



Nábila Rezende de Almeida Cerqueira

**Comportamento à Fadiga na Flexão do Concreto de Ultra-
alto Desempenho**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Coorientador: Prof. Flávio de Andrade Silva

Rio de Janeiro,

Março de 2022



Nábila Rezende de Almeida Cerqueira

**Comportamento à Fadiga na Flexão do Concreto de Ultra-
alto Desempenho**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da PUC-Rio.

Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Daniel Carlos Taissum Cardoso

Orientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - PUC-Rio

Prof. Flávio de Andrade Silva

Coorientador

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - PUC-Rio

DSc. Cássio Marques Rodrigues Gaspar

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - PUC-Rio

Prof. Pablo Augusto Krahl

Departamento de Engenharia Civil - Universidade Presbiteriana
Mackenzie (Campinas)

Rio de Janeiro, 25 de março de 2022

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial deste trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Nábila Rezende de Almeida Cerqueira

Graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG – em 2017. Principais áreas de interesse: Concreto reforçado com fibras, concreto de ultra-alto desempenho, materiais compósitos, fadiga.

Ficha Catalográfica

Cerqueira, Nábila Rezende de Almeida

Comportamento à fadiga na flexão do concreto de ultra-alto desempenho / Nábila Rezende de Almeida Cerqueira ; orientador: Daniel Carlos Taissum Cardoso ; coorientador: Flávio de Andrade Silva. – 2022.

112 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 2022.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Civil e Ambiental - Teses. 2. Concreto de ultra-alto desempenho. 3. Fadiga. 4. Carregamento cíclico. 5. Flexão. I. Cardoso, Daniel Carlos Taissum. II. Silva, Flávio de Andrade. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. IV. Título.

CDD: 624

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde e iluminar os meus caminhos no decorrer desse período, me dando forças para que eu passasse por todos os processos de adaptação em uma nova instituição, uma nova casa, uma nova cidade, em meio a uma pandemia. Aos meus pais, Ivanox e Efigênia, meus maiores exemplos, pelo amor, carinho e suporte incondicionais, por estarem ao meu lado e serem meu porto seguro em cada momento da minha vida. Ao meu irmão, Junior, pelo amor, amizade e companheirismo, por trazer sempre luz e alegria para minha vida. Ao meu grande amor, Nelinho, meu companheiro de jornada, que me acolheu de forma ímpar, que segurou a minha mão em cada momento, me incentivando, me tranquilizando, celebrando as minhas vitórias, tornando os meus dias mais leves e felizes com seu amor, carinho, paciência e cuidado. Às filhinhas, Agnes e Nala, que chegaram trazendo muita alegria e ronrons infinitos, minhas companheiras durante toda essa escrita. Também Nina e Meg, minhas saudades diárias. À minha segunda família, Vô Ferdinando, Vô Rainer, Nélio, Cláudia, Cacá, Madrinha Beth, Padrinho Ricardo e Bibi, obrigada por todo o carinho, cuidado e incentivo durante todo esse tempo. Ao meu cunhado, Aldrin, por me proporcionar as melhores risadas durante esse período, pelo apoio, atenção e carinho. A toda minha família, tios e primos, pelo amor, apoio e por comemorarem cada conquista comigo. À Valéria, por abrir meus horizontes e me fazer enxergar as coisas com outro olhar, por me incentivar e também celebrar cada pequena-grande conquista, sendo um grande exemplo de alegria, humanidade e resiliência, não deixando que eu me perdesse na minha ansiedade rs.

Agradeço ao meu orientador, Daniel, por me receber como orientanda, pela oportunidade de aprendizado, por todo o conhecimento transmitido durante as aulas e também no decorrer do desenvolvimento deste trabalho, pela imensa dedicação e atenção aos alunos que nunca vi igual, especialmente em um momento tão delicado. Deixo registrada a minha imensa admiração e gratidão. Ao Flávio, meu coorientador, o meu muito obrigada por tudo o que me ensinou, por todas as aulas, pela oportunidade de também aprender e por ser um exemplo de profissional, com uma dedicação excepcional ao laboratório e à vida acadêmica, pelo acompanhamento durante todo esse processo, trazendo sempre ideias, questionamentos e me motivando a buscar o meu melhor.

