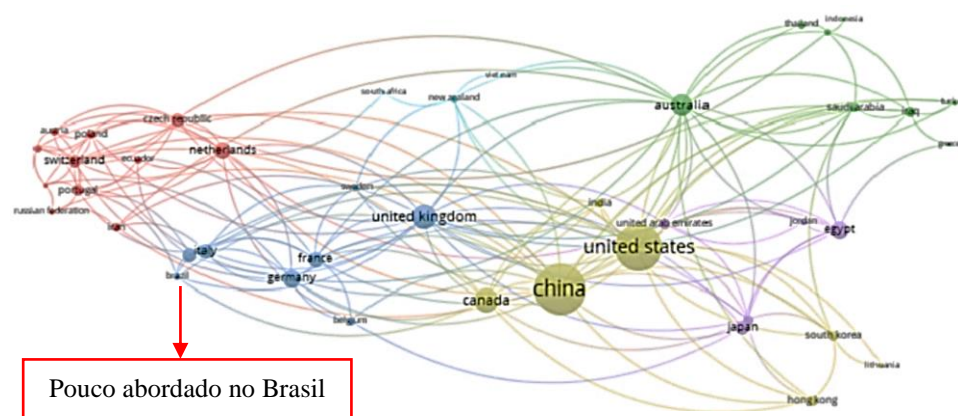
A falha do concreto pode se dar por diversos fatores, dentre eles a

degradação por carregamentos cíclicos (fadiga), efeito ainda pouco abordado em literatura, bem como os fatores que o intensificam. Atualmente, existem estudos sendo desenvolvidos na própria UFC, em parceria com o INSA-Rouen, que buscam entender a fadiga por tração e compressão axiais desses materiais. Não há procedimento normativo nacional para abordar a fadiga do concreto, havendo apenas considerações sobre fadiga de barras de aço presentes em estruturas de concreto armado (ABNT NBR 6118). Enquanto isso, outros países que investem em expansão da infraestrutura de geração de energia eólica adotam normativas diversas (ACI PRC-215-92; NS-EN 1992-1-1; Model Code 2010; DNV-OS-H101; DNV-OS-C502).

1.2 Problema de pesquisa

Como é observado na Figura 3, a fadiga do concreto ainda é pouco abordada no Brasil. Além disso, o problema que motivou esta pesquisa foi a divergência existente entre resultados sobre o impacto da umidade na fadiga de concreto e a baixa disponibilidade de informações sobre o autoaquecimento para esse material. Sabe-se que a temperatura aumenta em ensaios de fadiga de outros materiais (MUNIER *et al.*, 2014; MANGIAFICO *et al.*, 2015; KATUNIN, 2018) e há evidência de que o mesmo ocorre em concretos (OHLSSON; DAERGA; ELFGREN, 1990; ELSMEIER *et al.*, 2016; OTTO *et al.*, 2018; MYRTJA *et al.*, 2021; SAINZ-AJA *et al.*, 2021; MARKERT *et al.*, 2022).

Figura 3 – Conexões entre origem de autores sobre fadiga de concreto na base da Scopus



Fonte: KACHKOUCHI *et al.*, 2022 – Adaptado

1.3 Questões motivadoras

1. Qual a influência da umidade na resistência à fadiga de concreto?
2. É possível identificar o dano em concreto ao longo de ensaios de fadiga?
3. Qual a ordem de grandeza da variação de temperatura associada ao ensaio de fadiga do concreto devido à geração de calor pelo carregamento?

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar o efeito da umidade e investigar o autoaquecimento de concreto em ensaios de fadiga.

2.2 Objetivos específicos

- 1) Avaliar os impactos da variação da umidade de concreto em ensaios de fadiga por tração axial;
- 2) Avaliar a degradação nos corpos de prova de concreto ao longo do ensaio de fadiga por tração axial;
- 3) Investigar o autoaquecimento do concreto durante a fadiga por meio de modelagem computacional.

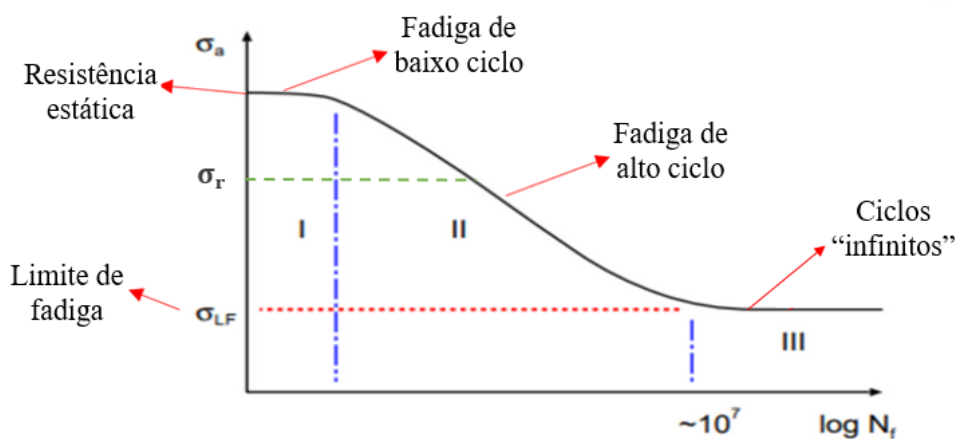
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo está dividido em seis seções que apresentam o fenômeno de fadiga (Seção 3.1), o efeito da umidade (Seção 3.2) e da temperatura (Seção 3.3) na fadiga, a dissipação de energia em carregamentos alternados (Seção 3.4), algumas configurações de ensaios usuais (Seção 3.5) e modelagem computacional (Seção 3.6). Há foco em utilizar informações da literatura para embasar o desenvolvimento da pesquisa apresentada posteriormente.

3.1 Fenômeno de fadiga

Conceitua-se fadiga como um processo contínuo de deterioração sob ação de carregamento cíclico de intensidade menor que os equivalentes à resistência mecânica estática do material, levando-o eventualmente à fratura (SCHÖN 2009). A Figura 4 apresenta uma curva tipicamente conhecida como curva de Wöhler, que associa a quantidade de ciclos necessária para a falha (eixo x) às amplitudes de carregamento aplicadas, o que permite – em conjunto com a associação de uma análise estrutural de peças com carregamento alternado – a previsão do comportamento quanto à fadiga de estruturas. Nota-se ainda que, para tensões menores, o número de ciclos para a falha aumenta (maior vida de fadiga).

Figura 4 - Exemplo de curva de Wöhler



Fonte: SCHÖN, 2009 - Adaptado

O comportamento de fadiga do concreto pode ser caracterizado pela razão entre o nível de tensão S_{max} que é dado pela razão entre a tensão máxima aplicada σ_a e a tensão de resistência σ_r (Equação (1)).

$$S_{max} = \frac{\sigma_a}{\sigma_r} \quad (1)$$

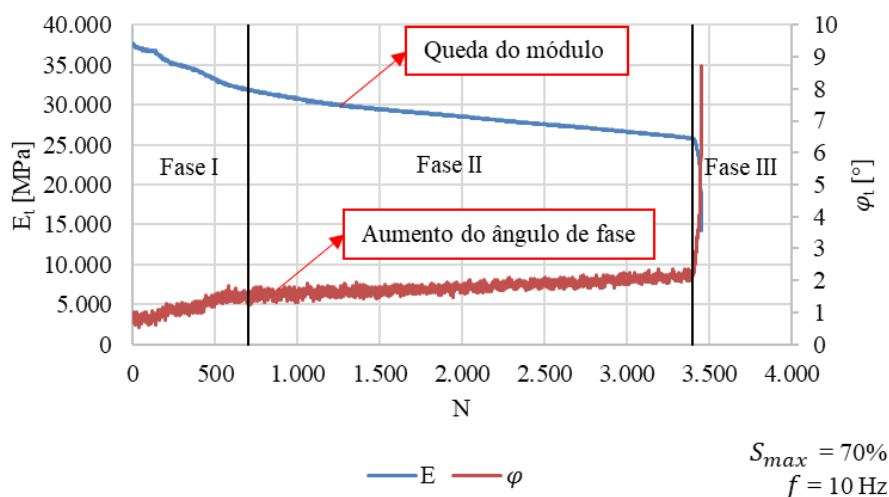
Em geral, quanto maior S_{max} , menor será a resistência à fadiga, ou seja, menor o número de ciclos para a falha N_f . Nesse sentido, existe uma tensão de limite de fadiga σ_{LF} a partir da qual o N_f (curva de Wöhler ou curva S-N) seria infinito. Assim, o número de ciclos para a falha N_f permite estimar a vida média de fadiga de concreto sob um determinado nível de tensão a ser previsto (OH, 1986; SINGH; KAUSHIK, 2001; SINGH *et al.*, 2007), e apoiar o dimensionamento de estruturas com vistas a esse fenômeno. Aqui vale ressaltar que é comum a apresentação de resultados apenas de uma condição de amplitude de carregamento para a construção da curva de Wöhler (Eurocode 2).

Segundo Pastoukhov e Voorwald (1995), a falha de um componente por fadiga está associada a processos de deterioração tais como os provenientes de deformações excessivas, ação de carregamentos combinados ou isolados, das variações de temperatura e do próprio meio ambiente. A ruptura por fadiga está diretamente relacionada a um processo de microfissuração progressiva em um material, degradando sua microestrutura, que acaba por causar danos (BALBO, 2000). Em outros materiais, como o aço (COSTA, 2021), o dano pode vir do acúmulo de microdefeitos entre monocristais. Para Lemaitre (1996), dano por fadiga gera uma mudança na rigidez aparente do material e ocorre de forma distribuída pelo seu volume, o que é normalmente representado por uma variável interna de estado de dano, geralmente avaliada pela relação entre o módulo aparente danificado e o módulo intacto do material. É um fenômeno que acarreta perda de seção resistente, produzindo em nível microscópico, uma descontinuidade no material.

Ao longo da evolução dos ciclos, pode-se observar a evolução do dano no material, com base em uma curva de degradação representando o módulo ou a variável de dano no eixo y – por exemplo, o ângulo de fase – e os ciclos no eixo x (Figura 5). Nas curvas de degradação, normalmente se observam 3 fases de comportamento, a

primeira fase compreende de 10% a 20% da vida de fadiga, com pequena degradação do módulo; a segunda fase compreende de 80% a 90% da vida de fadiga e se caracteriza por uma taxa de degradação constante; e a terceira fase inicia com o aumento da taxa de degradação do módulo ao fim da vida de fadiga (KAN *et al.*, 2002).

Figura 5 - Exemplo de curva de degradação



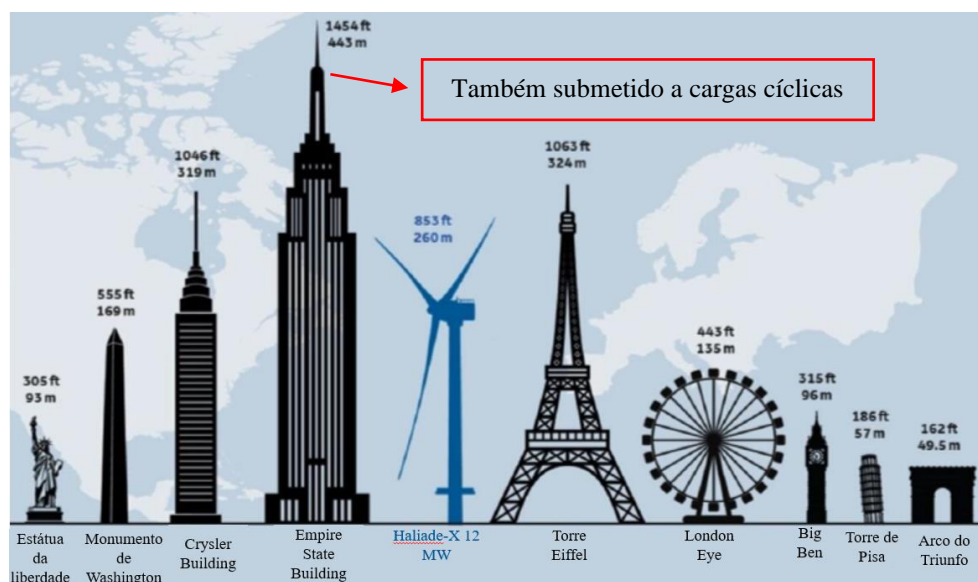
Fonte: Elaborada pelo autor

Nas estruturas de concreto armado, a fadiga está relacionada às propriedades dos materiais constituintes, aço e concreto, e à interação entre eles. O concreto, quando submetido a repetidos carregamentos, pode apresentar excessiva fissuração e eventualmente falhar após um número suficiente de ciclos, mesmo que a máxima carga seja menor que a resistência estática de uma espécie similar (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1997).

Esse é um tema ainda pouco estudado no Brasil, principalmente com enfoque na fadiga em estruturas de grande porte, como torres eólicas (tanto fundações de concreto quanto as próprias torres mais altas, feitas com concreto). Entretanto, vale destacar que o efeito da fadiga não está restrito a essa aplicação, pois ferrovias, grandes edifícios, pontes ou outras estruturas marítimas também sofrem carregamento cíclico. A Figura 6 compara as dimensões de uma das maiores torres eólicas existentes com outras edificações conhecidas, cujo carregamento cíclico pode ter algum efeito sobre a estrutura.

Alguns estudos investigam diferentes aspectos da fadiga, como o efeito da frequência no comportamento de fadiga do concreto (GRAF; BRENNER, 1934, 1936; SPARKS; MENZIES, 1973; RATHBY; GALLOWAY, 1974; NAIK *et al.*, 1993; ZHANG *et al.*, 1996; CERVO; BALBO, 2005; OTTO *et al.*, 2018), o efeito da umidade no comportamento de fadiga do concreto (CERVO; BALBO, 2004; ONESCHKOW *et al.*, 2020), variação da temperatura ao longo do ensaio de fadiga (OHLSSON; DAERGA; ELFGREN, 1990; ELSMEIER *et al.*, 2016; OTTO *et al.*, 2018; MYRTJA *et al.*, 2021; SAINZ-AJA *et al.*, 2021; MARKERT *et al.*, 2022).

Figura 6 – Comparação de torre eólica com outras construções

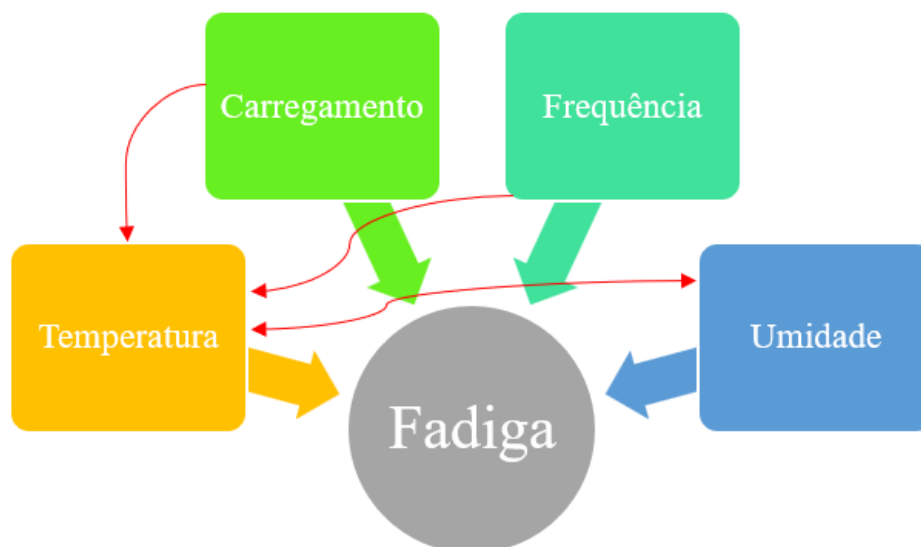


Fonte: BØRSHEIM, 2020 - Adaptado

Conforme observado por Kachkouch *et al.* (2022), a frequência, o nível de carregamento, a umidade e a temperatura podem ter um efeito combinado, o que torna a análise de efeitos isolados da fadiga complexa. Nesse sentido, Otto *et al.* (2018) apontam ainda que altas frequências podem elevar a temperatura; Ohlsson *et al.* (1990) indicaram que baixas temperaturas podem formar gelo, que contribui para a resistência à fadiga. Cervo e Balbo (2004) constataram que a umidade pode diminuir a resistência à fadiga; Schapery (1990) demonstrou que há aumento de temperatura devido à viscosidade ou dissipação plásticas durante os ciclos em meios elásticos lineares e não lineares com estrutura variável, como o crescimento de micro e microfissuras em materiais monolíticos e compósitos; e Deutscher *et al.* (2019) e Myrtja *et al.* (2021)

observaram o aumento de temperatura para concreto de alto desempenho e graute, respectivamente. O esquema entre os fatores que influenciam a fadiga de concreto encontra-se na Figura 7.

Figura 7 – Esquema dos fatores que influenciam a fadiga de concreto e interrelações entre os fatores intervenientes



Fonte: Elaborada pelo autor

Børsheim (2020) demonstrou que as fundações de torres eólicas estão submetidas a esforços combinados de compressão e momento fletor que variam ao longo da altura da torre, ao longo do dia e no decorrer do ano conforme a variação de velocidade do vento, de tal forma que não ocorra tração nas fundações. Porém, na estrutura da torre pode haver esforços de tração provocado pelo momento gerado pelo vento, como exemplificado na Figura 8. Nesse sentido, o concreto atua em conjunto com as barras de aço em seu interior, podendo surgir algum esforço de tração.

A velocidade do vento depende da localização geográfica e sua variação define a frequência de variação do carregamento, Børsheim (2020) coletou dados de velocidade do vento em uma zona costeira da Noruega a cada 10 minutos ao longo de uma ano, registrando a velocidade média, o desvio padrão e as velocidades máximas e mínimas, percebendo variações entre mínimos e máximos da ordem de 10 m/s, indicando que a frequência atuante em uma estrutura na mesma localização seria de pelo menos 0,002 Hz.

As três primeiras configurações de ensaio requerem levar em conta o princípio de Saint-Venant, que considera a distribuição de tensões uniformemente distribuída σ_a , em regiões distantes o suficiente da aplicação da carga, com magnitude igual à razão da força aplicada F e a área A da seção transversal analisada:

$$\sigma_a = \frac{F}{A} \quad (2).$$

Valendo o princípio de Saint-Venant, trata-se de ensaio homogêneo, que dá acesso às tensões e deformações no material sem hipóteses suplementares. Em contrapartida, os ensaios de flexão e de tração indireta possuem distribuição de tensão variável ao longo da seção de análise (BALBO, 2013), dificultando obter a tensão atuante no material (seria necessário assumir um modelo constitutivo e resolver um problema de valor de contorno). Por consequência, não é possível avaliar a variação do módulo ao longo do ensaio, tendo-se acesso apenas à rigidez do sistema. Para materiais homogêneos – o que não é aplicável durante todo o ensaio de fadiga, dada a degradação do material – a tensão σ_m causada durante a flexão se distribui linearmente ao longo da seção e pode ser definida conforme a Equação (3).

$$\sigma_m = \frac{My}{I} \quad (3)$$

Onde M é o momento em torno do eixo neutro da seção transversal, y é a distância em relação ao eixo neutro e I é momento de inércia da área da seção transversal calculada em torno do eixo neutro. Na tração indireta, a tensão σ_t é função do diâmetro d , do comprimento L e da força aplicada F :

$$\sigma_t = \frac{2F}{\pi dL} \quad (4).$$

Quando figuram nas análises, é esse tipo de equação que é utilizado para avaliar o valor de S_{max} em ensaios de fadiga por flexão. Já em ensaios uniaxiais, que são homogêneos, permite-se a partir da medida de força e de deslocamento calcular diretamente tensões (σ) e deformações (ε) para calcular a variação do módulo ao longo

do ensaio pela lei de Hooke, seja para materiais elásticos ($\sigma = E\varepsilon$) ou para materiais viscoelásticos ($\sigma_0 = |E^*|\varepsilon_0$):

$$\sigma = E\varepsilon \text{ ou } \sigma_0 = |E^*|\varepsilon_0 \quad (5).$$

3.3 Efeito da umidade na fadiga

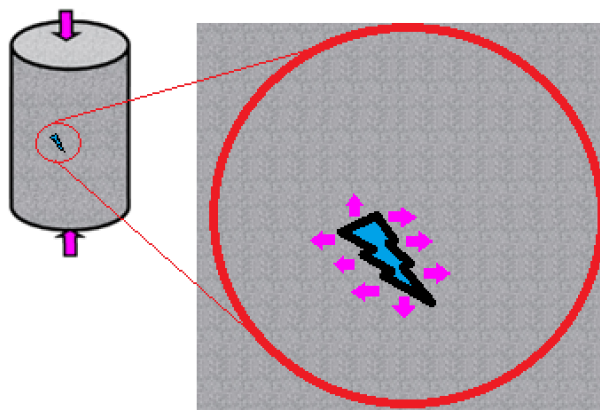
Oneschkow *et al.* (2020) ensaiaram corpos de prova de concreto de alto desempenho a compressão nos estados seco e submerso sob as mesmas condições para duas frequências (1 e 10 Hz) e observaram que a resistência à fadiga era menor para os corpos de prova submersos com uma diferença máxima de $\Delta \log N_f = 1,5$. O efeito foi mais visível para a menor frequência e para menores níveis de carregamento. Tal fato também foi observado por Cervo e Balbo (2004) em flexão para corpos de prova saturados com uma diferença máxima de $\Delta \log N_f = 2,15$.

Soerensen *et al.* (2011) testaram corpos de prova de graute em condições secas e submersas a compressão e ambos observaram uma queda da resistência na condição submersa com uma diferença máxima de $\Delta \log N_f = 2,94$. Ali *et al.* (2022) testaram concreto de alto desempenho a compressão em diferentes condições de saturação e observaram uma resistência menor para o concreto na condição saturada com uma diferença máxima de $\Delta \log N_f = 2,4$ em relação ao ensaio no estado seco e $\Delta \log N_f = 2,5$ entre o estado seco e o submerso. Sun *et al.* (2022) testaram concreto a compressão nas condições saturada, seca e submersa e constataram que a resistência à fadiga do concreto a compressão é maior no estado seco do que no estado saturado, o qual é maior que no estado submerso, obtendo uma diferença máxima de $\Delta \log N_f = 1,54$ entre os estados seco e saturado e $\Delta \log N_f = 2,0$ entre os estados seco e submerso.

Kachkouch *et al.* (2022) e Zhang *et al.* (2020) apontaram que a presença de água nos poros e microfissuras do concreto impede a deformação da matriz cimentícia, aumentando assim o módulo de elasticidade quando comparado ao estado seco, em que o ar assume as mesmas posições sem oferecer a mesma resistência à deformação. A água livre cria ainda tensões internas no material durante a compressão. Esse efeito está esquematizado na Figura 10 e é responsável por ampliar as fissuras e reduzir a

resistência à fadiga, sendo mais visível em altas frequências pela maior propagação de fissuras.

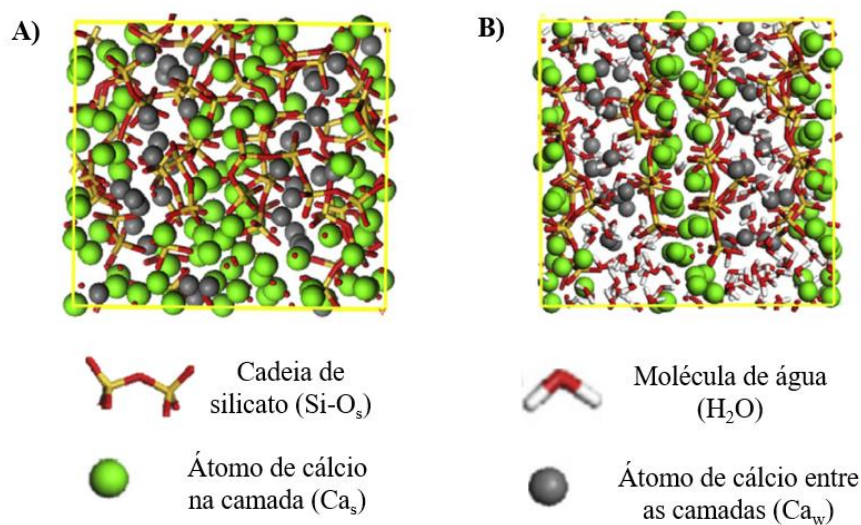
Figura 10 – Esquema do acúmulo de tensões devido a presença de água



Fonte: Elaborada pelo autor

A hidratação do cimento produz como componente principal o silicato de cálcio hidratado (*Calcium Silicate Hydrate* – C-S-H). Hou *et al.* (2014) apresentam o diagrama da estrutura molecular do C-S-H nas condições seca (Figura 11.A) e saturada (Figura 11.B).

Figura 11 – Arranjo molecular do C-S-H: A) Condição seca, B) Condição saturada

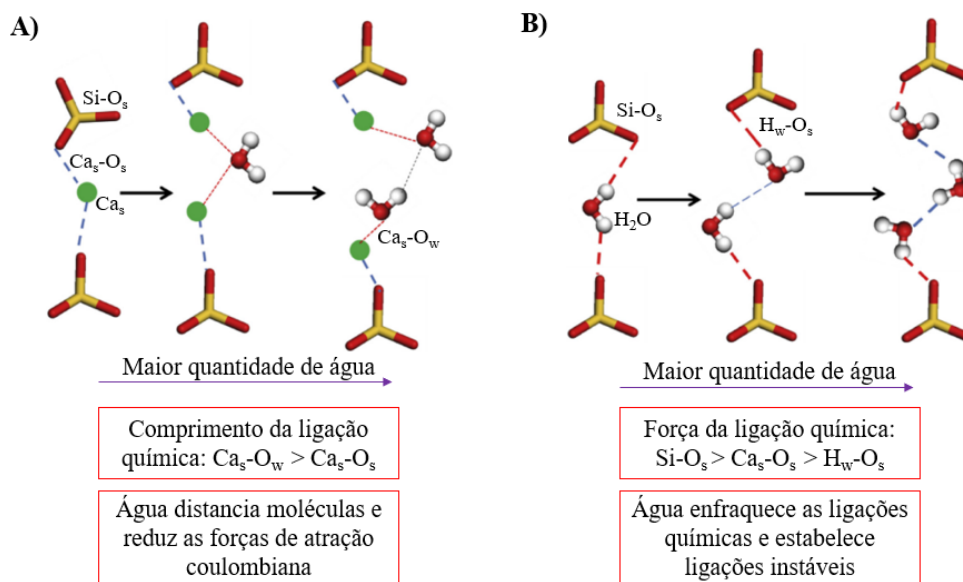


Fonte: HOU *et al.*, 2014 - Adaptado

A principal diferença é que, na condição seca, as cadeias de silicato estão dispostas de forma desordenada, enquanto que, na condição saturada, delimitam-se camadas de cadeias de silicato (Si-O_s) pela presença de água. Dessa forma, no estado seco, há possibilidade de maior deformação das moléculas, resultando em um módulo de elasticidade macroscópico menor do que o observado no estado saturado.

Os referidos autores mostram ainda que as moléculas de água se combinam quimicamente com os átomos de cálcio nas camadas (Ca_s), distanciando as cadeias de silicato e, por consequência, reduzindo as forças atrativas de Coulomb (Figura 12.A) e formam pontes de hidrogênio com o oxigênio das cadeias de silicato (O_s) de forma instável (Figura 12.B). Em outras palavras, as ligações são formadas e quebradas frequentemente, reduzindo a força das ligações químicas. Por conta desses efeitos, a água enfraquece a resistência das cadeias de silicato e, conseqüentemente, a resistência macroscópica do concreto.

Figura 12 – Impacto da água no C-S-H: A) Na estrutura molecular, B) Nas ligações químicas



Fonte: HOU *et al.*, 2014 - Adaptado

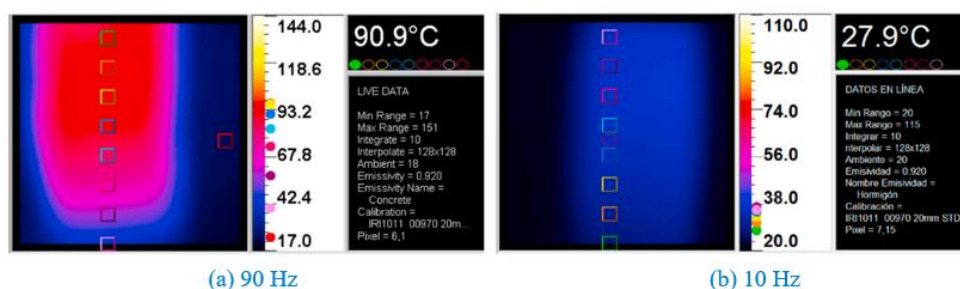
Ohlsson *et al.* (1990) ensaiaram corpos de prova a compressão nas temperaturas de 20 °C e -35 °C com alta quantidade de água e notaram que o congelamento da água no interior dos corpos de prova, para a menor temperatura, aumentou a resistência, apontando como justificativa a formação de um esqueleto de

gelo que contribuiu para a resistência à fadiga. Nesta pesquisa, adiciona-se também como hipótese que esse efeito possa ter contribuição do efeito da temperatura, discutida na seção a seguir, uma vez que o resfriamento deve possuir efeito contrário ao observado com o aquecimento do material.

3.4 Efeito da temperatura na fadiga

Sainz-Aja *et al.* (2021) realizaram ensaios de fadiga a compressão com frequência moderada (10 Hz) e uma frequência muito alta (90 Hz) em concretos de agregados reciclados e constataram que o limite de fadiga caía para a frequência maior, sendo justificado pelo maior deslocamento relativo entre o agregado e a pasta de cimento o que ocasiona um crescimento de trincas mais rápido. Além disso, identificaram uma variação de temperatura (autoaquecimento) ao longo dos ensaios de cerca de 20 °C para a menor frequência e de 50°C para a maior frequência. A Figura 13 apresenta a distribuição de temperatura obtida pelos autores, indicando uma distribuição não homogênea da temperatura.

Figura 13 – Exemplo de distribuição de temperatura imediatamente antes da ruptura



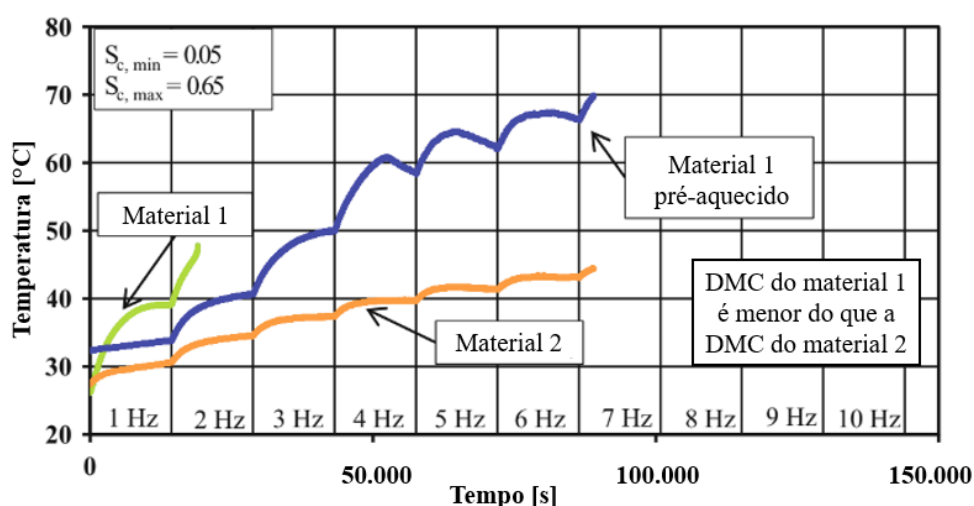
Fonte: SAINZ-AJA *et al.*, 2021 - Adaptado

Sainz-Aja *et al.* (2021) analisaram também o efeito de três diferentes temperaturas iniciais: 20, 65 e 100 °C durante o ensaio de fluência, para o mesmo material, e observaram que temperaturas maiores causavam danos por fluência maiores, podendo dobrar a deformação do material. Dessa forma, constataram que em quase todos os casos que um elemento é submetido à fadiga, ele não possui uma carga

principal nula, então o dano no material é decorrente de uma combinação de fadiga e fluência.

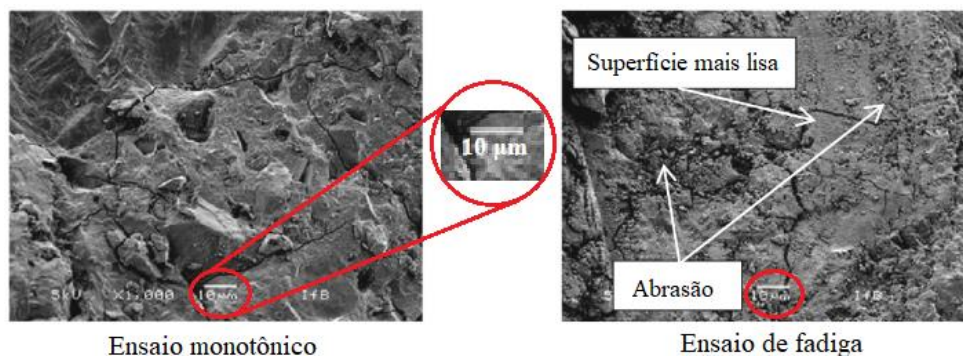
Otto *et al.* (2018) relacionaram o aumento da frequência de carregamento com o aumento de temperatura durante ensaios de fadiga (Figura 14) a compressão e indicaram que a presença de água pode ter um efeito redutor da resistência do material. Os autores apontaram como causa para o aquecimento a fricção interna, sendo justificada pela abrasão demonstrada na Figura 15.

Figura 14 – Exemplo do impacto da frequência no aumento de temperatura



Fonte: OTTO *et al.*, 2018 – Adaptado

Figura 15 – Exemplo de abrasão de corpo de prova durante ensaio de fadiga



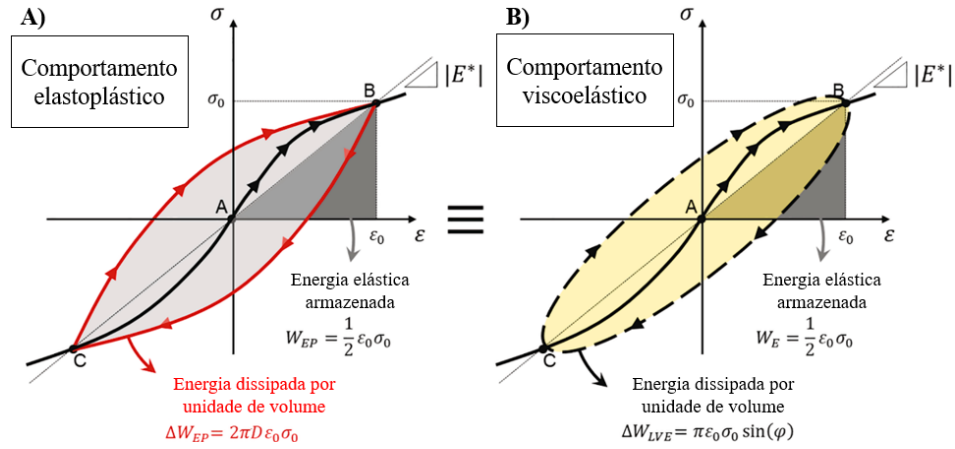
Fonte: OTTO *et al.*, 2018 - Adaptado

Otto *et al.* (2018), Myrtja *et al.* (2021) e Sainz-Aja *et al.* (2021) apontaram a fricção entre as faces das trincas como justificativa para o aquecimento, porém, a variação no tempo não se justifica, podendo ser um indicativo de efeitos viscoelásticos. De maneira geral, os materiais cimentícios são caracterizados como materiais elásticos, ou seja, ao serem submetidos a um carregamento possuem uma deformação instantânea recuperável após a retirada da carga, em outras palavras, toda a energia é recuperada durante o descarregamento. Contudo, tal comportamento idealizado como perfeitamente elástico não se verifica em materiais e é incompatível com as observações de autoaquecimento e de falha por fadiga apresentadas na literatura. Além disso, é sabido que há desenvolvimento de deformações ao longo de tempos maiores – efeito denominado como fluência – e que podem ser determinadas conforme a NBR 8224 (ABNT, 2012). Essa propriedade de fluir ao longo do tempo é característica de materiais viscoelásticos e Sainz-Aja *et al.* (2021) encontraram deformações por fluência de mais de duas vezes maiores que as deformações instantâneas para concreto com agregados reciclados em temperaturas mais elevadas, indicando que a elevação da temperatura pode ocasionar maiores danos ao material, reduzindo sua vida útil. A proposição de um modelo de comportamento viscoelástico para o concreto durante carregamentos cíclicos já foi abordada por Haar (2017) e indica que o comportamento do concreto ainda não está plenamente entendido. Maiores desenvolvimentos de modelagem viscoelástica de concretos estão disponíveis em Bažant e Jirásek (2019).

3.5 Dissipação de energia em carregamentos alternados

O autoaquecimento de materiais pode ser explicado pela energia dissipada, que é evidenciada pela histerese entre os ciclos de carregamento e descarregamento. A fonte de dissipação de energia pode ser elastoplástica ou viscoelástica e ambas podem dissipar a mesma quantidade de energia, conforme ilustrado na Figura 16. Parte dessa energia é utilizada para a geração de trincas, o restante ocasiona a variação de temperatura, variações viscoelásticas e outros fatores (SCHAPERY, 1990). Ambos modelos podem ser utilizados para a avaliação da energia dissipada e posterior simulação de autoaquecimento.

Figura 16 – Equivalência de dissipação de energia: A) elastoplástica e B) viscoelástica



Fonte: RASCHIA *et al.*, 2021 – Adaptado

A energia viscoelástica W_{VE} de deformação dissipada a cada ciclo por unidade de volume, onde a deformação em função do tempo t é $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(2\pi f t)$, é dada pela Equação (6) (SCHAPERY, 1990).

$$W_{VE} = \oint \sigma \cdot d\varepsilon = \pi |E^*| \varepsilon_0^2 \sin \varphi \quad (6)$$

Onde ε_0 é a amplitude de deformação, f a frequência de carregamento, E^* o módulo complexo do material (que possui magnitude e ângulo de fase) e φ o seu ângulo de fase. A energia elastoplástica W_{EP} de deformação dissipada a cada ciclo por unidade de volume é dada pela Equação (7).

$$W_{EP} = \oint \sigma \cdot d\varepsilon = 2\pi D |E^*| \varepsilon_0^2 \quad (7)$$

Onde D é a relação de amortecimento do material. Conforme Raschia *et al.* (2021), a energia plástica dissipada se iguala à energia viscoelástica dissipada para pequenas deformações e poucos ciclos, assim há um ângulo de fase equivalente φ_{EP} definido pela Equação (8).

$$\sin \varphi_{EP} = \frac{D}{2} \quad (8)$$

Em outras palavras, qualquer um dos dois modelos pode ser utilizado para avaliar a energia dissipada, de maneira equivalente, não havendo ainda clareza sobre qual dos dois fenômenos melhor descreve o comportamento do material. A liberação de calor volumétrica \dot{q} é dada pela multiplicação da energia liberada em um ciclo pela frequência em que ocorrem os ciclos no tempo:

$$\dot{q} = f \pi |E^*| \varepsilon_0^2 \sin \varphi \quad (9).$$

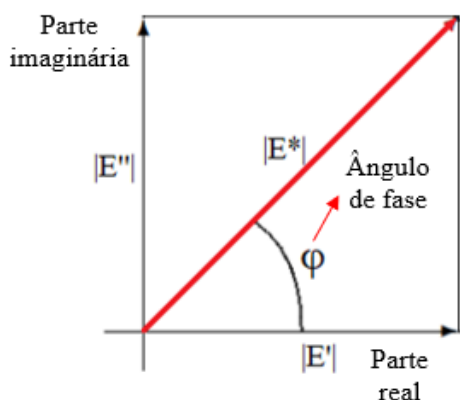
A Equação (9) pode ser reescrita em função da amplitude de tensão σ_0 conforme a Equação (10).

$$\dot{q} = \frac{f \pi \sigma_0^2 \sin \varphi}{|E^*|} \quad (10)$$

Uma forma de determinar as propriedades $|E^*|$ e φ é o ensaio de determinação do módulo complexo, que consiste na aplicação de cargas senoidais axiais e monitoramento dos deslocamentos axiais ao longo do carregamento. A razão entre as amplitudes de tensão senoidal e de deformação, também senoidal, define o valor absoluto do módulo complexo $|E^*|$ (conhecido na literatura nacional e norte-americana como módulo dinâmico, apesar da ausência de efeitos inerciais). Esse módulo possui uma parte real $E' = |E^*| \cos \varphi$, proporcional a energias elásticas armazenadas no material, e uma parte imaginária $E'' = |E^*| \sin \varphi$, proporcional a energias dissipadas no material. As componentes do módulo complexo estão representadas na Figura 17 e são relacionadas pelo ângulo de fase φ que é determinado com base na defasagem de tempo Δt entre as curvas de tensão e deformação (Figura 18) e está relacionado com a frequência f conforme a Equação (11).

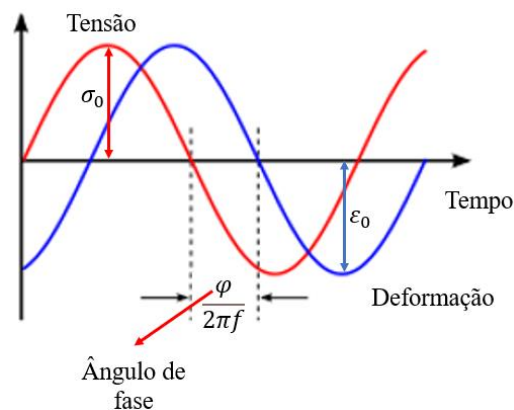
$$\Delta t = \frac{\varphi}{2\pi f} \quad (11)$$

Figura 17 – Componentes módulo complexo



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 18 – Conceito de ângulo de fase



Fonte: Elaborada pelo autor

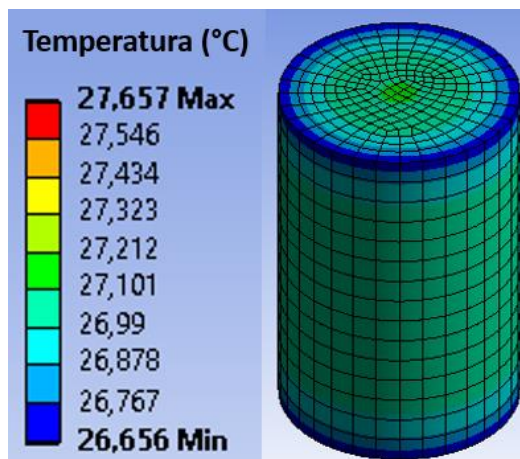
De forma geral, o ângulo de fase e o módulo complexo variam conforme a frequência e a temperatura, fato já amplamente estudado para outros materiais, como diversos materiais poliméricos, diversos materiais compósitos e também misturas asfálticas. Materiais puramente elásticos apresentam ângulo de fase nulo, enquanto materiais puramente viscosos apresentam ângulo de fase de 90° . Assim, o ensaio proposto pela AASHTO T342/11 (2011) varia ambos os parâmetros em ensaios uniaxiais de compressão em corpos de prova cilíndricos com intervalos de deformações pequenas, e pode ser facilmente adaptado para concretos. Os materiais viscoelásticos têm propriedades de rigidez (incluindo $|E^*|$ e φ) dependentes da frequência de carregamento, o que é sistematicamente avaliado nas normas de caracterização desse tipo de material. Já há normativa nacional de ensaio de módulo complexo para misturas asfálticas (DNIT 416/2019 – ME), e o mesmo foi adaptado nesta pesquisa para concretos.

3.6 Modelagem computacional

Com o avanço computacional, tornou-se possível a resolução de modelos complexos que previamente levariam muito tempo para serem resolvidos. Isso pode ser resolvido utilizando-se o Método dos Elementos Finitos (MEF), que discretiza uma

malha para transformar um problema de valor de contorno analiticamente complexo em um problema de solução de equações matriciais, cuja solução é buscada nos nós da malha e aproximada entre os nós. Um exemplo de malha de elementos finitos utilizada para solução de uma equação de calor é dado na Figura 19.