Às amigas que o mestrado me proporcionou, Gabrielle e Viviane, certamente não chegaria até aqui sem o apoio e suporte de vocês. Obrigada pela parceria, incentivo, pela companhia, por dividirem o dia a dia comigo, por todos os estudos, trabalhos, perrengues, alegrias e vitórias que compartilhamos, a caminhada certamente foi mais leve e possível com vocês. Deixo toda a minha gratidão e admiração por vocês, muito, muito obrigada. Aos amigos também das aulas, Thiago Andrade e Syllas, muito obrigada por todo o apoio e conhecimento compartilhados, por todas as trocas, conversas e ajuda no decorrer dos períodos. Ao Vitor Monteiro, meu muito obrigada por toda ajuda no decorrer das aulas e também no laboratório, pela parceria no P&D, por todo o conhecimento compartilhado, as ideias, incentivo e suporte no decorrer desse período. Ao Felipe Rodrigues, que logo no primeiro dia de aula me apresentou o laboratório, se tornando posteriormente um grande amigo e com tão pouco tempo, sempre solícito e pronto para solucionar ou buscar as respostas pra quaisquer dúvidas que eu tivesse, por toda a troca, por embarcar, captar e contribuir com as minhas ideias, pela confiança no meu trabalho e incentivo, muito, muito obrigada. Agradeço aos colegas Jessé, João Marcelo, Victor Nogueira, Vitor Mattos, Renan, Kíssila, Patrícia Barreto, Cássio, Iranildo e todos os demais que durante as aulas ou o tempo no laboratório, me ajudaram e contribuíram de alguma forma para meu crescimento e a realização deste trabalho.

À Tonini, minha companheira da Civil, meu maior exemplo da vida acadêmica, obrigada pela amizade, pela paciência, pelas revisões e toda a ajuda, por me guiar nesse caminho já percorrido e torná-lo mais leve e possível, afinal, créu é créu. A todos os meus amigos de longa data do Fundão, Bernoulli, Casinha do Amor, Ju, Karine, Gabi, Sost, Laís, Giovanna, e àqueles que se tornaram nossa família no Rio: Mayara, Zonta, Carol, Marlius, Cora, Everson, Thiago e Marina, obrigada por todo o incentivo, apoio, amizade e por todos os momentos compartilhados.

Obrigada a todos os professores da PUC-Rio pelas aulas e conhecimentos transmitidos, pela resiliência e dedicação durante esse período online. Ao Marcello, por todos os ensinamentos durante as aulas e monitorias, pela paciência e pelos 92876 emails respondidos, seu futuro na docência certamente será brilhante. A todos os técnicos e profissionais do LEM-DEC, por todo o apoio e ajuda no decorrer da minha pesquisa, pela dedicação e por tornarem o ambiente do laboratório um

lugar ótimo de se trabalhar e conviver. Um agradecimento especial ao Euclides, pela paciência, disposição e conhecimento essencial a todos os ensaios e equipamentos, ao Rogério, pela atenção, disponibilidade e por se prontificar a resolver qualquer problema que aparecesse, e ao Jhansen, que se tornou um amigo, pelo apoio e suporte em todas as moldagens, pelas conversas, lanches e por estar sempre disposto a ajudar, trazendo leveza para o dia a dia. Minha gratidão também a todos os trabalhadores da PUC-Rio, das secretarias, portarias, limpeza, cujos trabalho e dedicação são essenciais ao funcionamento da universidade e à manutenção de um ambiente harmonioso e propício ao aprendizado de todos os alunos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradeço ao CNPq e à PUC-Rio pelo suporte financeiro, fundamental à realização desta pesquisa.

Agradeço à ANEEL pelo suporte através do projeto PD-0394-1905/2019 (Furnas – PUC-Rio): “*Determinação de parâmetros para Ensaios Mecânicos do Concreto Reforçado com Fibras (CRF) sob Condições Extremas de Carregamento em Empreendimentos de Geração Hidrelétrica e Eólica*”, em especial à Daiane, que nos acompanhou de perto durante todo o tempo em que pude fazer parte e contribuir para o desenvolvimento desse trabalho. O apoio financeiro foi também essencial à realização desta pesquisa. Mais informações sobre o projeto podem ser conferidas no site www.fadiga.civ.puc-rio.br.