Figura 19 – Exemplo de malha para modelagem computacional com MEF para solução de um problema de aquecimento de corpos de prova



Fonte: Elaborada pelo autor

Hoje o MEF já está amplamente difundido na engenharia e seu uso requer entendimento da física por trás dos resultados apresentados pelos *softwares*, o que implica na necessidade de fornecer dados e condições de contornos coerentes à análise que se deseja fazer. Em geral, esses programas trabalham com elementos finitos, o que requer uma boa discretização do objeto de análise, normalmente obtida através de um estudo de sensibilidade de malha (ESSS, 2022).

Para a análise térmica transiente, um *software* de elementos finitos resolve, para o interior da geometria, a equação diferencial da condução de calor acrescida de uma fonte de geração de calor (LIENHARD IV; LIENHARD V, 2020):

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

onde k é a condutividade térmica ($\text{W/m}^\circ\text{C}$), \dot{q} é a liberação de calor volumétrica (W/m^3), ρ é a densidade do concreto (k/m^3), c é o calor específico ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$), T é a temperatura ($^\circ\text{C}$) e t é o tempo (s).

Vale ressaltar que no início do carregamento, a temperatura não varia no volume (condição adiabática), então o primeiro termo seria nulo e a variação de temperatura no tempo $\partial T / \partial t$ é dado pela razão entre a liberação de calor volumétrica \dot{q} e o produto da densidade com o calor específico ρc (Equação (13)).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\dot{q}}{\rho c} \quad (13)$$

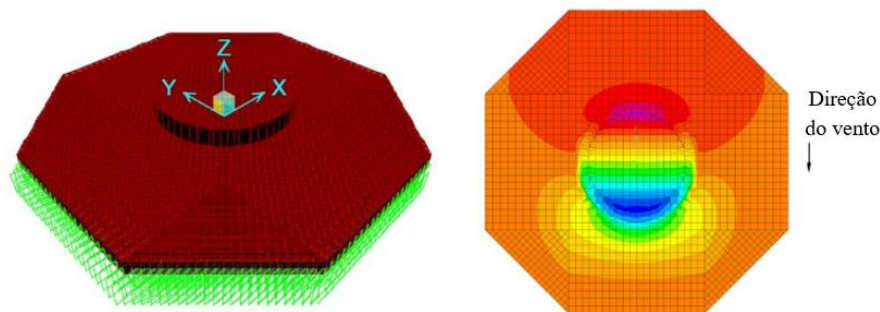
Já para a superfície da geometria, onde ocorrem as trocas de calor com o meio, é aplicada a Lei de Newton de resfriamento (Equação (14)).

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (14)$$

Onde q é o fluxo de calor por convecção (J/m^2), h é o coeficiente de troca de calor convectiva, ou coeficiente de filme ($\text{W/m}^2^\circ\text{C}$), T_s é a temperatura na superfície e T_∞ é a temperatura ambiente, longe da superfície ($^\circ\text{C}$).

Para a análise mecânica, o *software* considera o equilíbrio da estrutura para determinar os esforços que estão atuando ao longo de toda a geometria, exemplificado na Figura 20.

Figura 20 – Exemplo de análise mecânica com elementos finitos



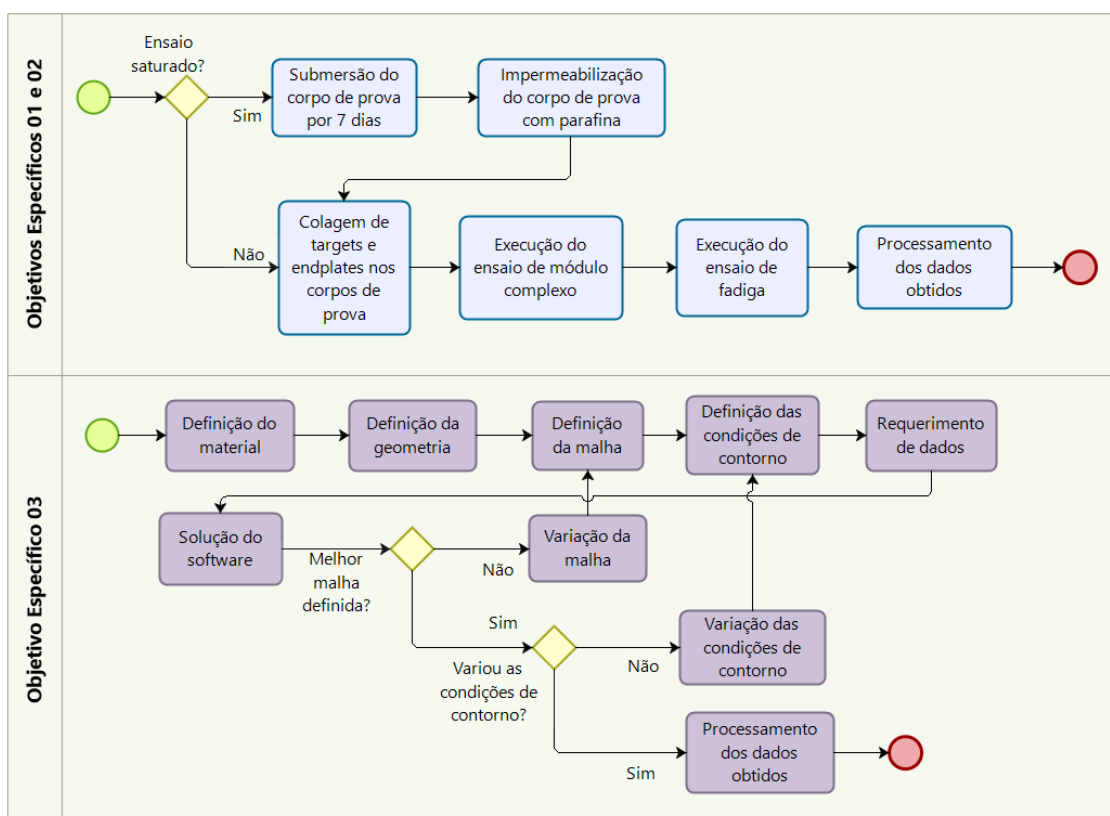
Fonte: WANG e FANG, 2021 - Adaptado

Há a possibilidade de tornar os esforços variáveis ao longo do tempo, de forma a determinar a resistência à fadiga. Wang e Fang (2021) compararam diferentes normas relativas à fadiga do concreto (ACI PRC-215-92 1997; DNV-OS-J101 2004; Eurocode 2; Model Code 2010) através da aplicação das normas a uma turbina eólica comum, norte-americana, em geometria e cargas da fundação e comparando seus resultados com os resultados do Método dos Elementos Finitos. Com isso, os autores observaram que essas normas podem ter resultados em conflito, o que novamente evidencia a necessidade de avanço na compreensão da fadiga de materiais cimentícios. Reitera-se que não existem normas que regulamentem ou parametrizem ensaios de fadiga em concreto no Brasil.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a caracterização dos materiais utilizados (Seção 4.1) e o método adotado nos ensaios e nas simulações realizadas, descrita nas Seções 4.2 e 4.3, respectivamente. O método está resumido no fluxograma da Figura 21.

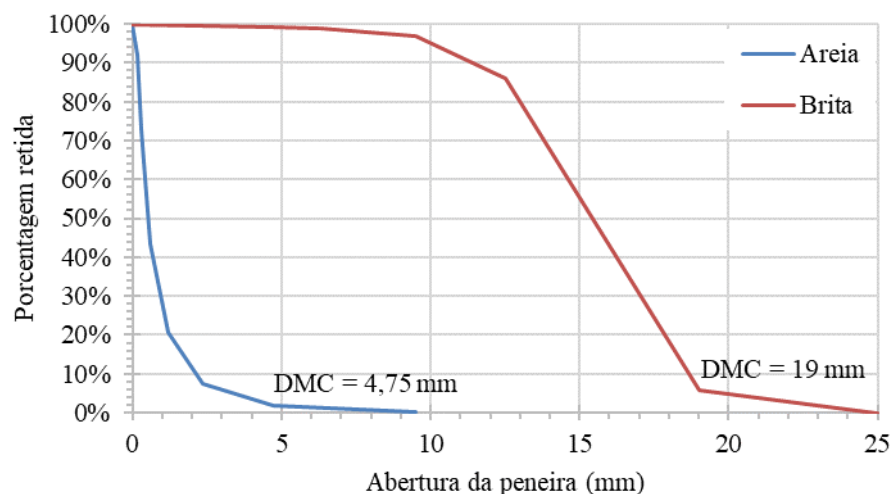
Figura 21 – Fluxograma representando o planejamento da pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor

4.1 Caracterização dos materiais utilizados

Para todos os ensaios, utilizaram-se corpos de prova cilíndricos extraídos de um corpo de prova prismático de concreto convencional, cujo traço em massa foi: 1:1,84:2,63:0,5 (cimento : areia : brita : relação água/cimento). A granulometria dos agregados, conforme o procedimento da NBR NM 248 (ABNT, 2001), está apresentada na Figura 22. A dimensão máxima característica (DMC) da brita utilizada foi de 19 mm e da areia foi de 4,75 mm. A brita é de origem granítica e a areia é quartzítica.

Figura 22 – Granulometria dos agregados

Fonte: Elaborada pelo autor

As massas específicas dos agregados determinadas conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021) e a NM 53 (ABNT, 2009) estão apresentadas na Tabela 1, bem como a massa específica do cimento, obtida junto ao fabricante (Apodi) para o lote investigado.

Tabela 1 – Massa específica e massa unitária

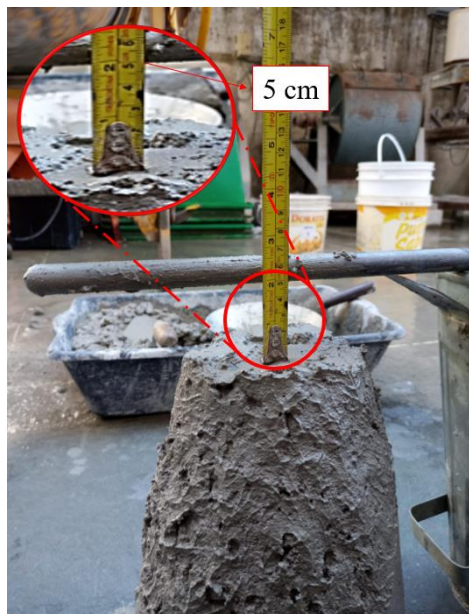
Componente	Massa específica seca (g/cm ³)
Areia	2,62
Brita	2,66
Cimento CP III-40 RS	3,00

Fonte: Elaborada pelo autor

Os constituintes do concreto foram misturados em betoneira, e obteve-se um abatimento de 5 cm (Figura 23), determinado conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1996). Corpos de prova (CPs) foram moldados em formato prismático, com cura submersa em tanque com água, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2015). Após 28 dias da moldagem, foram extraídos dez corpos de prova cilíndricos com diâmetros de 6,4 cm, conforme a NBR 7680-1 (ABNT, 2015), ilustrado na Figura 24. Em seguida, os CPs foram retificados, ficando com uma relação altura/diâmetro de 2. Os CPs, após a retificação,

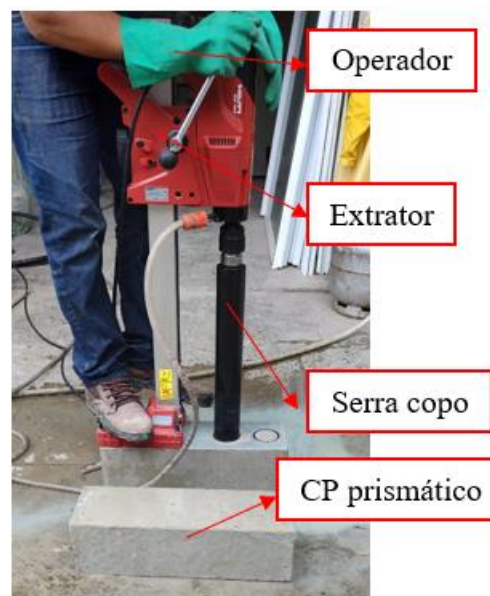
estão apresentados na Figura 25.

Figura 23 – Abatimento do concreto



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 24 - Extração dos CPs



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 25 – Corpos de prova extraídos para execução dos ensaios de determinação do módulo e fadiga



Fonte: Elaborada pelo autor

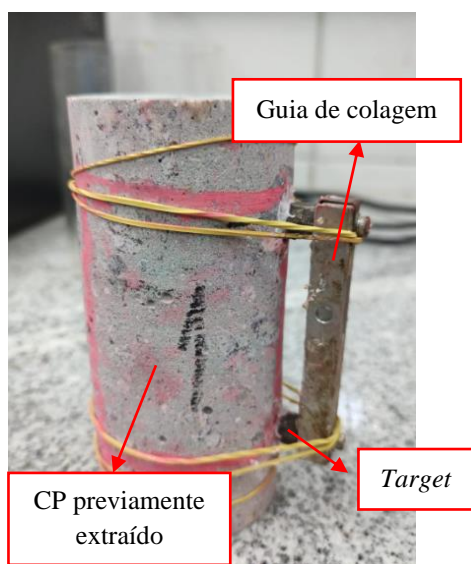
Posteriormente, foram realizados os ensaios monotônicos com carga crescente de compressão axial e de tração indireta, pelas normas NBR 5739 (ABNT, 2018) e NBR 7222 (ABNT, 2011), respectivamente, sendo o primeiro utilizado para controle de qualidade e o segundo para auxiliar na determinação dos valores de entrada do ensaio de fadiga. A resistência à compressão foi de 34,6 MPa e a resistência à tração

por compressão diametral foi de 3,2 MPa na condição saturada e 3,5 MPa na condição seca.

4.2 Ensaios dinâmicos

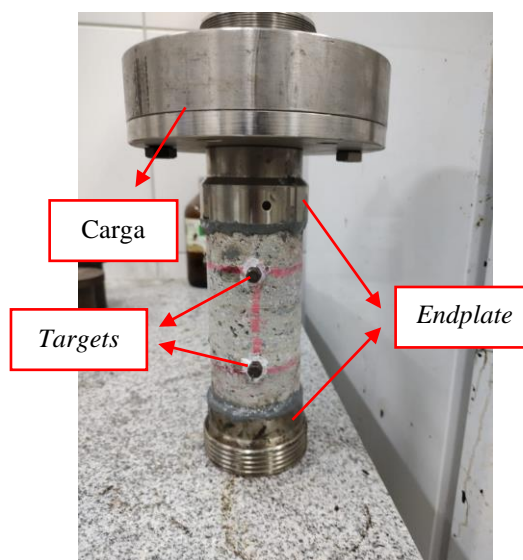
Para os ensaios de definição do valor absoluto do módulo complexo e da resistência à fadiga, os CPs passaram por um processo de colagem de *targets* e de placas metálicas (*endplates*), necessitando de pelo menos 24h de repouso para garantir a devida fixação, o que está ilustrado nas Figura 26 e 27. Foram aplicados nos CPs, em ambos os ensaios, tensões controladas, nos estados seco e saturado à temperatura ambiente (em torno de 27 °C), com medição de deformações com transdutores para medição de deslocamento linear (*Linear Variable Differential Transformers* - LVDTs) de *gauge length* de 75 mm e com 120° entre si ao longo da circunferência lateral dos CPs. Todos os ensaios foram realizados após mais de 50 dias da moldagem.

Figura 26 – Colagem dos targets



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 27 – Colagem dos endplates



Fonte: Elaborada pelo autor

Para a definição do valor absoluto do módulo complexo ($|E^*|$) e do ângulo de fase (ϕ), o material foi submetido a carregamento de compressão senoidal, com valor

máximo de 11,5% da resistência à compressão do material (evitando dano) – limitado pelo limite de carga do equipamento – com frequências de 25, 10, 5 e 1 Hz, com 20 ciclos para as duas primeiras frequências, 15 ciclos para a frequência de 5Hz e 5 ciclos para a frequência de 1Hz.

Para a determinação da resistência à fadiga, os CPs foram carregados com os níveis de carregamento alternado de tração axial a 10 Hz apresentados na Tabela 2 e com controle da temperatura ambiente em torno de 27°C, não havendo, no entanto medição de temperatura na superfície dos corpos de prova. O tipo de carregamento foi escolhido por se caracterizar como homogêneo, permitindo a análise da variação do módulo de elasticidade ao longo do ensaio e construção de uma curva de degradação.

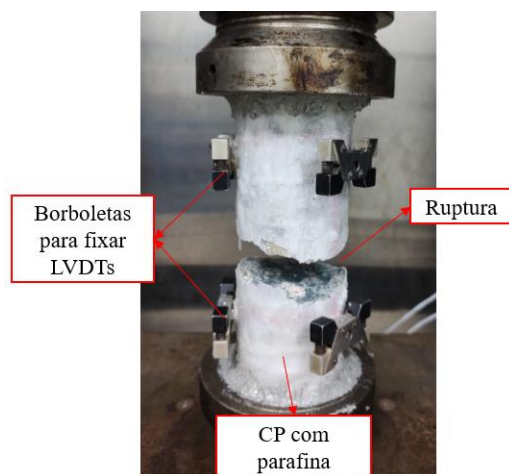
Tabela 2 – Carregamento

CP	σ_a [MPa]
1, 2, 4, 6	2,57
3, 7	2,25
5, 8	1,93
9	1,61
10	1,29

Fonte: Elaborada pelo autor

O ensaio de fadiga encerrava quando ocorria a falha do material ou quando se atingia o limite de tempo estipulado inicialmente (cerca de 3h). Neste caso, reiniciava-se o ensaio até atingir a falha do material, exemplificada na Figura 28, ou alcançasse dois milhões de ciclos (SAINI; SINGH, 2020), o que se considerou como um limite máximo de ensaio. Para a saturação, os CPs de 1 a 5 foram mantidos em tanque com água por pelo menos sete dias previamente aos ensaios, como realizado por Cervo e Balbo (2004). Logo em seguida, utilizou-se parafina sobre a superfície dos CPs para evitar a perda de umidade durante os ensaios de fadiga (SAITO; IMAI, 1983).

Figura 28 - Exemplo de falha do material por fadiga



Fonte: Elaborada pelo autor

Posteriormente, foram construídas as respectivas curvas de Wöhler (S-N), a curva de degradação (E vs. N) e a curva de variação do ângulo de fase ao longo dos ciclos

4.3 Modelagem computacional

A análise foi feita no módulo *Transient Thermal* do *software* Ansys, baseando-se em dados obtidos através dos ensaios de fadiga e dados de literatura. Primeiramente os materiais foram definidos com as propriedades físicas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades dos materiais (*default*)

Propriedade	Concreto*	Aço inox
Densidade (kg/m ³)	2300 (2125)	7750
Condutividade térmica (W/m.°C)	0,72 (1,48-1,54)	15,1
Calor específico (J/kg.°C)	780 (725)	480

* Exceto para Vogel *et al.* (2020) que apresentaram valores indicados entre parêntese

Fonte: Elaborada pelo autor

A Tabela 4 apresenta a relação entre as geometrias correspondentes aos corpos de prova dos autores citados e a temperatura inicial, correspondente à

temperatura ambiente T_{∞} durante os ensaios realizados pelos autores, quando a informação não estava disponível ou havia uma pequena variação em torno de 20 °C, assumiu-se 20 °C (considerando que os ensaios costumam ser feitos sem uso de câmara térmica em grandes salas de laboratórios de ensaios mecânicos em países mais frios). Além da geometria e do material estabelecido, definiu-se que haveria condução térmica em todo o volume de concreto, dos endplates e do atuador e convecção apenas nas superfícies externas de ambos, os demais parâmetros estabelecidos foram: tempo simulado (30.000 s), liberação de calor volumétrica \dot{q} , coeficiente de troca de calor convectiva h e temperatura inicial.

Tabela 4 – Geometrias analisadas e temperaturas iniciais

Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Ti (°C)	Fonte
100	200	20	Sainz-Aja <i>et al.</i> (2021)
100	280	23	Hümme <i>et al.</i> (2016)
100	280	23	Haar <i>et al.</i> (2016)
100	300	19	Vogel <i>et al.</i> (2020)
60	120	20*	Myrtja <i>et al.</i> (2021)
60	180	20*	Elsmeier <i>et al.</i> (2016)
60	180	27	Otto <i>et al.</i> (2018)
60	180	20*	Deutscher <i>et al.</i> (2019)
60	180	25	Markert <i>et al.</i> (2022)

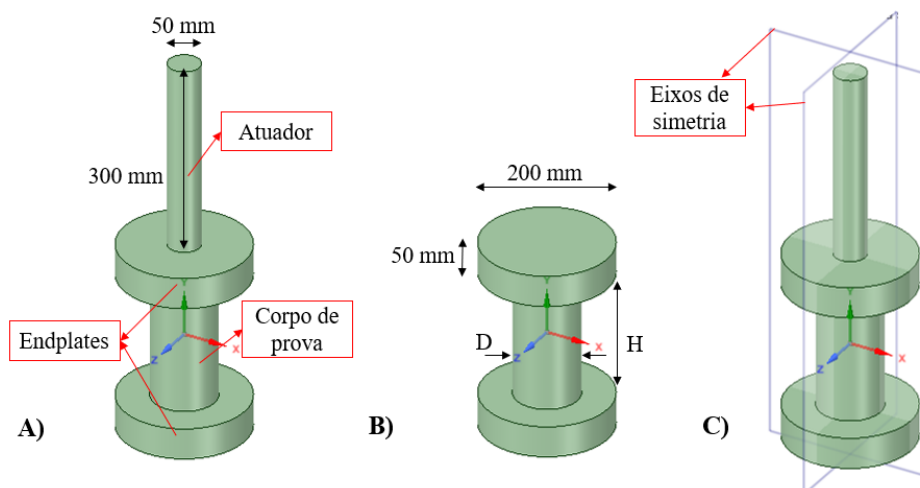
* Valor assumido por ausência de informações na fonte ou várias temperaturas diferentes

Fonte: Elaborada pelo autor

Em todas as geometrias, para a análise, foram acrescentados *endplates* de aço inox com 200 mm de diâmetro e 50 mm de altura, de forma a representar a fuga de calor pelos componentes utilizados pelos autores durante seus ensaios. Além disso, avaliou-se a influência do atuador da máquina, representado por um cilindro de 50 mm de diâmetro e 300 mm de altura também em aço inox (Figura 29.A), com simulações feitas até 30.000 s para uma malha com elementos de dimensões de 10% dos diâmetros dos componentes, com 4.900 W/m³ de liberação de calor volumétrica \dot{q} , coeficiente de troca de calor convectiva h de 12 W/m².°C e com temperatura inicial de 25 °C. Nesse caso, não foi observado efeito significativo (Figura 30), sendo assim retirado das análises seguintes (Figura 29.B). De forma a otimizar o tempo de processamento computacional, todas as simulações foram feitas considerando os dois eixos de simetria apresentados na

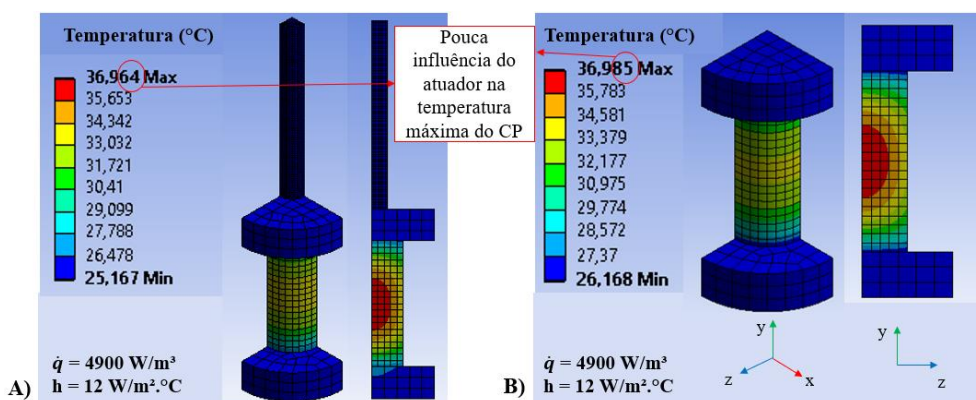
Figura 29.C, como os tempos obtidos foram menores que 30 s, valor aceitável, não foram feitas simulações com axissimetria.

Figura 29 – Geometria de análise: A) Considerando o atuador, B) Desconsiderando o atuador, C) Eixos de simetria



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 30 – Efeito da presença do atuador durante as simulações: A) Resultados com atuador, B) Resultados sem atuador



Fonte: Elaborada pelo autor

Para escolher a malha adotada para os corpos de prova, analisaram-se os resultados de simulações feitas após 30.000 s para cinco malhas diferentes com elementos de dimensões entre 5% e 40% do diâmetro, com 4.900 W/m^3 de liberação de calor volumétrica \dot{q} , coeficiente de troca de calor convectiva h de $12 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ e com

temperatura inicial de 25 °C, para possibilitar a comparação entre diferentes geometrias, para as demais simulações foram utilizados os valores apresentados na Tabela 4. Para os *endplates*, manteve-se as malhas com elementos de dimensões de 10% dos seus diâmetros.

A Figura 31 apresenta os valores de referência para o *skewness* – parâmetro que reflete a distorção dos elementos e, por consequência, a qualidade da malha e dos resultados obtidos.

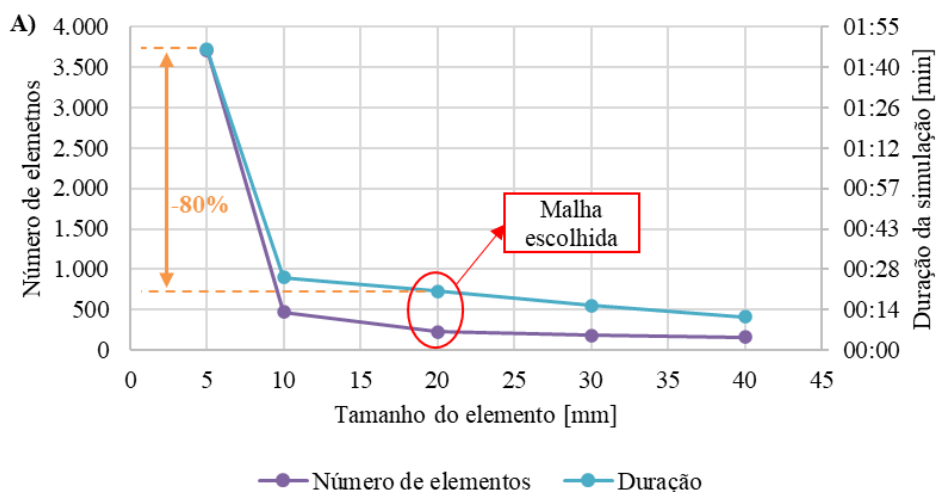
Figura 31 – Valores de referência do *skewness* da malha

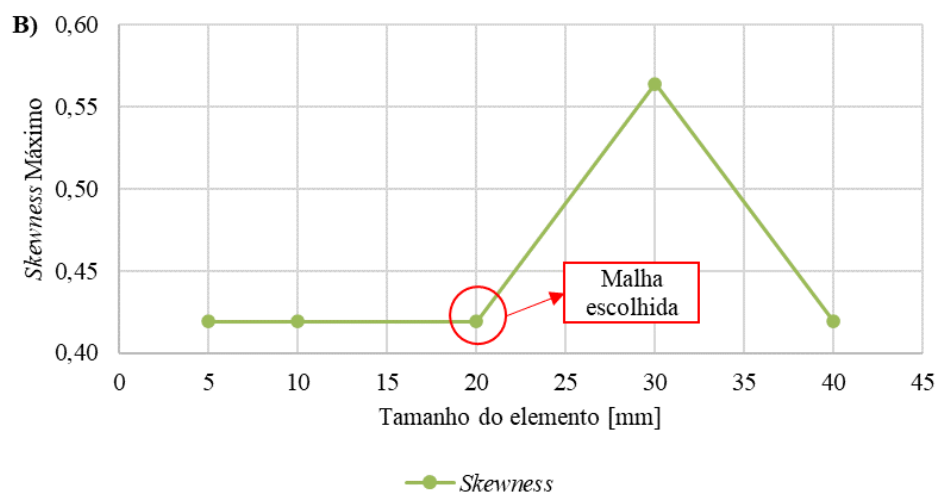
Excelente	Muito boa	Boa	Aceitável	Ruim	Inaceitável
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Fonte: Ansys (2015)

A Figura 32 apresenta um exemplo da relação entre o tamanho do elemento, a duração da simulação e a quantidade total de elementos (Figura 32.A) e a relação entre o tamanho do elemento e o *skewness* máximo da geometria analisada (Figura 32.B). Um comportamento similar foi identificado para todas as geometrias analisadas. Confrontando a Figura 31 com a Figura 32.B, percebe-se que todas as malhas ficaram entre as classificações “Muito boa” e “Boa”, o que sugere a confiabilidade dos resultados obtidos.

Figura 32 – Exemplo do impacto do tamanho do elemento: A) Na duração da simulação, B) Na qualidade da malha

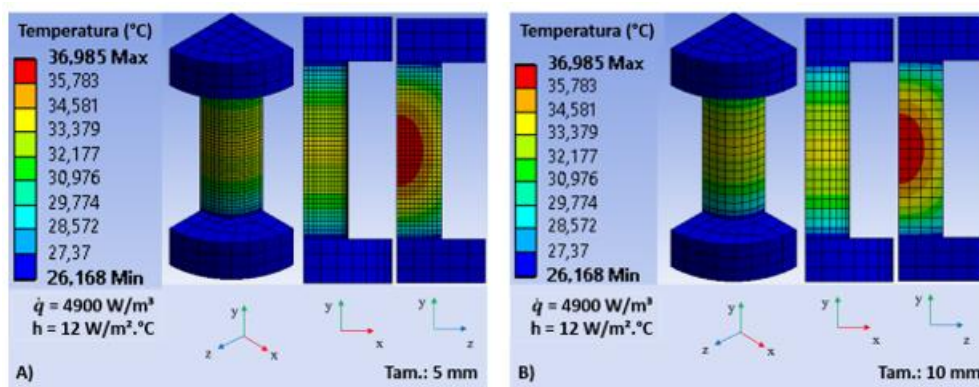


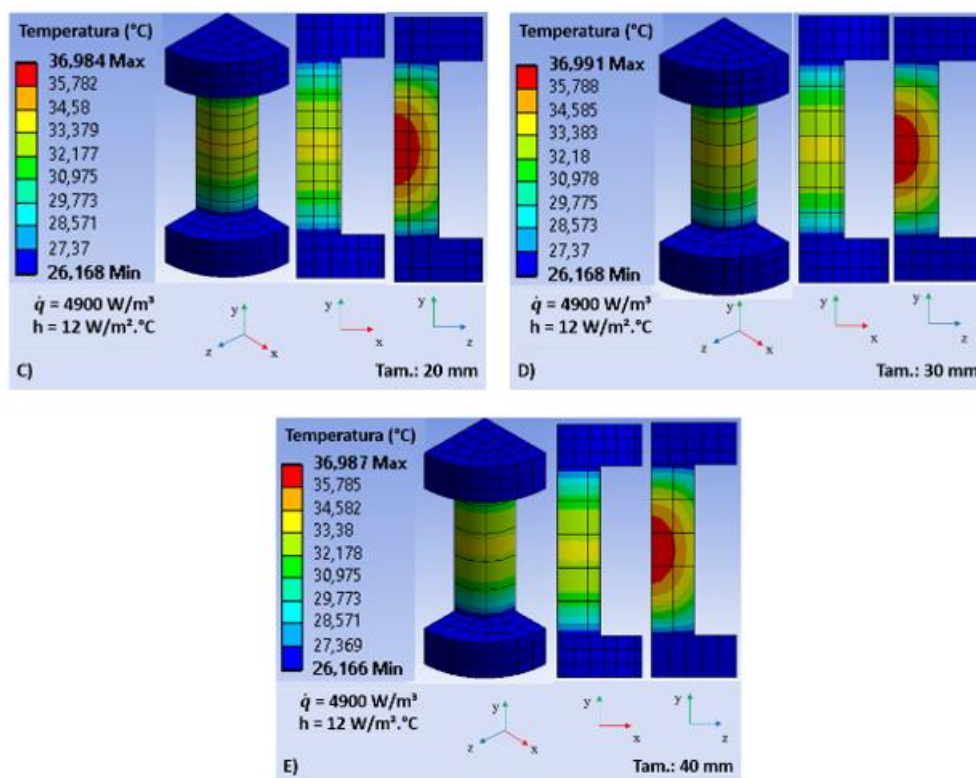


Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 33 apresenta um exemplo de resultados obtidos para cada malha, onde é possível identificar a variação de temperatura ao longo da geometria analisada correspondente às cores da escala.

Figura 33 – Exemplo de resultado (utilizado para definir a malha de elementos finitos a ser utilizada) de temperatura após 30.000s para malhas de: A) 5 mm, B) 10mm, C) 20 mm, D) 30 mm, E) 40 mm

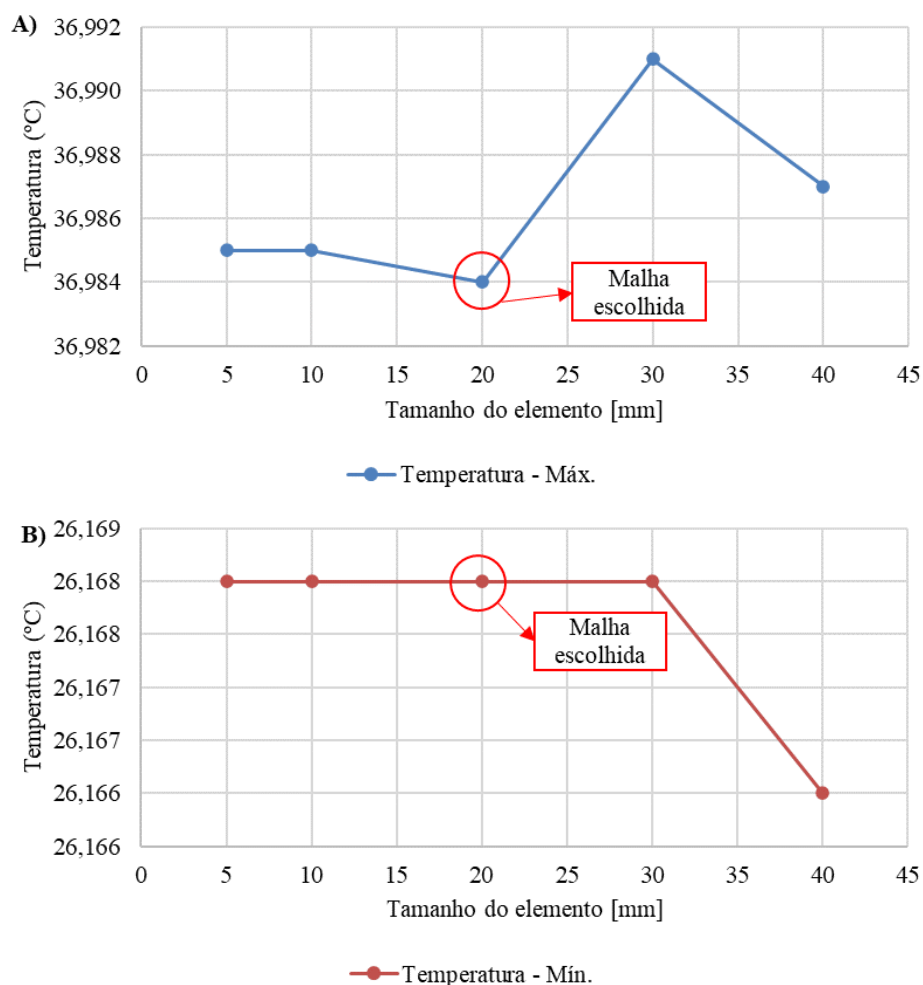




Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 34 apresenta a convergência dos resultados de temperatura máxima (Figura 34.A) e mínima (Figura 34.B) em função do tamanho dos elementos. Analisando as Figuras 32, 33 e 34 em conjunto, percebe-se que a malha com o tamanho de 20 mm (227 elementos) apresentou resultados tão precisos quanto a malha mais refinada (3707 elementos) em um tempo 80% menor. Um comportamento similar foi identificado para todas as geometrias analisadas. Assim, a malha correspondente a 20% do diâmetro foi adotada para as demais simulações realizadas, classificando-se por “Muito boa”, conforme a Figura 31 e sendo sempre menor ou igual ao tamanho dos elementos da malha dos *endplates*, zona de menor interesse nessa análise.

Figura 34 – Convergência de malha: A) Temperatura máxima, B) Temperatura mínima

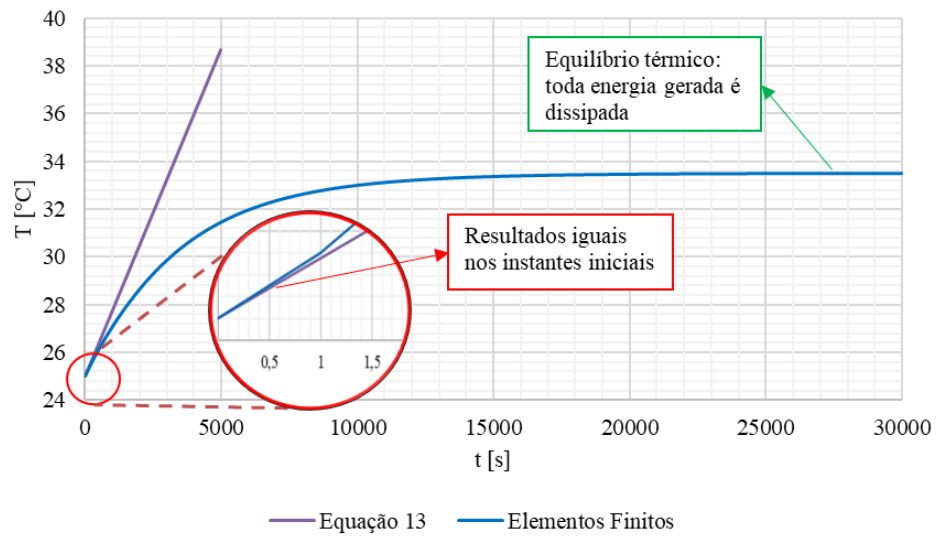


Fonte: Elaborada pelo autor

As demais simulações foram feitas para valores de liberação de calor volumétrica de 5.000 a 40.000 W/m³ com variação de 5.000 em 5.000 W/m³ e com coeficiente de troca de calor convectiva de 6 a 36 W/m².°C com variação de 6 em 6 W/m².°C. Os valores de liberação de calor volumétrica são compatíveis com valores obtidos aplicando a Equação (10) e os valores de coeficiente de troca de calor convectiva abrangem valores observados em situações reais (VIDAL, 2022) e valores observados em laboratório (NGUYEN *et al.*, 2012). A temperatura inicial correspondeu ao descrito na Tabela 4 e o tempo utilizado foi de 30.000 segundos, aproximadamente correspondente ao tempo necessário para a temperatura estabilizar (equilíbrio térmico) (Figura 35). Observa-se, ainda, na Figura 35, que o início do aquecimento é

adequadamente representado pela condição adiabática (válida instantaneamente no instante inicial).

Figura 35 – Exemplo de estabilização da temperatura



Fonte: Elaborada pelo autor

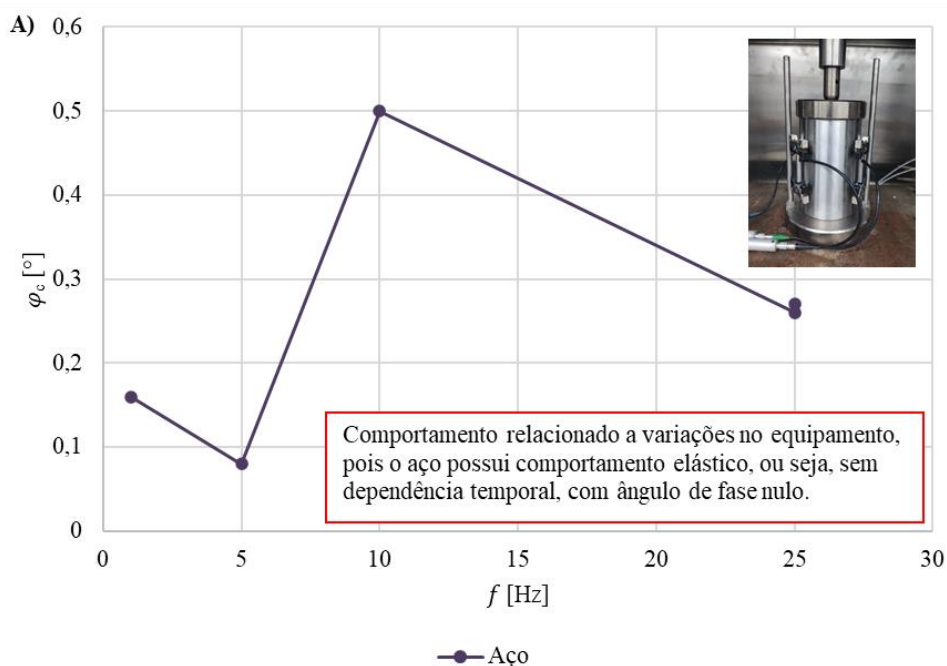
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

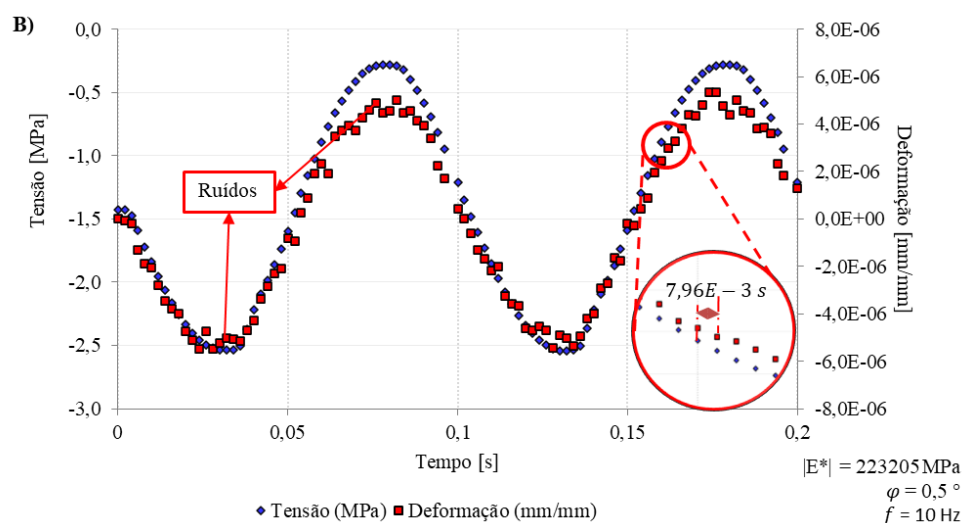
Este capítulo apresenta os resultados dos ensaios (com avaliação do módulo e da resistência à fadiga) e das simulações feitas (com avaliação do autoaquecimento), descrita nas Seções 5.1 e 5.2, respectivamente, bem como sua análise e correspondentes discussões.

5.1 Ensaios dinâmicos

Os resultados de ângulo de fase de concretos são próximos de zero (material próximo da elasticidade), de maneira que é importante verificar eventuais defasagens de sinais ocasionadas pelo sistema de ensaios e não pelo comportamento do material (ângulo de fase do equipamento). Isso pode ser feito a partir de ensaios em materiais notadamente elásticos para as amplitudes de carregamento investigadas, como o aço. Os resultados de ângulo de fase para o aço encontram-se na Figura 36.A. Vale destacar que as curvas de deformação apresentaram alguns ruídos (Figura 36.B). Porém, a proximidade com o formato senoidal permite corrigir os dados obtidos para o concreto, com ajustes de funções senoidais para obtenção das amplitudes e das defasagens.