Resumo

Rezende de Almeida Cerqueira, Nábila; Taissum Cardoso, Daniel Carlos (Orientador); de Andrade Silva, Flávio (Coorientador). **Comportamento à Fadiga na Flexão do Concreto de Ultra-alto Desempenho**. Rio de Janeiro, 2022. 112 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) é um material cimentício avançado que possui excelente desempenho mecânico, ductilidade e durabilidade devido a uma elevada densidade de empacotamento e ao uso de fibras, promovendo benefícios à vida útil das estruturas. Grande parte das estruturas está sujeita a ações cíclicas, ou seja, variáveis com o tempo, resultando em danos de fadiga, como o surgimento e a propagação de trincas, que podem comprometer sua integridade. Assim, é essencial compreender o comportamento dos materiais sob fadiga para que sejam propostas diretrizes de projeto seguras e adequadas ao bom funcionamento das estruturas. Este trabalho visa, portanto, investigar o comportamento do concreto de ultra-alto desempenho pré-fissurado sob fadiga na flexão, quantificando sua degradação mecânica ao longo do carregamento cíclico a partir dos parâmetros de abertura de fissura (CMOD) e rigidez, contribuindo para o estudo desse tipo especial de concreto. Foram propostas equações para prever a vida à fadiga em relação ao limite superior de carga e estabelecer o limite de fadiga do concreto de ultra-alto desempenho, igual a 75,3%, considerando o limite inferior igual a 30% do limite superior. Ainda, avaliou-se o comportamento pós-fadiga de amostras que não sofreram ruptura ao longo de 1.000.000 de ciclos, sendo possível observar que o mecanismo não gerou alterações no desempenho das amostras sob flexão para limites inferiores ao limite de fadiga.

Palavras-chave

Concreto de ultra-alto desempenho; fadiga; carregamento cíclico; flexão

Abstract

Rezende de Almeida Cerqueira, Nábila; Taissum Cardoso, Daniel Carlos (Advisor); de Andrade Silva, Flávio (Co-advisor). **Flexural Fatigue Behavior of Ultra-high Performance Concrete**. Rio de Janeiro, 2022. 112 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Ultra-high Performance Concrete (UHPC) is an advanced cementitious material that has excellent mechanical performance, ductility and durability due to a high packing density and the use of fibers, contributing to increase the structures' lifespan. Most of the structures are subject to cyclic loads, which vary with time, resulting in fatigue damage such as the formation and propagation of cracks that could compromise its integrity. Thus, it is essential to understand the behavior of materials subjected to fatigue so that safe and proper design guidelines can be proposed for the appropriate performance of the structures. Therefore, this work aims to investigate the behavior of pre-cracked ultra-high performance concrete under flexural fatigue, quantifying its mechanical deterioration during cyclic loading through both crack mouth opening displacement (CMOD) and stiffness, which will contribute to the study of this special type of concrete. Equations were proposed to predict fatigue life according to the upper load limit during the cyclic loading and to establish the endurance limit of ultra-high performance concrete in 75,3%, considering the lower limit load equal to 30% of the upper limit. Also, when evaluating the post-fatigue behavior of samples that did not fail over 1,000,000 cycles it was possible to identify that the cyclic loading did not change the performance of the samples under bending, which was due to the use of upper loads below the endurance limit.

Keywords

Ultra-high performance concrete; fatigue; cyclic loading; flexural

Sumário

1.	Introdução	20
1.1.	Motivação	22
1.2.	Objetivos	22
1.3.	Organização do Trabalho.....	23
2.	Revisão da Literatura	25
2.1.	Definições e Características do Concreto de Ultra-alto Desempenho	25
2.2.	Aplicações do CUAD.....	26
2.3.	Comportamento Mecânico do CUAD	29
2.3.1.	Propriedades de Compressão.....	29
2.3.2.	Propriedades de Flexão	30
2.4.	Fadiga	33
2.4.1.	Aspectos Gerais	33
2.4.2.	Concreto Reforçado com Fibras	35
2.4.3.	Concreto de Ultra-alto Desempenho.....	51
2.4.4.	Aspectos Conclusivos	58
3.	Programa Experimental	61
3.1.	Introdução	61
3.2.	Descrição do Programa.....	61
3.2.1.	Materiais e Dosagem	61
3.2.2.	Procedimento de Mistura	64
3.2.3.	Preparo e moldagem das amostras	64
3.2.4.	Ensaio de Caracterização	65
3.2.4.1.	Espalhamento	65