Figura 36 – Determinação do ângulo de fase do equipamento: A) Ângulo de fase, B) Curva tensão x deformação para 10 Hz

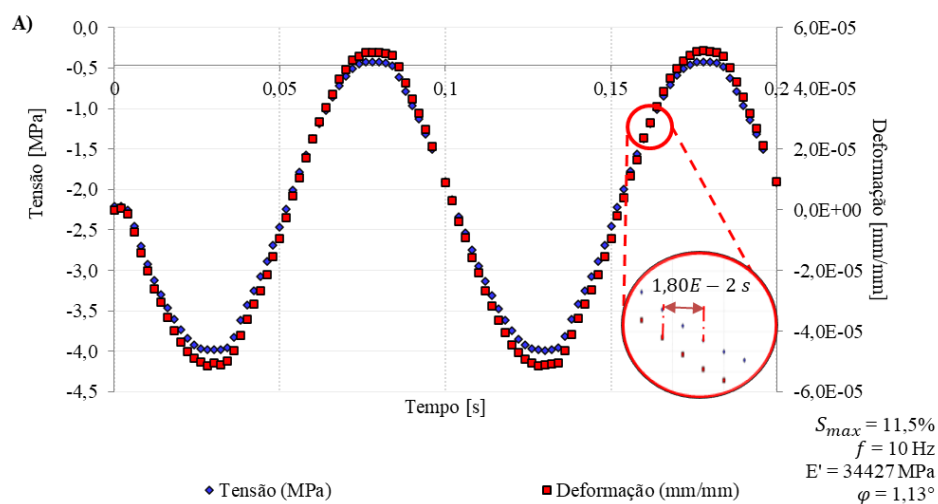


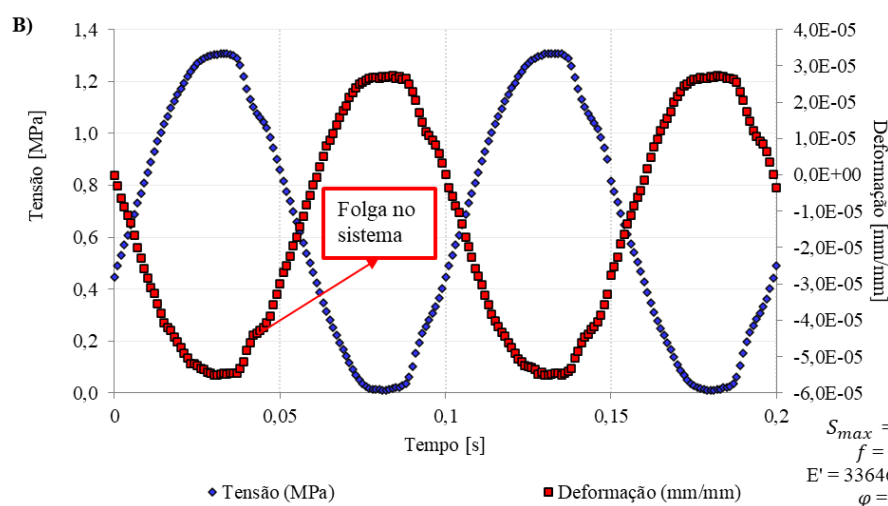


Fonte: Elaborada pelo autor

Destaca-se, ainda, que, para todas as frequências e todos os corpos de prova de concreto, as curvas de tensão e deformação apresentaram bom ajuste ao formato senoidal o que sugere a qualidade dos dados analisados, fato exemplificado nas Figuras 37.A e 37.B para os ensaios de determinação do valor absoluto do módulo complexo apenas com compressão (medidas positivas da célula de carga) e fadiga apenas com tração (medidas negativas da célula de carga), respectivamente. Na fadiga, a folga apresentada na Figura 37.B é inerente ao sistema de ensaio.

Figura 37 – Exemplo de sinais de tensão e de deformação do concreto nos ensaios de determinação: A) Do valor absoluto do módulo complexo com compressão, B) Da resistência à fadiga a tração

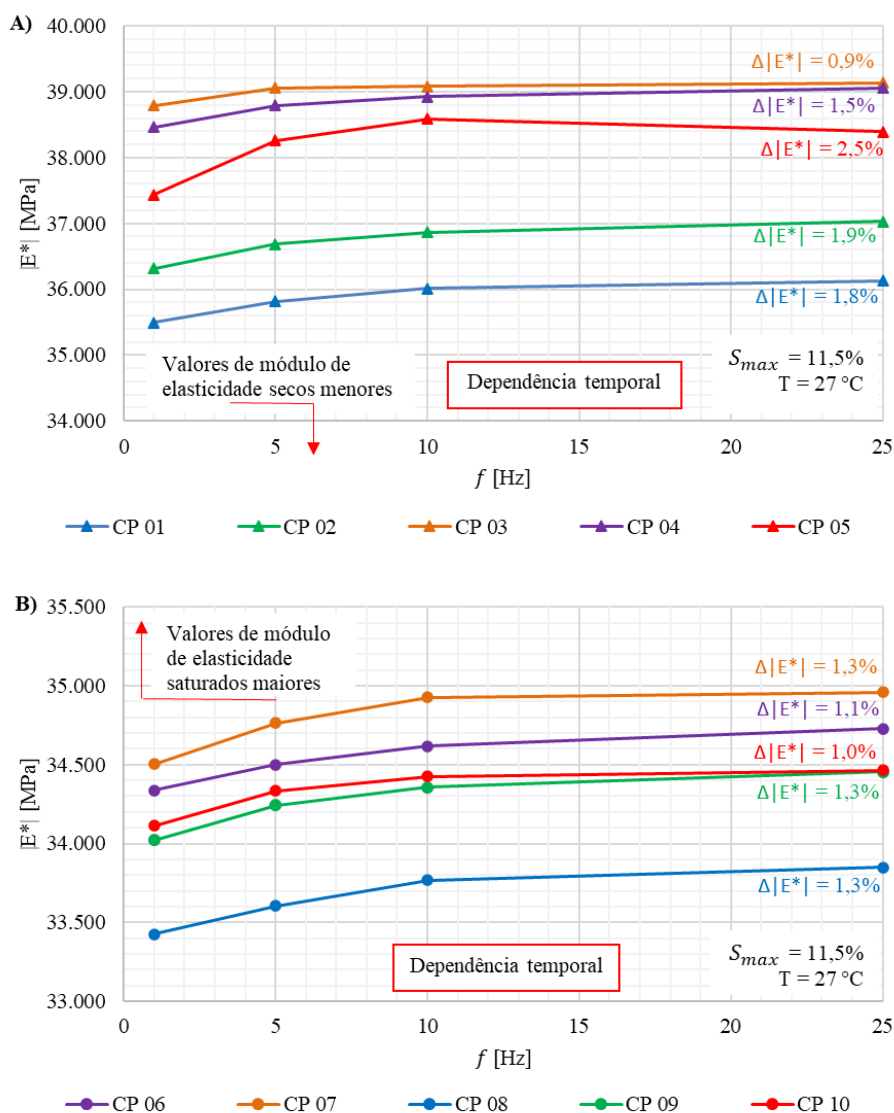




Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 38 apresenta os resultados de módulo complexo obtidos. Observa-se que tanto os CPs saturados (Figura 38.A) quanto os CPs secos (Figura 38.B) apresentaram comportamento de rigidez dependente da frequência de carregamento, com aumento entre 0,9% e 2,5% quando a frequência varia de 1 a 25Hz, indicando uma dependência no domínio da frequência para o material, ainda que pequena. A maior variação se deu no CP 5, pela maior variação no ângulo de fase (Figura 39.A). Além disso, todos os concretos saturados tiveram módulo complexo maior que o seco. Nota-se uma variação entre os CPs em cada condição que pode ser justificado pela diferença de volume de agregados contidos em cada CP devido à extração. A variação do módulo em função da frequência e os resultados maiores no caso saturado também foi identificado por Markert *et al.* (2022) para concretos de alto desempenho, porém os autores secaram os corpos de prova à 105 °C antes do ensaio na condição seca, o que pode reduzir a resistência e o módulo do material, e mantiveram os corpos de prova em baixo d'água durante o ensaio na condição saturada. Nesse sentido, os autores justificaram o aumento do módulo como efeito da dificuldade de a matriz cimentícia se deformar na presença de água. No entanto, o efeito pode ser justificado pelo aumento da resistência devido a contínua hidratação do concreto e, consequentemente, do módulo, o que também explicaria a proximidade entre os resultados de ângulos de fase obtidos para as duas condições analisadas (Figura 39.C).

Figura 38 – Efeito da frequência no módulo complexo de A) CPs saturados e B) CPs secos

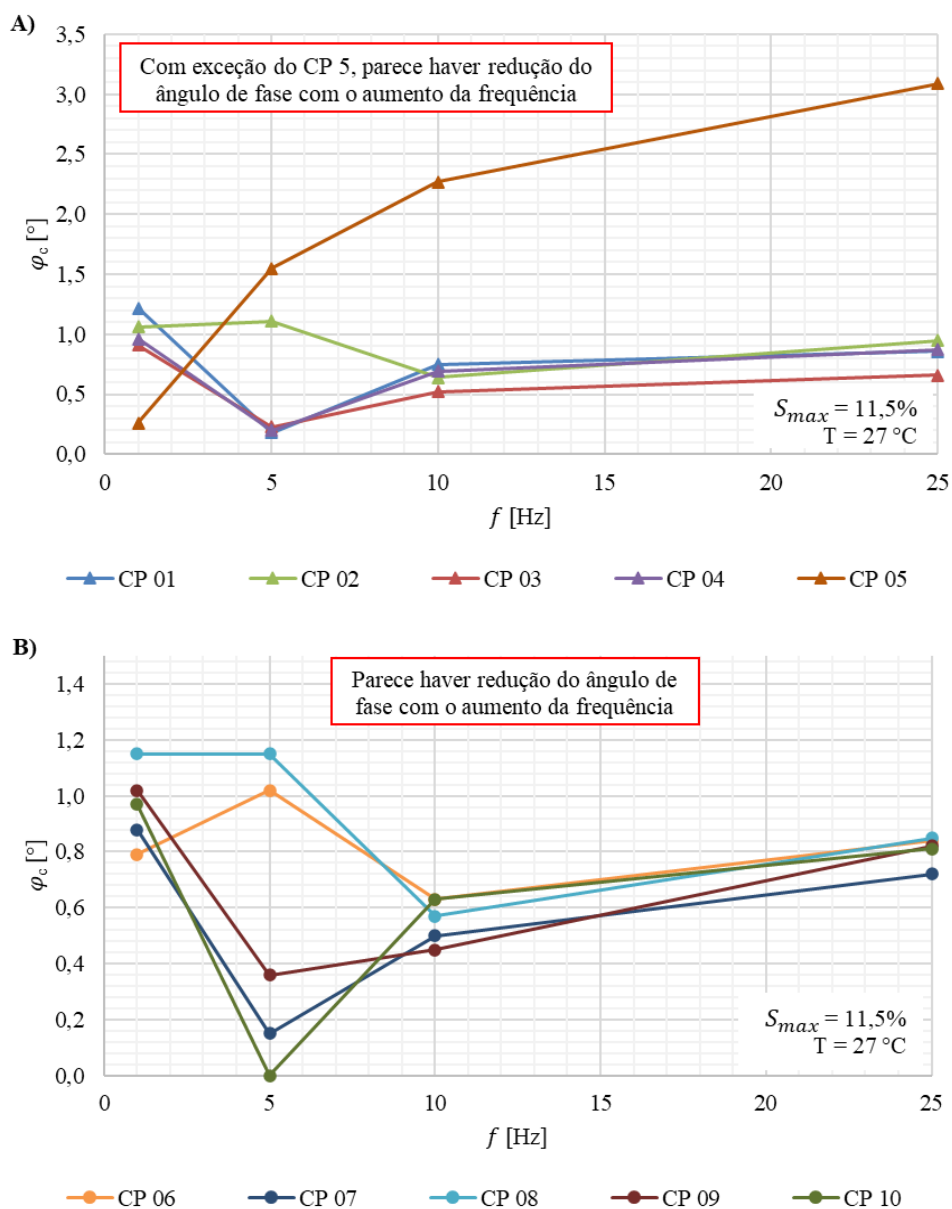


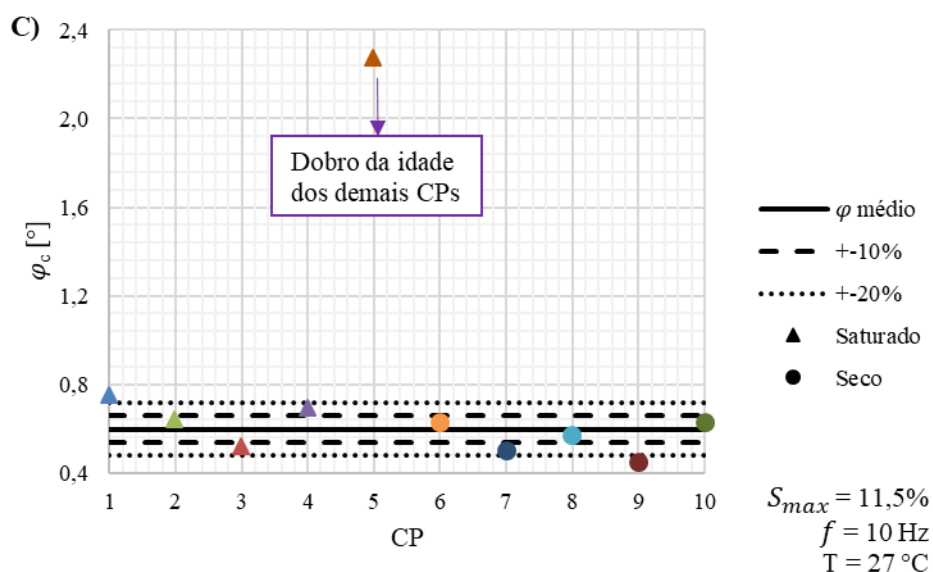
Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 39 apresenta os resultados de ângulo de fase para os CPs saturados (Figura 39.A) e secos (Figura 39.B). Obtiveram-se ângulos de fase de até $3,1^{\circ}$, indicando que mesmo nos casos com componente viscosa mais notável ainda assim ela é pequena no concreto para as frequências avaliadas, ainda que existente (o que explica a existência de dissipação). Vale destacar que o ângulo de fase não costuma ser medido em materiais cimentícios, porém há diversos resultados de fluência em literatura que permitiriam, através de aplicação de modelos reológicos, obter os ângulos de fase dos materiais. Todavia, essa modelagem não fez parte do escopo deste trabalho. Foi

observada uma tendência de redução do ângulo de fase com o aumento da frequência, com exceção do CP 5, provavelmente porque foi testado com o dobro da idade dos demais CPs, os ângulos de fase nas condições seca e saturada foram bastante próximos (Figura 39.C). Para alguns CPs, houve uma variação maior entre as frequências de 5 e 10Hz, fato também observado para o aço (Figura 34.A), indicando que pode ser uma característica do equipamento utilizado que não é constante, reforçando a necessidade de correção para ângulos de fase pequenos.

Figura 39 – Efeito da frequência no ângulo de fase de A) CPs saturados, B) CPs secos, C) Comparação dos resultados

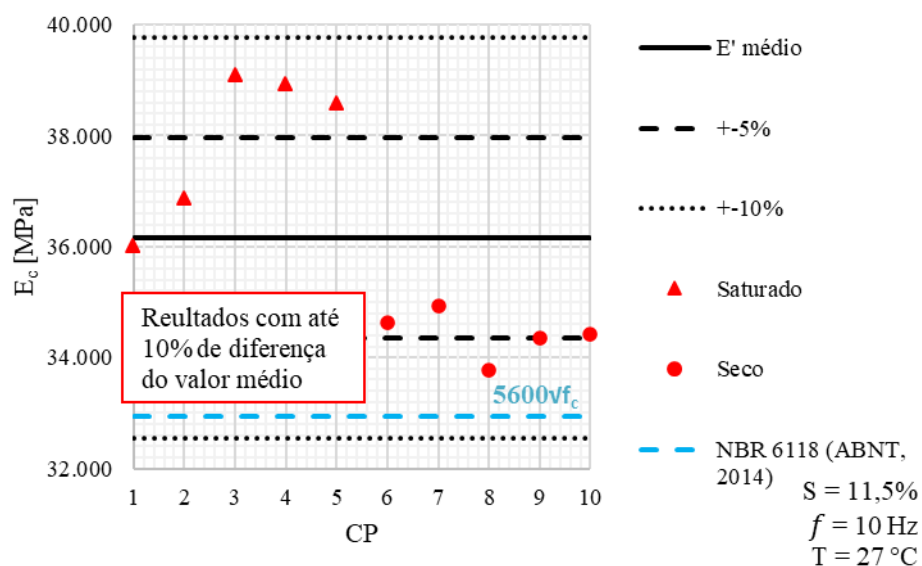




Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 40 apresenta os resultados do ensaio de determinação do valor absoluto do módulo complexo para a frequência de 10 Hz. Observa-se que todos os resultados distam em menos de 10% do valor médio encontrado, indicando que o processo de extração dos corpos de prova não alterou a homogeneidade da amostra.

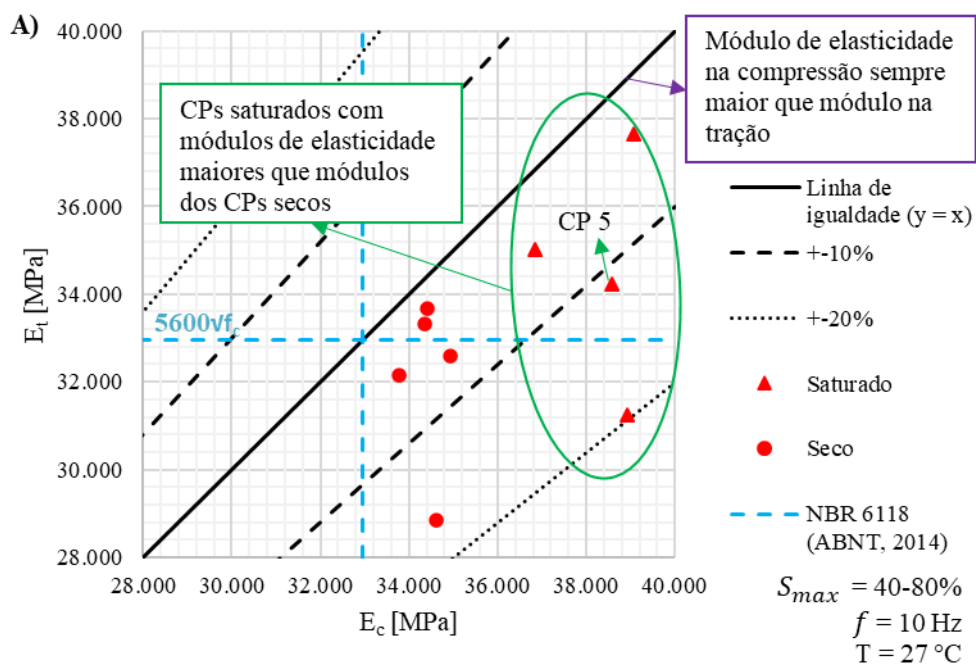
Figura 40 – Resultados de módulo para 10 Hz

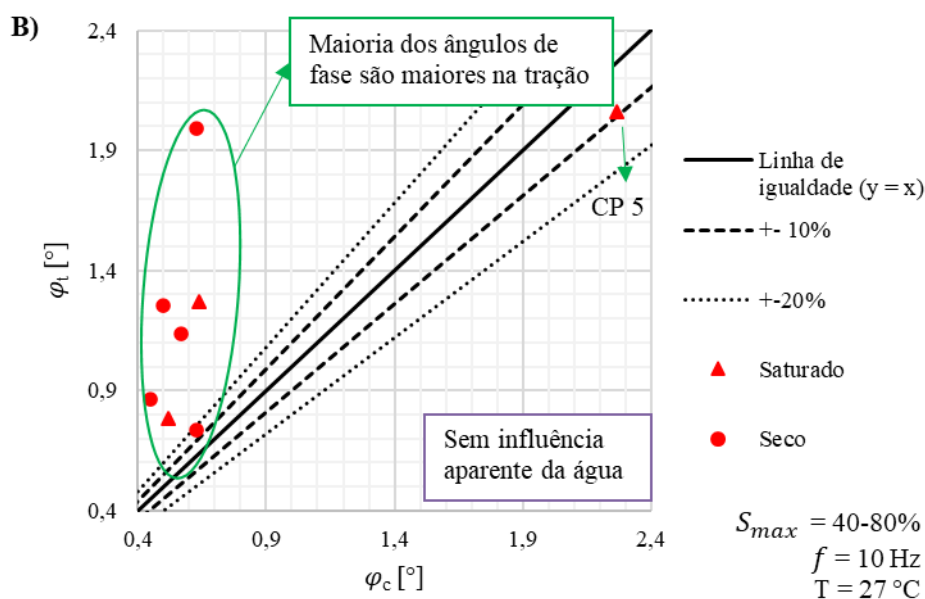


Fonte: Elaborada pelo autor

Os CPs foram submetidos ao ensaio de fadiga a tração e a média do ângulo de fase e do valor absoluto do módulo complexo dos três primeiros ciclos após o primeiro ciclo (para retirar efeitos de acomodação do material) foram usados para comparar com os resultados obtidos anteriormente na determinação do valor absoluto do módulo complexo a compressão. A Figura 41 apresenta a comparação entre os resultados obtidos. Destaca-se que o CP 1 rompeu antes de o equipamento registrar os dados, não sendo possível considerá-lo na análise do módulo elástico, porém não impedindo de usá-lo na curva de Wöhler.

Figura 41 – Comparação de resultados na compressão e na tração: A) Módulo, B) Ângulo de fase





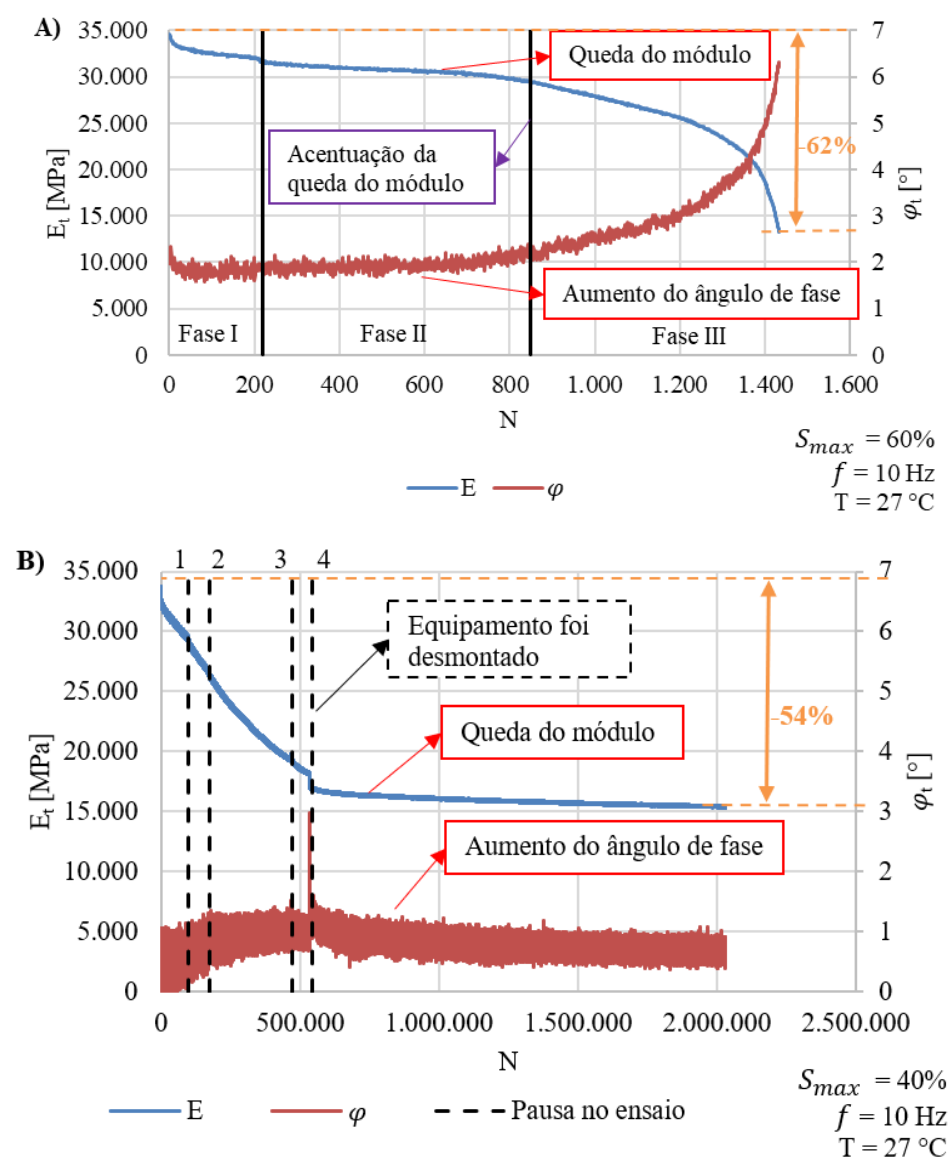
Fonte: Elaborada pelo autor

Nota-se pela Figura 41.A que o módulo de elasticidade na compressão (E_c) foi sempre maior que o módulo na tração (E_t), ainda que a magnitude da tensão aplicada na compressão tenha sido maior (3,98 MPa) que na tração (1,29-2,57 MPa). Esse fato pode ser justificado pela maior deformação das moléculas da matriz cimentícia durante a tração, no estado seco, pela reorganização das cadeias de silicato e, no estado saturado, pelo rompimento das ligações formadas com as moléculas de água. Observa-se também que todos os CPs saturados tiveram módulo maior que os secos, a justificativa para isso é que é necessária uma força maior – e, por consequência, deformações maiores – para romper as pontes de hidrogênio ligadas às cadeias de silicato formadas na presença de água do que para afastar os componentes livres entre as cadeias no estado seco. Como as tensões aplicadas foram sempre menores do que a necessária para romper os CPs, o rompimento das ligações químicas mais fortes provavelmente não foi a principal causa das deformações nos três ciclos iniciais.

Percebe-se, pela Figura 41.B, que, com exceção do CP 5, todos os CPs apresentaram maior ângulo de fase na tração (φ_t) do que na compressão (φ_c), indicando maiores efeitos viscoelásticos na tração. Provavelmente isso acontece devido à mudança na maneira como a estrutura molecular interna é acionada entre o carregamento e o descarregamento. Não há, no entanto, evidência de que a presença de água influencie esse comportamento.

A Figura 42 mostra exemplos de degradação do material ao longo dos ciclos de fadiga, notada pela diminuição do módulo e pelo aumento do ângulo de fase. Aqui vale destacar que o CP 7 rompeu fora da zona de medida dos LVDTs, sendo impossível acompanhar de maneira confiável a degradação devido à fadiga durante todo o ensaio. No entanto, isso não impede a sua aplicação na construção da curva de Wöhler.

Figura 42 – Exemplo de curva de degradação do módulo e aumento do ângulo de fase: A) No estado saturado, B) No estado seco



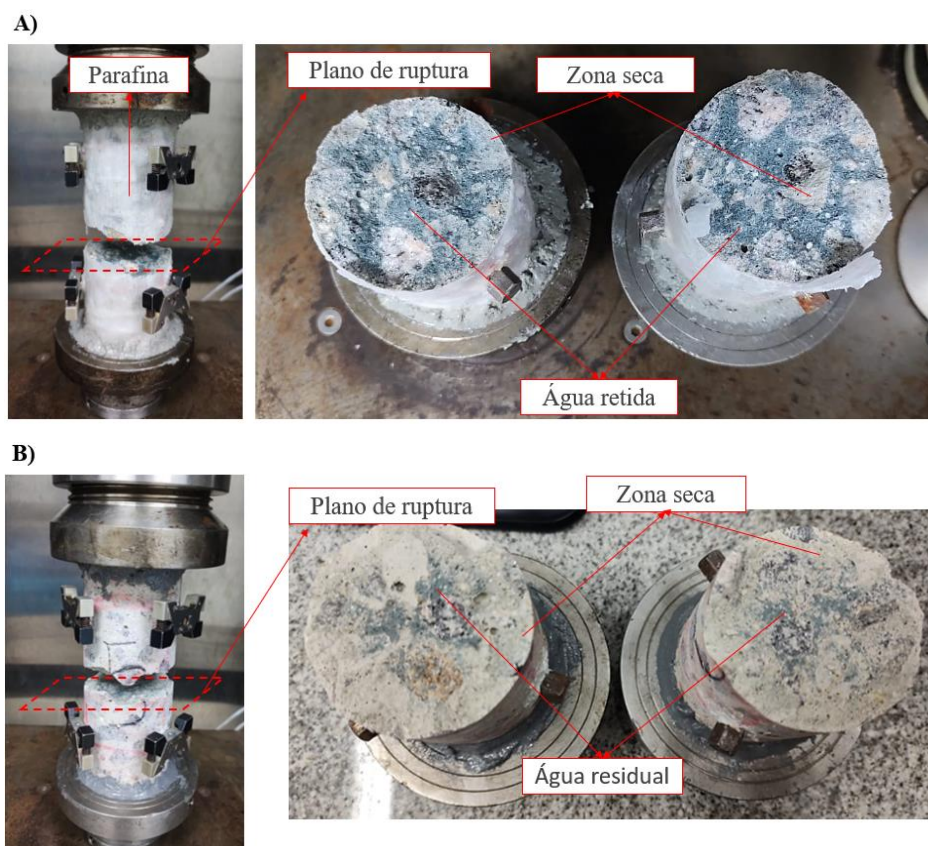
Fonte: Elaborada pelo autor

Percebe-se que a curva de degradação do módulo no estado saturado (Figura 42.A) apresenta formato que é comumente observado em diversos materiais, com 3 fases distintas. Para o estado seco (Figura 42.B), o exemplo apresenta algumas pausas ao longo do ensaio devido à sua duração, e a variação das curvas na quarta pausa se dá pela desmontagem e remontagem do ensaio.

O ponto de falha do material poderia ser atribuído ao número de ciclos equivalente para degradar uma dada porcentagem do módulo inicial, porém não houve padrão entre os CPs ensaiados, havendo rupturas com degradação entre 28% e 62% e o CP 10 não rompeu mesmo com uma degradação de 54% do módulo inicial. Outra possibilidade seria considerar o ponto de falha como o número de ciclos para que a queda do módulo se torne mais acentuada, porém como o CP 7 rompeu fora da zona de medida do LVDT, de maneira que a degradação do módulo não foi percebida com a mesma intensidade ao longo dos ciclos. Então, neste caso, foi considerado o momento em que de fato uma ruptura macroscópica foi observada no CP. Vale ressaltar que a variação do ângulo de fase indica mudança das propriedades viscoelásticas ao longo do ensaio.

A Figura 43 exemplifica a ruptura dos CPs no estado saturado (Figura 43.A) e no estado seco (Figura 43.B). Percebe-se que existe um plano de ruptura perpendicular ao carregamento e que o uso da parafina foi efetivo na retenção de água no interior do CP (Figura 43.A), havendo algumas zonas secas em menor quantidade, provavelmente relacionadas com a perda de água durante o processo de impermeabilização e colagem ou ainda à característica do CP III de reduzir a permeabilidade do concreto. Observa-se também que o CP que não foi condicionado (Figura 43.B) apresentou pontos com água residual, provenientes do processo de cura e de extração dos CPs. No entanto, como a presença de água foi diferente para os CPs condicionados e não condicionados, seus resultados foram mantidos separados e continuarão sendo designados como saturados e secos.

Figura 43 – Exemplos de ruptura: A) No estado saturado, B) No estado seco

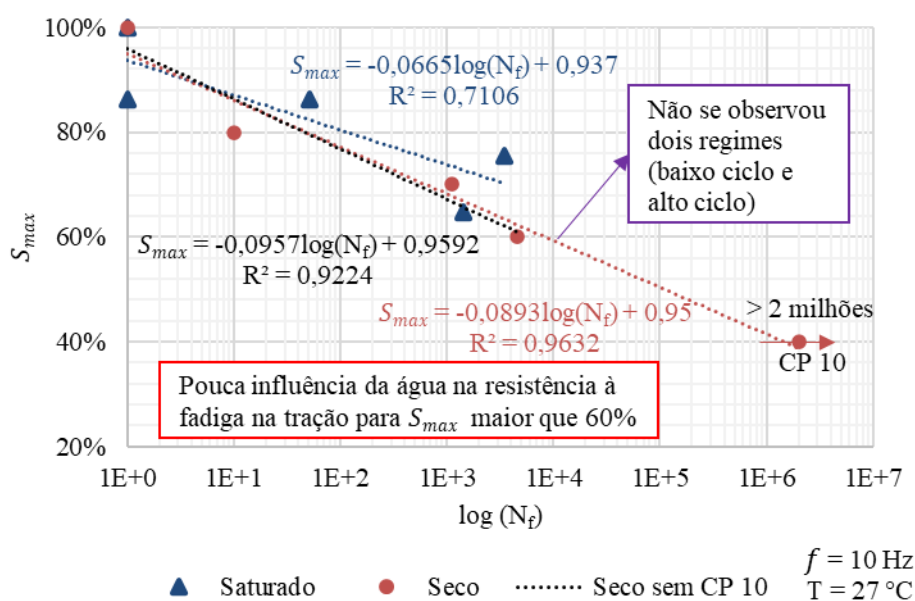


Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 44 apresenta as curvas de Wöhler formada pelos números de ciclos necessários para romper o CP. Destaca-se que houve problemas nos ensaios dos CPs 4 e 9, então ambos os resultados foram descartados na construção da curva de Wöhler e o CP 10 não rompeu com mais de dois milhões de ciclos, tendo seu resultado indicado com uma seta apontando para a direção em que poderia variar com mais tempo de ensaio. O ponto correspondente à resistência estática ($N_f=1$ e $S=100\%$) foi adicionado na figura para traçar as curvas de Wöhler. Apesar dos poucos pontos apresentados na curva de Wöhler (4 pontos para cada condição investigada além do ponto de resistência estática), é perceptível, pela proximidade entre as duas retas (azul e vermelha), que houve pouca influência da saturação dos corpos de prova na resistência à fadiga na tração para S_{max} acima de 60%, porém indicando que pode haver aumento da resistência para níveis de carregamento menores. Importante destacar que o CP III possui propriedade impermeabilizante, talvez o efeito seria maior com outros tipos de

cimento na composição do concreto. Sublinha-se que, na literatura, é comum a apresentação de resultados apenas de uma condição de amplitude de carregamento para a construção da curva de Wöhler (Eurocode 2), o que reforça o resultado obtido. Além disso, o CP com mais de dois milhões de ciclos poderia ser tão maior que as duas retas se igualassem e desconsiderá-lo afetou pouco o resultado obtido (preta). Aqui vale destacar que Hou *et al.* (2014) indicou que a presença de água reduz a resistência do gel de C-S-H, de maneira que a resistência estática macroscópica do concreto também diminui. Tal fato também foi evidenciado por Zhang *et al.* (2020) para corpos de prova de concreto na compressão, encontrando valores de resistência estática até 25% menores no estado saturado. Nesse sentido, a resistência estática à tração por compressão diametral foi apenas 7,3% menor na condição saturada, mas justifica os níveis de tensões diferentes para os pontos apresentados.

Figura 44 – Representação dos resultados obtidos em curva de Wöhler



Fonte: Elaborada pelo autor

Esse resultado é o oposto do obtido por outros autores para outros materiais cimentícios (SOERENSEN *et al.* 2011; ONESCHKOW *et al.*, 2020; ALI *et al.*, 2022; SUN *et al.*, 2022), no sentido de que a presença de água tinha efeito redutor da resistência à fadiga. Porém, a principal causa da diferença não está no material em si, mas no carregamento, uma vez que ensaiaram na compressão e o efeito de acúmulo de

tensões na água é observado, sendo intensificado quando submerso, pois permite a entrada de água através das microfissuras formadas em pontos que anteriormente tinham ar isolados do meio externo.

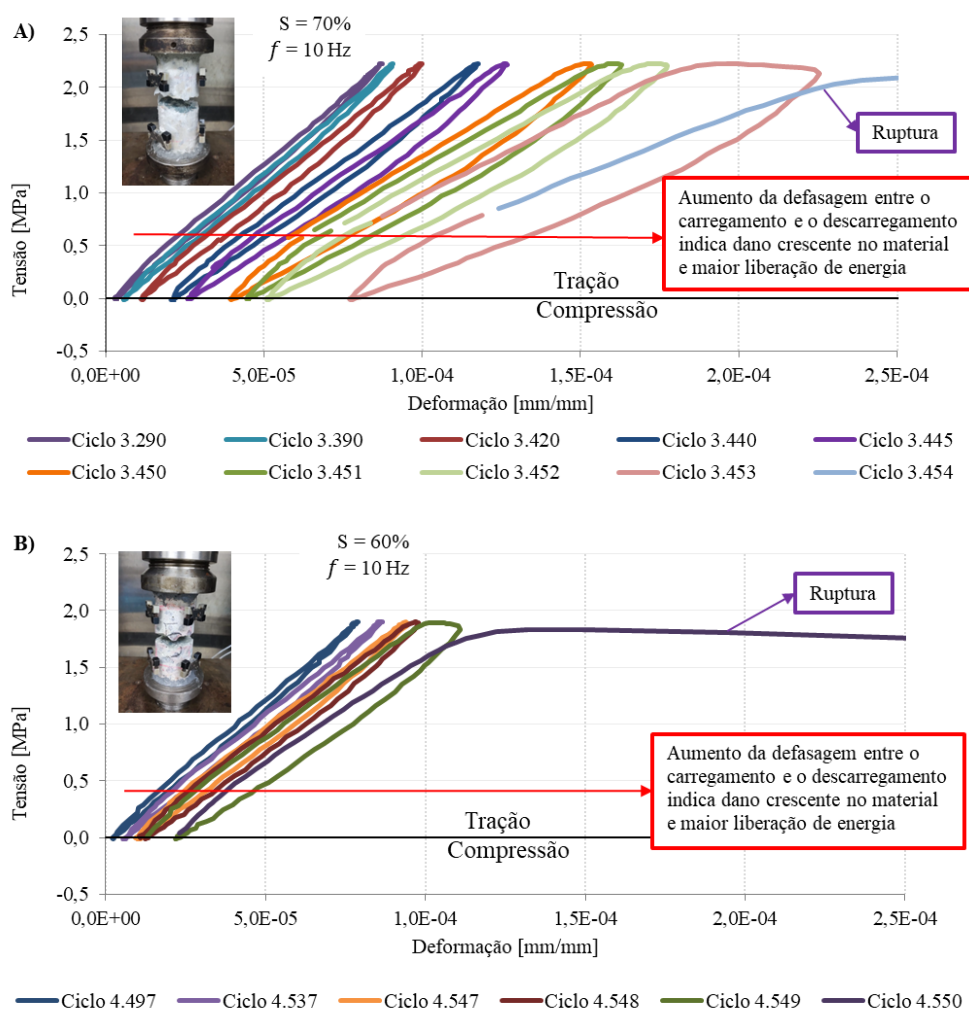
Cervo e Balbo (2004) realizaram ensaio de fadiga na flexão e obtiveram uma diferença máxima entre as vidas de fadiga no estado seco e no estado saturado menor do que a diferença observada por alguns dos autores que realizaram o ensaio na compressão, o que pode ser explicado pelo fato de que parte da seção do concreto durante o ensaio à flexão está tracionada, reduzindo assim o acúmulo de tensão na água nessa região e permitindo que, à medida que as microfissuras apareçam, a água migre para as regiões de menor tensão e alivie o acúmulo de tensões também na parte comprimida da seção. Porém, como Cervo e Balbo (2004) utilizaram panos encharcados para manter a umidade do concreto, o ensaio aproximou características do ensaio submerso, uma vez que mais água poderia entrar no concreto ao longo do ensaio, o que também justifica a diferença máxima maior do que a obtida por Sun *et al.* (2022) entre os estados seco e saturado.

Pela Figura 44, nota-se, ainda, que não há dois regimes (baixo e alto ciclos) frequentemente sugeridas para a curva de Wöhler de concreto (Figura 26). Isso pode ser justificado por não ter sido ensaiado nenhum CP com S_{max} mais próximo de 100%, o que seria difícil de executar uma vez que o CP 1 rompeu antes de finalizar o primeiro ciclo com S_{max} de 86%, e não foram admitidos mais de dois milhões de ciclos. Entende-se que com S_{max} de 40% já estava próximo do limite de fadiga, visto que se considera em concretos o regime elástico até 30% da resistência mecânica (ABNT NBR 8522). Vale ressaltar que outros autores também observaram retas com diferentes S_{max} (SAITO; IMAI, 1983; CERVO; BALBO, 2004; HÜMME *et al.*, 2016; SAINI; SINGH, 2020; ONESCHKOW *et al.*, 2020; MYRTJA *et al.*, 2021; MARKERT *et al.*, 2022; SUN *et al.*, 2022), ou seja, não evidenciaram os dois regimes de fadiga.

A Figura 45 apresenta exemplos de aumento da histerese ao longo dos ciclos para a condição saturada (Figura 45.A) e para a condição seca (Figura 45.B). O aumento da defasagem entre os ciclos indica que parte da energia fornecida está sendo liberada para a propagação de cada vez mais fissuras e aquecimento do material. Entende-se que o aumento de fissuras pode estar relacionado ao aumento do ângulo de fase, havendo assim aumento de temperatura possivelmente por fricção, conforme apontado por alguns autores (Otto *et al.*, 2018; Myrtja *et al.*, 2021; Sainz-Aja *et al.*, 2021), ou por

efeitos viscoelásticos (presença do ângulo de fase). De forma simplificada, a Seção 5.2 considera que toda a energia oriunda das mudanças viscoelásticas do material é utilizada para aquecê-lo e evidencia que, no caso da tração, devido à baixa magnitude das tensões aplicadas, a dissipação de energia é pequena e não seria possível identificar uma variação de temperatura expressiva. Isso será tratado em mais detalhe adiante, mas fica claro que uma explicação mais fundamental quanto à dissipação plástica ou viscosa de energia ainda não é disponível na literatura, e que será discutido que tanto uma avaliação da energia dissipada por plasticidade quanto por viscosidade permite analisar efeitos de autoaquecimento.

Figura 45 – Exemplo de aumento da histerese ao longo dos ciclos: A) CP saturado, B) CP seco

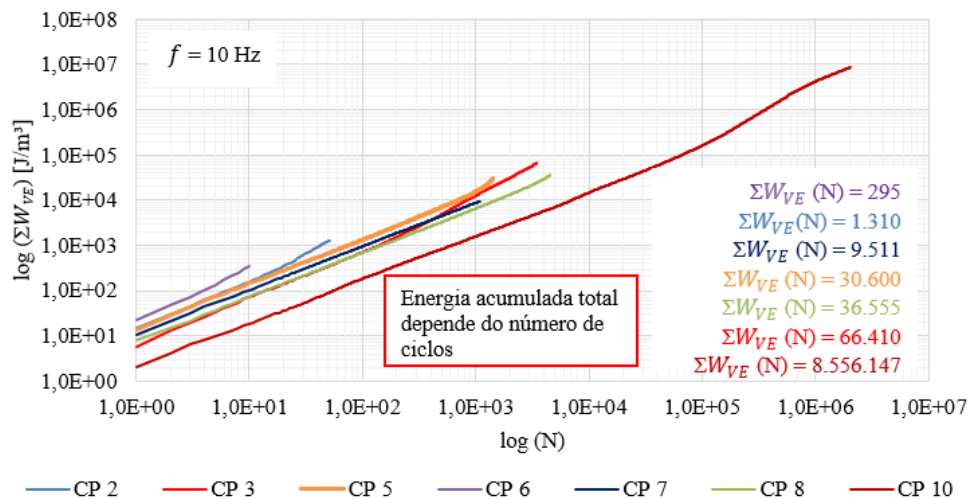


Fonte: Elaborada pelo autor

5.2 Modelagem computacional

Utilizando a Equação (7) para calcular a energia viscoelástica dissipada a cada ciclo W_{VE} e fazendo o somatório, obtém-se a energia dissipada acumulada $\sum W_{VE}$ representada na Figura 46, onde o valor lateral representa a valor acumulado ao final de todos os ciclos e as cores estão relacionadas às curvas de cada CP. Percebe-se que a energia acumulada total do CP 10 foi maior que a energia acumulada dos demais CPs, fato justificado por ter sido o CP de menor carregamento e maior número de ciclos.