3.2.4.2. Comportamento Mecânico sob Compressão e Módulo de Elasticidade	66
3.2.4.3. Comportamento Mecânico sob Flexão.....	67
3.2.5. Ensaio de Fadiga na Flexão.....	69
4. Resultados e Análises	71
4.1. Ensaio de Caracterização	71
4.1.1. Espalhamento	71
4.1.2. Comportamento Mecânico sob Compressão e Módulo de Elasticidade	71
4.1.3. Comportamento Mecânico sob Flexão.....	73
4.2. Ensaio de Fadiga na Flexão.....	76
4.2.1. Variação da Abertura de Fissura ao Longo dos Ciclos	79
4.2.2. Degradação Mecânica do CUAD no Ensaio de Fadiga	82
4.2.2.1. Análise da Degradação Mecânica em Função da Retenção de Rigidez	86
4.2.2.2. Determinação dos Limites de Ruptura	95
4.2.3. Comportamento Pós-fadiga	100
5. Conclusão	104
5.1. Conclusão	104
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	106
6. Referências Bibliográficas	107

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Passarela Sherbrooke - Canadá (1997) [28].....	27
Figura 2.2 - Passarela Seonyu - Coreia do Sul (2004) [29].....	27
Figura 2.3 - Fundação Louis Vuitton - Paris - França (2014) [30]	28
Figura 2.4 - Museu das Civilizações Européias e Mediterrâneas (MUCEM) - Marselha -França (2013) [31]	28
Figura 2.5 - Telhado e fachada do estádio Jean Bouin - Paris - França (2013) [32]	28
Figura 2.6 - Curvas de tensão-deformação para testes de compressão em amostras cilíndricas de (a) UHPC e (b) NC [33].....	29
Figura 2.7 - Amostras cilíndricas após teste de compressão em (a) UHPC (b) NC	29
Figura 2.8 - Comportamento à flexão do concreto reforçado com fibras - Diagrama Força x CMOD [43]	31
Figura 2.9 - Resposta típica de carga vs. deslocamento para concretos reforçados com fibras [45]	32
Figura 2.10 - Curvas carga x deslocamento para CUAD com diferentes frações volumétricas de fibra [11].....	33
Figura 2.11 - Razão entre tensão de fadiga e módulo de ruptura x número de ciclos - 1,0% de fibras [18].....	36
Figura 2.12 - Razão entre tensão de fadiga e módulo de ruptura x número de ciclos - 0,5% de fibras [18].....	36
Figura 2.13 - Carga x deslocamento - resposta dos ciclos de histerese da amostra 16 sob fadiga [14]	38
Figura 2.14 - Variação do deslocamento com o ciclo da amostra 21 [14]	38
Figura 2.15 - Parâmetros cíclicos [17].....	39
Figura 2.16 - Esquema do ensaio de fadiga e parâmetros avaliados [8] .	40

Figura 2.17 - Curva de fluência cíclica para diferentes frações volumétricas de fibra (segunda série) [8].....	41
Figura 2.18 - Variação da abertura de fissura x número de ciclos para a falha [8].....	41
Figura 2.19 - Variação do incremento x número de ciclos para a falha [8]	42
Figura 2.20 - Energia acumulada x número de ciclos para a falha [8]	42
Figura 2.21 - Ensaio realizados [13]	43
Figura 2.22 - Resistência à tração média relativa x largura da fissura [13]	44
Figura 2.23 - Resistência à tração característica x largura da fissura [13]45	
Figura 2.24 - Curvas S-N para concreto reforçado com fibras sob fadiga na flexão (a) comparação de modelos de S-N (b) efeito do conteúdo de fibras na curva S-N [20].....	46
Figura 2.25 - Curva média de fluência cíclica para os diferentes níveis de tensão [9].....	47
Figura 2.26 - Relação entre a variação de CMOD e o número de ciclos para a falha [9].....	47
Figura 2.27 - Comparação entre diagramas de fluência cíclica e CMOD x carga [9].....	48
Figura 2.28 - Evolução do CMOD para amostras com 45kg/m ³ de fibras [10]	49
Figura 2.29 - Resposta à fadiga (a) aumento de CMOD, (b) taxa de evolução do CMOD e (c) redução da rigidez [10].....	50
Figura 2.30 - Resposta típica da carga x CMOD e (b) evolução hipotética da zona de propagação da fissura sob carregamento cíclico [10]	51
Figura 2.31 - Pré fissuração das amostras [44].....	52
Figura 2.32 - Comportamento à flexão pós-fadiga [44]	52

Figura 2.33 - Número de ciclos para a falha x inclinação do deslocamento [15].....	53
Figura 2.34 - Deslocamento inicial x número de ciclos para a falha [15] .	53
Figura 2.35 - Diagrama deformação inicial x número de ciclos na ruptura [16].....	54
Figura 2.36 - Número de ciclos sustentados pelas amostras [49].....	55
Figura 2.37 - Procedimento para o carregamento cíclico na flexão	56
Figura 2.38 - Evolução do dano global para diferentes frações volumétricas [12].....	56
Figura 2.39 - Morfologia das trincas após cada estágio de propagação durante o carregamento cíclico da amostra SF1.5 (S = 0,65) [11].....	57
Figura 3.1 - Granulometria areia natural.....	62
Figura 3.2 - Granulometria - pó de quartzo e sílica ativa.....	62
Figura 3.3 - Fibras de aço.....	63
Figura 3.4 - Dimensões (em mm) do cone de Abrams e detalhe do ensaio de espalhamento [57]	66
Figura 3.5 - Detalhes da montagem do ensaio de compressão	67
Figura 3.6 - Detalhes da montagem do ensaio de flexão	68
Figura 3.7 - Ensaio de flexão em execução	68
Figura 3.8 - Procedimentos do ensaio de fadiga na flexão - Amostras que romperam	70
Figura 3.9 - Procedimentos do ensaio de fadiga na flexão - Amostras que não romperam	70
Figura 4.1 - Ensaio de espalhamento (a) montagem (b) resultado	71
Figura 4.2 - Ensaio de compressão do CUAD - Curvas tensão x deformação	72
Figura 4.3 - Corpos de prova após a ruptura sob compressão axial.....	72
Figura 4.4 - Resposta no ensaio de flexão - Curvas tensão x CMOD.....	73

Figura 4.5 - Amostra CP3 após o ensaio de flexão de três pontos	74
Figura 4.6 - Seção transversal após ensaio de flexão de três pontos - Amostra CP3	75
Figura 4.7 - Seção transversal após ensaio de fadiga na flexão - Amostras 80-CP1 e 80-CP3	77
Figura 4.8 - Resistência residual x recuperação de CMOD	78
Figura 4.9 - Carga residual x variação de CMOD.....	79
Figura 4.10 - Evolução de CMOD ao longo dos ciclos - Curva de fluência cíclica.....	79
Figura 4.11 - CMOD x número de ciclos relativo para (a) amostras que romperam (b) amostras que não romperam (c) níveis de tensão 50% e 70%	80
Figura 4.12 - Evolução de CMOD médio para (a) amostras que romperam com 80% e 90% (b) amostras que não romperam com 50% e 70%.....	81
Figura 4.13 - Evolução de CMOD relativo ao longo do número de ciclos relativo para amostras que romperam com 80% e 90%.....	82
Figura 4.14 - Evolução dos ciclos ao longo do ensaio de fadiga para nível de tensão de (a) 50% (b) 70% (c) 80% (d) 90%.....	83
Figura 4.15 - Evolução dos ciclos ao longo do ensaio de fadiga para as amostras 80-CP1, 70-CP2 e 50-CP2	84
Figura 4.16 - Degradação da rigidez ao longo (a) dos ciclos (b) do número de ciclos relativo	85
Figura 4.17 - Resistência residual x rigidez inicial.....	86
Figura 4.18 - Retenção de rigidez ao longo dos ciclos.....	86
Figura 4.19 - Retenção de rigidez ao longo dos ciclos para amostras que romperam nos níveis de tensão de (a) 90% (b) 80%	87
Figura 4.20 - Regressão linear para a retenção de rigidez x número de ciclos de cada amostra	88