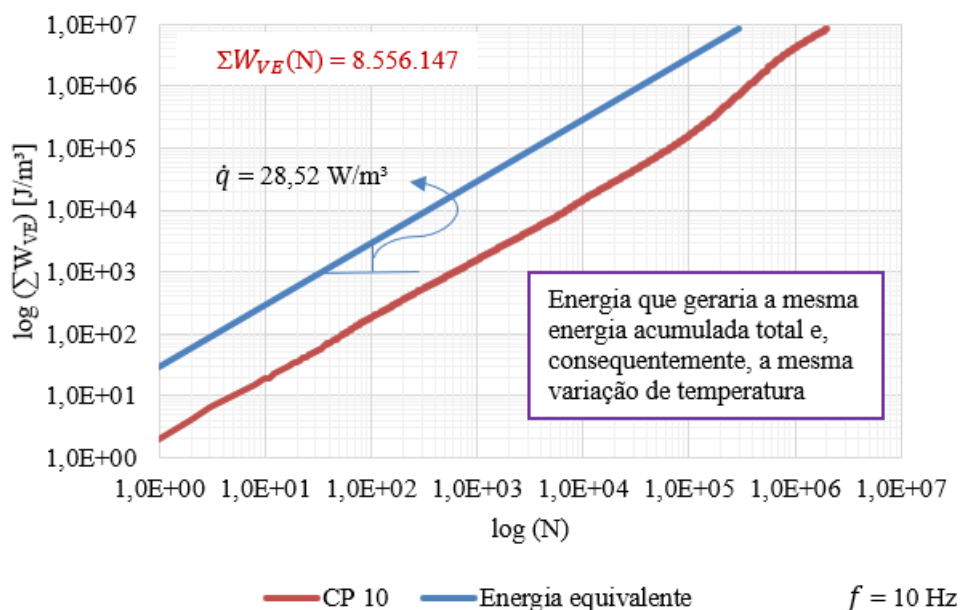
Figura 46 – Energia acumulada ao longo dos ciclos



Fonte: Elaborada pelo autor

Todas as simulações foram feitas com uma liberação de calor volumétrica \dot{q} constante em 30.000s, ou seja, foi considerada uma liberação de calor que correspondesse à energia dissipada acumulada $\sum W_{VE}$ e, consequentemente, que geraria a mesma variação de temperatura no CP no período analisado. Em outras palavras, a inclinação da reta da curva de energia dissipada acumulada $\sum W_{VE}$ vs. o número de ciclos N corresponderia à liberação de calor volumétrica. Esse conceito pode ser visualizado na Figura 47, onde energia dissipada acumulada do CP 10 – que possuía maior energia dissipada acumulada – seria simulada com $\dot{q} = 28,52 \text{ W/m}^3$.

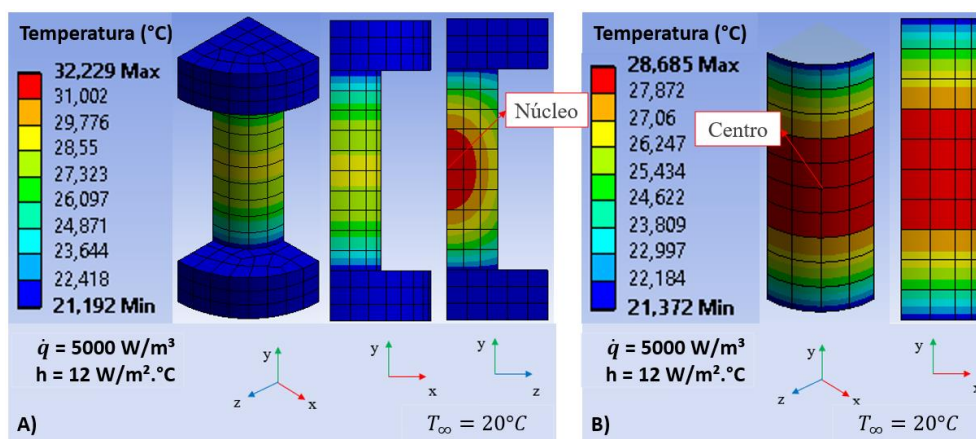
Figura 47 – Exemplo de energia equivalente



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 48 apresenta um exemplo de resultado das simulações realizadas. Pela Figura 48.A, percebe-se que a temperatura máxima é alcançada no núcleo da geometria e pela Figura 48.B que a temperatura máxima da superfície é alcançada no centro do CP, fato já apontado em literatura (ELSMEIER *et al.*, 2016; DEUTSCHER *et al.*, 2019; VOGEL *et al.*, 2020). Vale destacar que a distribuição de temperatura se deu de forma similar para todos os níveis de energia aplicados.

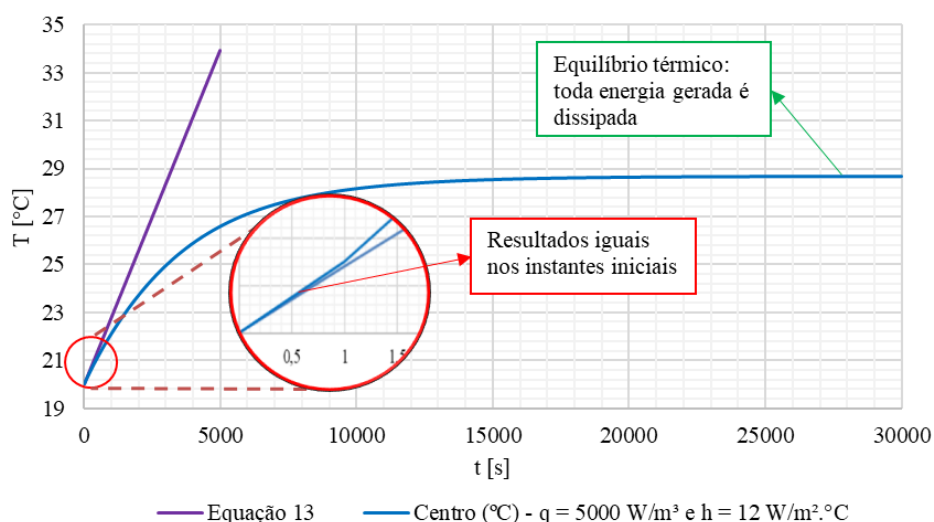
Figura 48 – Exemplo de variação de temperatura: A) Em toda a geometria, B) Apenas na superfície do CP



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 49 apresenta a variação da temperatura do centro do CP ao longo da simulação. Nota-se que, ao fim da simulação, não há mais variação de temperatura, pois toda a energia gerada é trocada com o meio pela superfície (atinge-se equilíbrio térmico) e que, no começo da simulação, os resultados são exatamente iguais aos obtidos pela Equação (13) (condição adiabática), pois a energia gerada não ocasiona o aumento de temperatura de forma imediata. Hümme *et al.* (2016), Haar *et al.* (2016), Deutscher *et al.* (2019), Markert *et al.* (2022), Vogel *et al.* (2020) e Sainz-Aja *et al.* (2021) observaram uma variação da temperatura ao longo dos ensaios com forma similar à observada na Figura 49, para medições também no centro do CP.

Figura 49 – Exemplo de variação da temperatura do centro ao longo do tempo

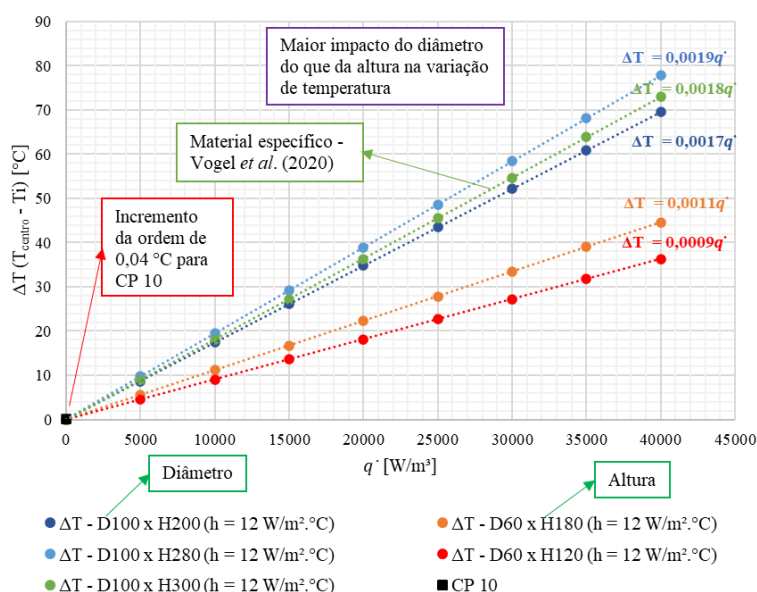


Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 50 mostra a variação da temperatura no centro do CP após o equilíbrio térmico em relação à temperatura inicial para diferentes geometrias e energias equivalentes. Nota-se que o diâmetro possui um impacto maior no aumento de temperatura do que a altura, fato esperado, uma vez que um aumento no diâmetro aumenta o volume de todo o CP de forma mais rápida do que o aumento na altura e a energia liberada \dot{q} é dada em função do volume. O mesmo comportamento foi observado para os coeficientes de troca de calor convectiva. A curva verde corresponde

à geometria de diâmetro de 100 mm e altura de 300 mm, porém não apresenta variações de temperatura maiores do que a curva correspondente à geometria de altura de 280 mm porque, na definição da análise, as propriedades do material do corpo de prova foram as propriedades específicas apresentadas pelos autores, causando diferença na tendência de aumentar a variação com o aumento do diâmetro. Avaliando a energia equivalente obtida anteriormente para o CP 10, o aumento de temperatura seria da ordem de 0,04 °C, ou seja, o autoaquecimento na tração é difícil de ser identificado na prática utilizando termopares. Esse fato pode ser justificado pelos baixos níveis de carregamento (portanto dissipa-se relativamente pouca energia) quando comparado aos ensaios de fadiga a compressão, cujo aumento pode chegar a mais de 80°C (SAINZ-AJA *et al.*, 2021). Aqui vale destacar que o efeito da parafina não foi abordado nesse trabalho, porém se ela funcionar como isolante térmico do corpo de prova, é possível que a temperatura do concreto aumente consideravelmente ao longo do ensaio de fadiga. Em contrapartida, a presença de água pode alterar a condutividade térmica do material, uma vez que a água possui elevado calor específico, tornando a análise conjunta necessária. Em contrapartida, concretos com módulos mais altos poderiam alcançar níveis ainda mais altos de energia.

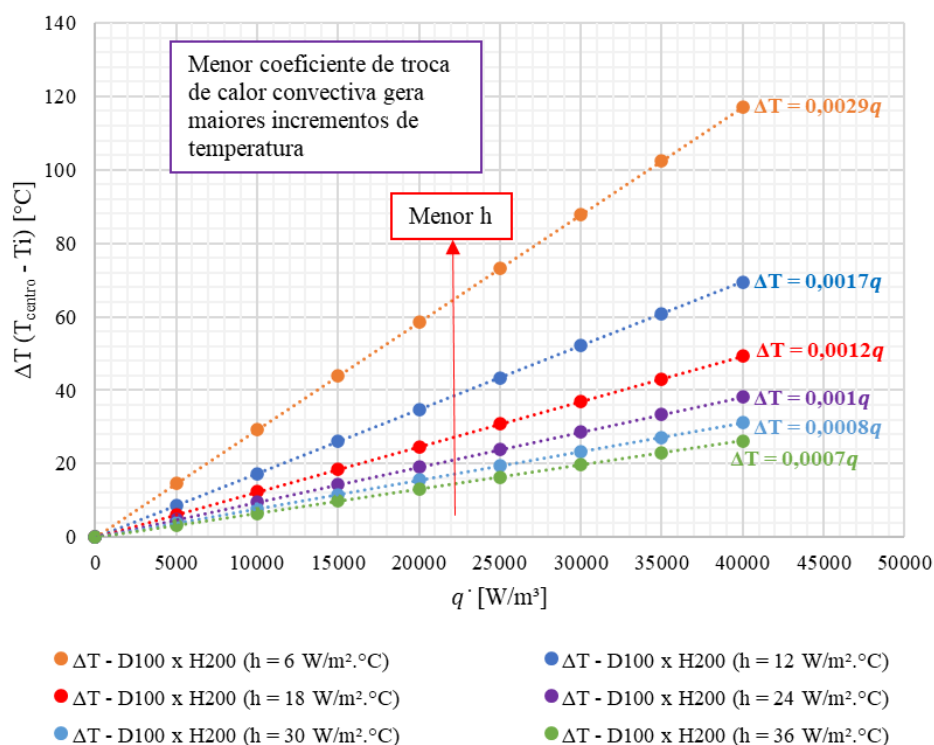
Figura 50 – Efeito da geometria na variação da temperatura no centro do CP



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 51 apresenta a variação da temperatura no centro do CP após o equilíbrio térmico em relação à temperatura inicial para diferentes coeficientes de troca de calor convectiva. Nota-se que, para todos os níveis de energia, quando o h é maior, as temperaturas obtidas são menores e há uma tendência linear entre os resultados de variação de temperatura e energia dissipada, o que está de acordo com a Equação (14).

Figura 51 – Efeito do coeficiente de troca de calor convectiva na variação da temperatura no centro do CP

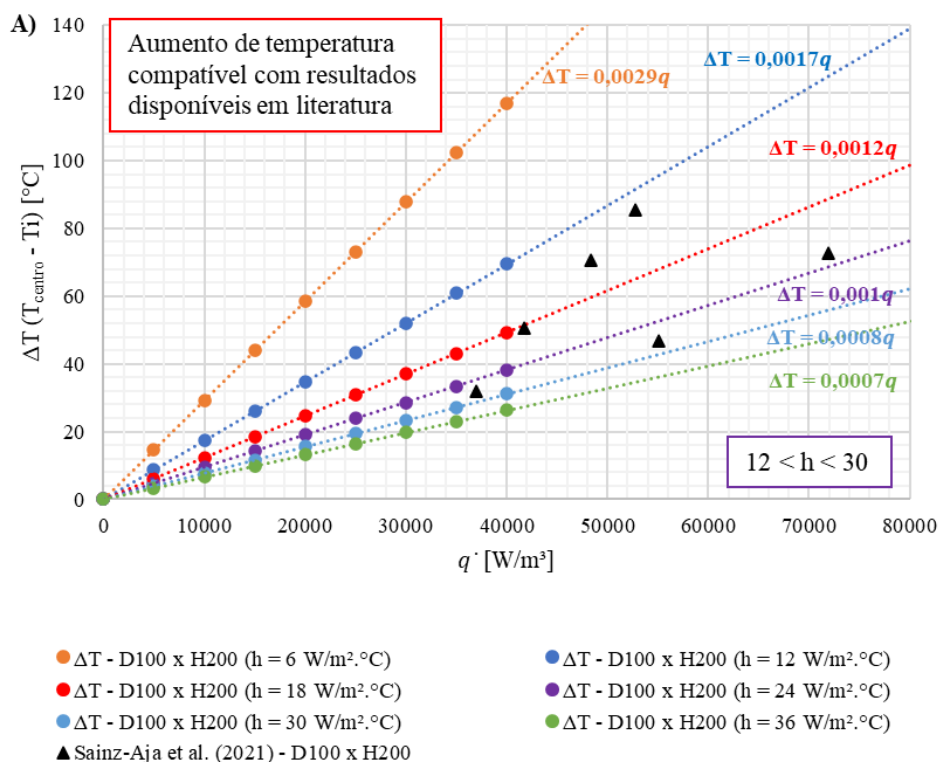


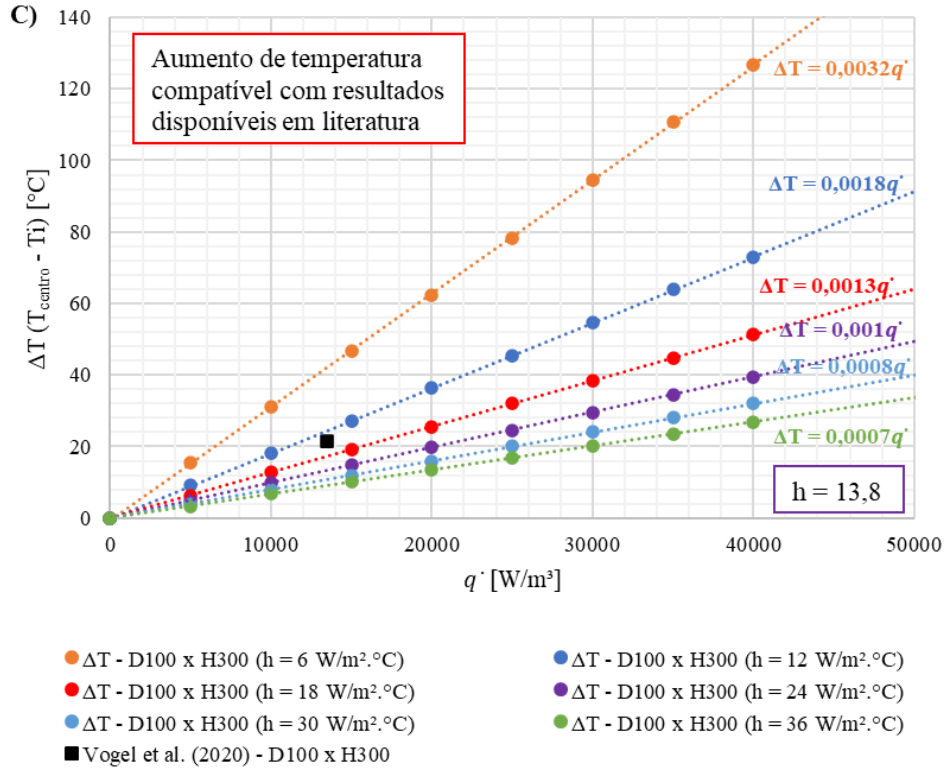
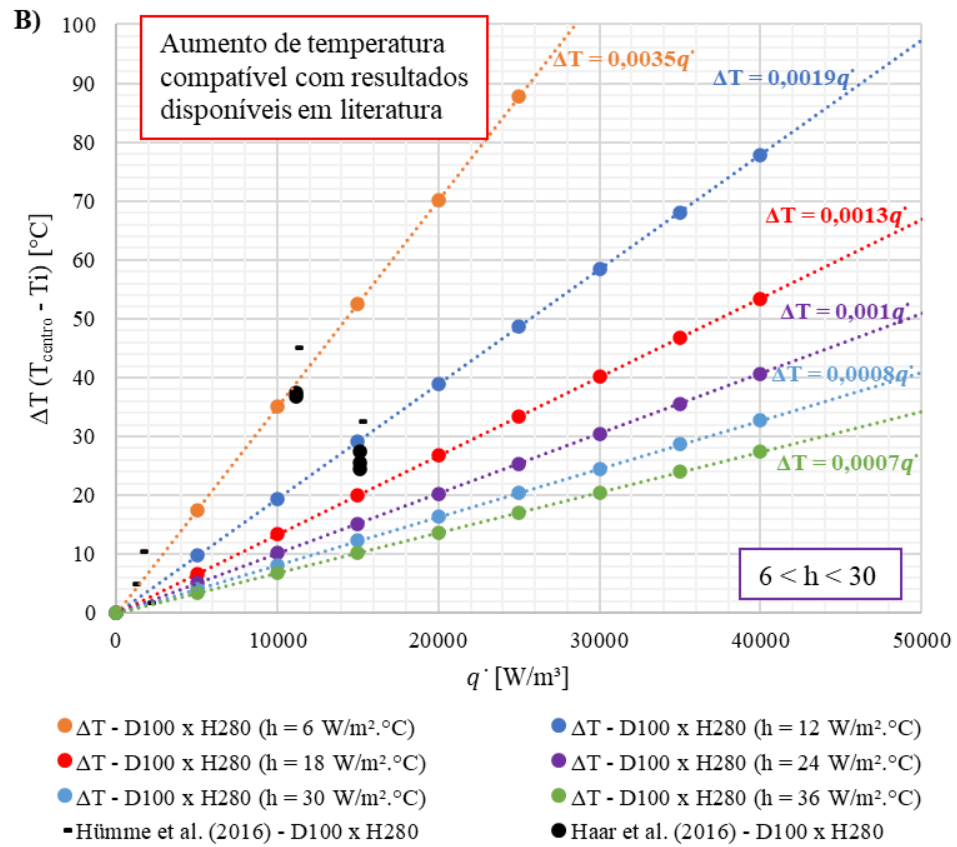
Fonte: Elaborada pelo autor