Figura 4.21 - Procedimentos para a determinação do comportamento estimado de $R \times n$ para cada nível de tensão	89
Figura 4.22 - Comportamento médio de retenção de rigidez x número de ciclos para diferentes níveis de tensão.....	91
Figura 4.23 - Relação $\text{Log}(n) \times 1/\sigma$ para diferentes níveis de retenção de rigidez	93
Figura 4.24 - Retenção de rigidez x y_0	94
Figura 4.25 - Análise para a determinação dos limites de ruptura segundo a retenção de rigidez e o ciclo relativo	98
Figura 4.26 - Resposta no ensaio de fadiga na flexão e pós fadiga - Amostra 80-CP1.....	102
Figura 4.27 - Resposta no ensaio de fadiga na flexão e pós fadiga - Amostra 50-CP1.....	102
Figura 4.28 - Resposta no ensaio de fadiga na flexão e pós fadiga - Amostra 50-CP2.....	102
Figura 4.29 - Resposta no ensaio de fadiga na flexão e pós fadiga - Amostra 70-CP2.....	103

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Espectro dos ciclos de fadiga e estruturas correspondentes (adaptada de [47])	34
Tabela 2.2 - Parâmetros e limite de fadiga para diferentes concretos estudados	60
Tabela 3.1 - Propriedades químicas - pó de quartzo e sílica ativa.....	62
Tabela 3.2 - Composição do concreto de ultra-alto desempenho [50].....	64
Tabela 3.3 - Quantidade de amostras por ensaio	65
Tabela 4.1 - Resistência à compressão e módulo de elasticidade do CUAD	72
Tabela 4.2 - Parâmetros de resistência à flexão do CUAD.....	74
Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de fadiga na flexão	76
Tabela 4.4 - Coeficientes para equações de retenção de rigidez x número de ciclos.....	89
Tabela 4.5 - Comportamento médio de retenção de rigidez x ciclo para os diferentes níveis de tensão.....	90
Tabela 4.6 - Coeficientes finais representativos para estimativa da retenção de rigidez x número de ciclos para cada nível de tensão.....	92
Tabela 4.7 - Comportamento estimado de retenção de rigidez x ciclo para os diferentes níveis de tensão	92
Tabela 4.8 - Parâmetros das equações do comportamento de $\text{Log}(n) \times 1/\sigma$ para diferentes níveis de retenção de rigidez.....	93
Tabela 4.9 - Comportamento calculado do CUAD a partir da relação $\text{Log}(n) \times 1/\sigma$ para diferentes níveis de retenção de rigidez.....	94
Tabela 4.10 - Limites de ruptura propostos para diferentes níveis de tensão segundo os parâmetros Ciclo relativo e Retenção de rigidez	95
Tabela 4.11 - Determinação do ciclo para amostras de diferentes níveis de tensão e retenção de rigidez na ruptura	96

Tabela 4.12 - Ciclo relativo para amostras de diferentes níveis de tensão e retenção de rigidez na ruptura.....	97
Tabela 4.13 - Limites de ruptura adotados para diferentes níveis de tensão segundo os parâmetros Ciclo relativo e Retenção de rigidez	98
Tabela 4.14 - Vida à fadiga calculada e experimental do CUAD.....	99
Tabela 4.15 - Parâmetros de resistência à flexão pós-fadiga do CUAD	101