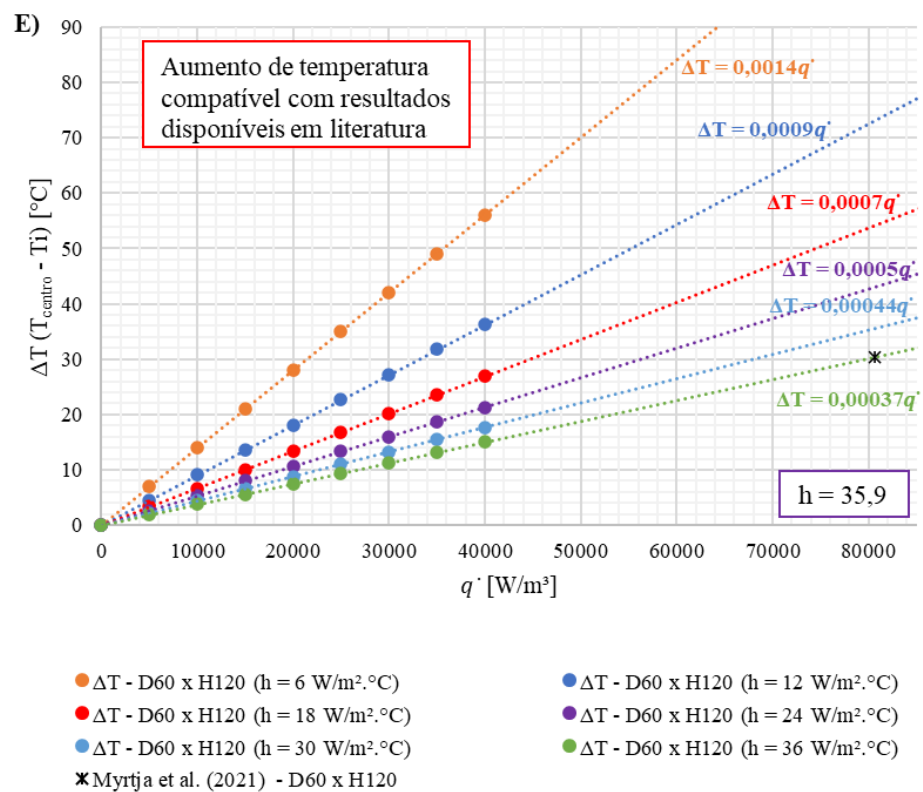
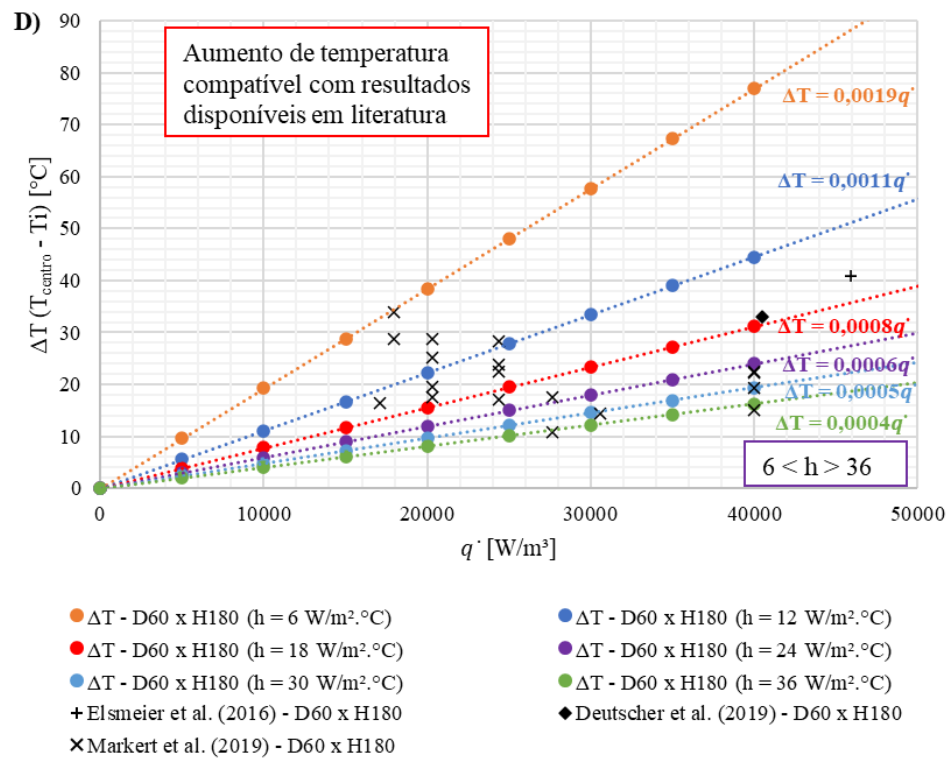
A Figura 52 apresenta resultados encontrados por alguns autores para diferentes corpos de prova e materiais confrontando com dados das simulações para as diferentes geometrias avaliadas: diâmetro D de 100 mm e altura H de 200 mm (Figura 52.A), D de 100 mm e H de 280 mm (Figura 52.B), D de 100 mm e H de 300 mm (Figura 52.C), D de 60 mm e H de 180 mm (Figura 52.D) e D de 60 mm e H de 120 mm (Figura 52.E). Aqui vale ressaltar que, apenas para Elsmeier *et al.* (2016), Deutscher *et al.* (2019) e Vogel *et al.* (2020), havia dados de temperatura para o núcleo e o centro do CP, possibilitando achar um conjunto de parâmetros de entrada (h , ϕ e E) que

representem os dados experimentais obtidos. Para os demais casos, foi preciso assumir um ângulo de fase equivalente de $0,5^\circ$ na Equação (10) e para Haar *et al.* (2016) e Hümme *et al.* (2016) foi preciso adotar a relação de módulos recomendada pela NBR 6118 (ABNT, 2014) para estimar a energia equivalente. A variação de coeficientes de troca de calor convectiva para um mesmo autor se justifica pelas considerações feitas, uma vez que a ausência de informações sobre a variação do ângulo de fase e do módulo ao longo dos ensaios impossibilita o cálculo da energia equivalente de forma exata. Apesar disso, os coeficientes de troca de calor convectiva encontrados estão na mesma magnitude dos obtidos por Lee *et al.* (2009) para diferentes condições ambientais. Além disso, o aumento de temperatura ao considerar o comportamento viscoelástico do concreto forneceu resultados compatíveis com os resultados da literatura.

Figura 52 – Resultados da literatura comparado aos resultados das simulações por geometria: A) D100 x H200, B) D100 x H 280, C) D100 x H 300, D) D60 x H 180, E) D60 x H120







Fonte: Elaborada pelo autor

Assim, os resultados apresentados nesta seção evidenciam variações de temperatura que devem ser esperadas em ensaios de fadiga a compressão em concretos,

mesmo que não se faça a observação experimental direta. Como a literatura aponta o possível efeito da temperatura na resistência à fadiga testada em laboratório, justifica-se o controle da temperatura ao longo dos ensaios de fadiga. Conclui-se que, apesar de o comportamento do concreto ser muitas vezes bem representado pelo modelo elástico, para a análise de fadiga o comportamento viscoelástico parece ser necessário para explicar melhor os fenômenos no material, como o autoaquecimento.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho avançou em duas frentes, sendo uma experimental avaliando a degradação de módulo e a resistência à fadiga a tração de concretos e outra investigando o potencial de autoaquecimento de concretos ao longo de ensaios de fadiga com simulação numérica. Foram ensaiados corpos de prova de concreto convencional com geometria cilíndrica de relação altura/diâmetro de 2 para atingir os objetivos específicos 1 e 2, que buscavam avaliar a influência da variação da umidade e a degradação do concreto em ensaios de fadiga por tração axial. Foi utilizado o *software* Ansys e dados da literatura para o objetivo específico 3, focado no potencial de autoaquecimento do concreto em ensaios de fadiga. Os resultados encontrados levaram às seguintes conclusões:

- Confirmou-se que o módulo do concreto saturado é superior (10%) ao módulo do concreto seco, conforme apresentado anteriormente na literatura;
- O módulo em tração axial é até 20% inferior ao módulo em compressão axial;
- Há um efeito da frequência de carregamento no módulo de elasticidade, produzindo incremento de módulo da ordem 1% a 3%, quando a frequência aumenta de 1 Hz a 25 Hz;
- Existe um ângulo de defasagem entre os sinais de tensão e deformação da ordem de $0,5^\circ$ (já considerando a correção da máquina) para concretos;
- O concreto apresenta maior efeito viscoelástico na tração do que na compressão (ângulos de fase maiores);
- A resistência à tração por compressão diametral é ligeiramente (7,3%) menor na condição saturada;
- É possível identificar ponto de aceleração da degradação do módulo ao longo de ensaios de fadiga de concreto;
- Pouca influência da saturação no resultado de resistência à fadiga (curvas

de Wöhler semelhantes) para níveis de carregamento acima de 60%.

Simulações térmicas transientes foram feitas para cinco geometrias diferentes em *software* de elementos finitos para atingir o objetivo específico 3, que buscava investigar o autoaquecimento do concreto durante ensaios de fadiga. Os resultados encontrados levaram às seguintes conclusões:

- A energia acumulada ao longo dos ciclos depende do número de ciclos;
- Após alcançar o equilíbrio térmico, a temperatura máxima do corpo de prova e da superfície ocorre no núcleo e no centro, respectivamente;
- O aumento de temperatura em ensaios de fadiga de concreto a tração é inexpressivo e não pode ser medido com termopares;
- Conforme a literatura, o aumento da temperatura em ensaios de fadiga de concreto a compressão pode chegar a 80 °C e pode ter efeito na fadiga, devendo-se acompanhá-la ao longo dos ensaios;
- A variação do diâmetro do corpo de prova tem maior impacto na variação de temperatura que a variação de altura;
- Para a análise de fadiga, o comportamento viscoelástico parece ser necessário para explicar melhor os fenômenos no material, como o autoaquecimento. Uma explicação alternativa baseada em modelos de plasticidade também teria sido possível, mas com resultados numéricos equivalentes. A escolha do modelo ainda depende de mais pesquisa quanto à microestrutura do material ao longo do carregamento.

Propõe-se para pesquisas futuras:

- Avaliar o efeito do carregamento (não linearidade) e da temperatura (termo-sensibilidade) na determinação do valor absoluto de módulo complexo e do ângulo de fase do concreto;
- Ajustar modelo reológico que caracterize o comportamento em carregamentos alternados para diferentes materiais cimentícios;
- Avaliar a temperatura ao longo do ensaio de fadiga de concreto em

diferentes carregamentos;

- Avaliar o efeito da parafina no aumento de temperatura observado durante ensaios de fadiga de concreto;
- Avaliar o efeito de outros tipos de materiais na determinação da influência da umidade e da temperatura na fadiga;
- Analisar o efeito da temperatura e da umidade do ponto de vista da interface dos materiais constituintes do concreto;
- Investigar a microestrutura do material ao longo do carregamento a fim de determinar se modelos plásticos não seriam mais adequados fundamentalmente que os modelos viscoelásticos aplicados.

REFERÊNCIAS

- ALI, M. A.; TOMANN, C.; ALDAKHEEL, F.; MAHLBACHER, M.; NOIL, N.; ONESCHKOW, N.; DRAKE, K.-H.; LOHAUS, L.; WRIGGERS, P.; HAIST, M. Influence of Moisture Content and Wet Environment on the Fatigue Behaviour of High-Strength Concrete. **Materials** 2022, 15, 1025.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 215R-74: Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading**. Michigan, 1997.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI PRC-215-92. ACI PRC-215-92: Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading** (Reapproved 1997) 1997.
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO T 342/11: Standard Method of Test for Determining Dynamic Modulus of Hot-Mix Asphalt Concrete Mixtures**. Washington, DC, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1996
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2001
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53: Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7680-1: Concreto – Extração, preparo, ensaio e análise de testemunhos de estruturas de concreto – Parte 1: Resistência à compressão axial**. Rio de Janeiro, 2015
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8224: Concreto endurecido – Determinação da fluência – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão.** Rio de Janeiro, 2021

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10838: Solo – Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática.** Rio de Janeiro, 1988

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021

BALBO, J.T. **Fatos, mitos e falácias sobre os modelos experimentais de fadiga.** In: Anais da 32ª Reunião Anual de Pavimentação. Brasília: ABPv, 2000, v. 1, pp. 391-404.

BALBO, J. T. **Relations between indirect tensile and flexural strengths for dry and plastic concretes.** Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, 6(6), 854–874, 2013

BARONI, H. J. M. **Simulação da vida útil de fadiga do concreto em vigas de tabuleiro de pontes em função do fluxo de veículos pesados.** 2010. 284 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

BAŽANT, Z. P.; JIRÁSEK, M. **Creep and Hygrothermal Effects in Concrete Structures.** Springer, 1ed, 2019

BØRSHEIM, H. **Concrete fatigue of onshore wind turbine foundations.** Tese de mestrado, 2020.

CAIXETA, E. C. **Investigação experimental da fadiga em lajes de pontes com ou sem pré-lajes.** 2010. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

CERVO, T. C.; BALBO, J. T. **Estudo da Resistência à Fadiga de Concretos de Cimento Portland para Pavimentação.** 2004. 242 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2004.

CERVO, T. C.; BALBO, J. T. **Calibração de fator laboratório-campo para previsão de fadiga do concreto em pavimentos.** USP, 2005.

COSTA, R. A. da. **Influência de microdefeitos no limite de fadiga do aço 1045 submetido a carregamento axial-torçional: experimentos e modelagem.** 2021. xiii, 42 f., il. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas)—Universidade de Brasília, Brasília, 2021

DEUTSCHER, M.; TRAN, N.L.; SCHEERER, S. **Experimental investigations on the temperature increase of ultra-high performance concrete under fatigue loading,** Appl. Sci. 9 (2019) 4087

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES.
DNIT 416/2019 – ME Pavimentação asfáltica – Misturas asfálticas – Determinação do módulo dinâmico – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019

DNV-OS-C502. **DNV-OS-C502: Offshore Concrete Structures** 2010:102.

DNV-OS-H101. **DNV-OS-H101: Marine Operations**, General 2011:55.

DNV-OS-J101. **Design of Offshore Wind Turbine Structures** 2004:138.

EN 1992-1-1. **Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings.** 2004

ELSMEIER, K.; HÜMME, J.; ONESCHKOW, N.; LOHAUS, L. **Prüftechnische Einflüsse auf das Ermüdungsverhalten hochfester feinkörniger Vergussbetone.** Beton- und Stahlbetonbau, Jahrgang 111, Heft 4, Ernst & Sohn, pp. 233–240, 2016

ESS. **Fundamentos de CAE (Computer Aided Engineering).**

<https://www.esss.co/ieess/cursos-online/fundamentos-cae/> Acesso em: 18 nov. 2022

GRAF, O.; E. BRENNER. **Experiments for investigating the resistance of concrete under often repeated compression loads.** Bulletin 1 (1934): 17-25.

HAAR, C.; WEDEL, F.; MARX, S. Numerical and Experimental Investigations of the Warming of Fatigue-Loaded Concrete. **Conference: fib Symposuym 2016**, Cape Town, South Africa. 2016

HAAR, C. **Ein mechanisch basiertes Dehnungsmodell für ermüdungsbeanspruchten Beton.** Dissertation, Berichte des Instituts für Massivbau der Leibniz Universität Hannover, Heft 11, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2017.

HOU, D., MA, H., ZHU, Y., & LI, Z. Calcium silicate hydrate from dry to saturated state: Structure, dynamics and mechanical properties. **Acta Materialia**, 67, 81–94. 2014

HÜMME, J.; VON DER HAAR, C.; LOHAUS, L.; MARX, S. Fatigue behaviour of a normal-strength concrete - number of cycles to failure and strain development. **Structural Concrete**, 17(4), 637–645. 2016

KACHKOUCHI, F. Z.; NOBERTO, C. C.; BABADOPULOS, L. F. A. L.; MELO, A. R. S.; MACHADO, A. M. L.; SEBAIBI, N.; BOUKHELF, F.; EL MENDILI, Y. Fatigue behavior of concrete: a literature review on the main relevant parameters. **Construction and Building Materials**, 338, 127510, 2022.

KHAN, R.; KHAN, Z.; AL-SULAIMAN, F.; MERAH, N. Fatigue Life Estimates in Woven Carbon Fabric/Epoxy Composites at Non-Ambient Temperatures. **Journal of Composite Materials**, 36(22), 2517–2535, 2002.

KATUNIN, A. Criticality of the Self-Heating Effect in Polymers and Polymer Matrix Composites during Fatigue, and Their Application in Non-Destructive Testing. **Polymers**, 11(1), 19, 2018.

- LEE, Y., CHOI, M.-S., YI, S.-T., & KIM, J.-K. Experimental study on the convective heat transfer coefficient of early-age concrete. **Cement and Concrete Composites**, 31(1), 60–71. 2009
- LEMAITRE, J. **A Course on Damage Mechanics**. 2. ed. Springer, New York 1996.
- LIENHARD, J. H. IV; LIENHARD, J. H. V. **A Heat Transfer Textbook**. 5. ed. Phlogiston Press, Cambridge Massachusetts, 2020.
- MANGIAFICO, S.; SAUZÉAT, C.; DI BENEDETTO, H.; POUGET, S.; OLARD, F.; PLANQUE, L. (2015). Quantification of biasing effects during fatigue tests on asphalt mixes: non-linearity, self-heating and thixotropy. **Road Materials and Pavement Design**, 16(sup2), 73–99, 2015.
- MARKERT, M.; KATZMANN, J.; BIRTEL, V.; GARRECHT, H.; STEEB, H. Investigation of the Influence of Moisture Content on Fatigue Behaviour of HPC by Using DMA and XRCT. **Materials** 2022, 15, 91.
- M. Code, **Model Code 2010**, Structural Concrete 2013 (14) (2010) 230–241,
- MOR, A.; HESTER, W.T.; GERWICK, B.C. **Fatigue of High-Strength Reinforced Concrete**, MJ 89 (197–207) (1992),
- MYRTJA, E.; SOUDIER, J.; PRAT, E., CHAOUICHE, M. Fatigue deterioration mechanisms of high-strength grout in compression. **Construction and Building Materials**, 270, 121387, 2021.
- MUNIER, R.; DOUDARD, C.; CALLOCH, S.; WEBER, B. Determination of high cycle fatigue properties of a wide range of steel sheet grades from self-heating measurements. **International Journal of Fatigue**, 63, 46–61, 2014.
- NAIK, T.; SINGH, S.; Ye, C. **Fatigue Behavior Of Plain Concrete Made With Or Without Fly Ash**. 1993
- NGUYEN, Q. T.; BENEDETTO, H. DI; SAUZÉAT C. Determination of thermal properties of asphalt mixtures as another output from cyclic tension-compression test. **Road Materials and Pavement Design**. Vol 13. No.1, 85-103. 2012
- NS-EN 1992-1-1. **NS-EN 1992-1-1:2004+NA:2008** 2004.
- OH, B. H. **Fatigue analyses of plain concrete in flexure**. J Struct Eng – ASCE 1986;112(2):273–88.
- OHLSSON, U.; DAERGA, P. A.; ELFGREN, L. **Fracture energy and fatigue strength of unreinforced concrete beams at normal and low temperatures**. Engineering Fracture Mechanics, Elsevier, 35(1–3), 195–203, 1990.
- ONESCHKOW, N.; HÜMME, J.; LOHAUS, L. Compressive fatigue behaviour of high strength concrete in a dry and wet environment. **Construction and Building Materials**, 262, 119700, 2020.
- OTTO, C.; ELSMEIER, K., LOHAUS, L. **Temperature Effects on the Fatigue Resistance of High-Strength-Concrete and High-Strength-Grout**, in: D.A. Hordijk,

M. Luković (Eds.), High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet. Springer International Publishing, Cham, 2018, pp. 1401–1409,

PASTOUKHOV, V. A.; VOORWALD, H. J. C. **Introdução à mecânica da integridade estrutural.** São Paulo: UNESP, 1995.

RAITHBY, K. D.; GALLOWAY, J. W. **Effects of Moisture Condition Age, and Rate of Loading on Fatigue of Plain Concrete.** Special Publication in *Publication in International Concrete Abstracts Portal*, 41, 15–35, 1974.

RASCHIA, S., DI BENEDETTO, H., LAMOTHE, S., CARTER, A., GRAZIANI, A., & PERRATON, D. Thermo-rheological modelling of cement-bitumen treated materials in the small strain domain. **Transportation Geotechnics**, 31, 100647. 2021

SAINI, B. S.; SINGH, S. P. Flexural fatigue strength prediction of self compacting concrete made with recycled concrete aggregates and blended cements. **Construction and Building Materials**, 264, 120233, 2020

SAINZ-AJA, J. A.; CARRASCAL, I. A.; POLANCO, C. T. Effect of temperature on fatigue behaviour of self-compacting recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**. 125, 104309, 2022

SAITO, M.; IMAI, S. **Direct Tensile Fatigue of Concrete by use of friction grips.** ACI Journal, 1983.

SCHÖN, C. G. **Mecânica dos Materiais: Apostila redigida para uso nos cursos “PMT2405- Mecânica dos Materiais” e “PMT5860- Teoria da plasticidade e da fratura dos materiais”** /– 4 ed. Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, São Paulo (2009). 391 p.

SCHAPERLY, R.A. A Theory of Mechanical Behavior of Elastic Media with Growing Damage and Other Changes in Structure, **Journal of Mechanics and Physics of Solids**, Vol. 38, pp.215-253, 1990.

SCHAPERLY, R.A. Correspondence Principles and a Generalized J Integral for Large Deformation and Fracture Analysis of Viscoelastic Media, **International Journal of Fracture**, Vol. 25, pp. 195-223., 1984.

SINGH, S. P.; KAUSHIK, S. K. **Flexural fatigue analysis of steel fibre reinforced concrete.** **ACI Mater J** 2001;98(4):306–12.

SINGH, S. P.; MOHAMMADI, Y.; GOEL, S.; KAUSHIK, S. K. **Prediction of mean and design fatigue lives of steel fibrous concrete beams in flexure.** *AdvStruct Eng*, 2007; 10(1):25–36.

SOERENSEN, EV; WESTHOF, L; YDE, E; SEREDNICKI, A. **Fatigue life of high performance grout for wind turbine grouted connection in wet or dry environment**, 2011:2.

SPARKS, P. R.; MENZIES, J. B. **The effect of rate of loading upon the static and fatigue strengths of plain concrete in compression.** Magazine of Concrete Research: 25 (83), pp. 73-80, 1973.

SUN, X; TIAN, Y.; YIN, W.; WANG, H. Effect of free water on fatigue performance of concrete subjected to compressive cyclic load. **Construction and Building Materials**, Volume 318, 2022, 125995,

VIDAL, A. C. M. **Modelagem e monitoramento do comportamento térmico de fundações volumosas.** Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

VOGEL, A., VÖLKER, C., BODE, M., & MARX, S. Messung und Simulation der Erwärmung von ermüdungsbeanspruchten Betonprobekörpern. **Bauphysik**, 42(2), 86–93. 2020

WANG, X.; FANG, S. “**Comparison of Fatigue Design Code Requirements for Wind Turbine Foundations.**” *Special Publication in International Concrete Abstracts Portal*, 348, 145–158. 2021

ZHANG, B.; PHILLIPS D.V.; WU, K. **Effects of loading frequency and stress reversal on fatigue life of plain concrete.** Magazine of Concrete Research, 48(177),361–375, 1996.

ZHANG, G., LI, C., WEI, H., WANG, M., YANG, Z., & GU, Y. Influence of Humidity on the Elastic Modulus and Axis Compressive Strength of Concrete in a Water Environment. **Materials**, 13(24), 5696. 2020