Lista de Símbolos

CUAD	Concreto de ultra-alto desempenho
CMOD	Abertura de fissura
RA	Razão de aspecto
L_f	Comprimento da fibra
d_f	Diâmetro da fibra
D_g	Índice de dano global
$f_{R,i}$	Resistência residual
P_{LOP}	Carga no limite de proporcionalidade
σ_{LOP}	Tensão no limite de proporcionalidade
P_{MOR}	Carga no módulo de ruptura
σ_{MOR}	Tensão no módulo de ruptura
$CMOD_{MOR}$	Abertura de fissura no módulo de ruptura
$P_{R,1}$	Carga residual
$P_{m\acute{a}x}$	Carga máxima no ensaio de fadiga
$P_{m\acute{i}n}$	Carga mínima no ensaio de fadiga
$P_{m\acute{e}d}$	Carga média no ensaio de fadiga
$f_{R,1}$	Resistência residual com abertura de fissura igual a 0,5 mm
$f_{m\acute{a}x}$	Tensão máxima no ensaio de fadiga
$f_{m\acute{i}n}$	Tensão mínima no ensaio de fadiga
$f_{m\acute{e}d}$	Tensão média no ensaio de fadiga
σ	Nível máximo de tensão do ensaio de fadiga
n	Ciclo
N	Número total de ciclos percorrido pela amostra
$CMOD_i$	Abertura de fissura inicial do ensaio de fadiga
$CMOD_f$	Abertura de fissura final do ensaio de fadiga
$\Delta CMOD$	Varição da abertura de fissura no ensaio de fadiga
$CMOD_{Rec}$	Recuperação da abertura de fissura após a pré-fissuração
$CMOD_{rel}$	Abertura de fissura relativa
$CMOD_n$	Abertura de fissura do ciclo n
k	Rigidez
k_0	Rigidez inicial no ensaio de fadiga
k_f	Rigidez final no ensaio de fadiga
k_n	Rigidez no ciclo n

n/N	Ciclo relativo
n/N_{Lim}	Ciclo relativo limite
R	Retenção de rigidez
R_r	Retenção de rigidez na ruptura
a e b	Coefficientes da regressão linear na relação entre R e n
y_0 , C e D	Coefficientes da relação entre $\text{Log}(n)$ e $1/\sigma$
P_{PF}	Carga máxima na flexão pós-fadiga
f_{PF}	Tensão máxima na flexão pós-fadiga
$CMOD_{PF}$	Abertura de fissura na tensão máxima pós fadiga

1. Introdução

O concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) ou, em inglês, *ultra-high performance concrete* (UHPC), apresentando como *reactive powder concrete* (RPC) em suas primeiras aparições na literatura [1] e *ultra-high performance fiber-reinforced concrete* (UHPRFC) em recentes publicações, é um material cimentício avançado que possui excelentes propriedades de resistência, ductilidade e durabilidade [2, 3]. Esse desempenho resulta de uma elevada densidade de empacotamento, principalmente devido à composição de finos da matriz cimentícia; da adoção de fatores água/cimento muito baixos, que reduzem a porosidade do concreto; do uso de fibras, que melhoram a tenacidade; e da incorporação de aditivos superplastificantes, que aumentam a trabalhabilidade do material [1]. A redução na porosidade, a melhoria na microestrutura e na homogeneidade e o aumento na tenacidade são os quatro princípios básicos para o desenvolvimento do concreto de ultra-alto desempenho [2, 3]. Devido à ausência de agregado graúdo em sua composição, alguns autores sugerem que o CUAD não é um concreto, no entanto, o termo é adotado para descrever o material dadas as suas características [3].

Desde a década de 1990, verifica-se um grande avanço no conhecimento sobre o concreto de ultra-alto desempenho, seu dimensionamento e uso na construção de estruturas em diversos países [3]. O CUAD apresenta novas oportunidades de desenvolvimento para a construção atual e futura, com aplicações diversas, tais como: componentes construtivos, pontes, adornos arquitetônicos, reparos e recuperação de estruturas, revestimentos, estruturas *off-shore* e hidráulicas, componentes verticais como torres eólicas, aplicações na indústria de óleo e gás, entre outras [4]. O material tem sido utilizado na construção de pontes em diversos países, com o incentivo de entidades governamentais visando estimular a indústria à produção em larga escala, mas a resposta tem sido lenta. Algumas possíveis razões para isso seriam o elevado custo inicial, relacionado ao material e à tecnologia de produção, e a falta de normas de dimensionamento [4].

Em geral, o concreto de ultra-alto desempenho apresenta resistência à compressão entre 150 e 200 MPa sob condições normais de cura. Dependendo de

fatores como composição, condições de processamento e tipo de cura, ela pode atingir até 800 MPa [5]. Em relação ao desempenho à tração e à flexão, as resistências variam entre 25 e 150 MPa e 30 e 141 MPa, respectivamente [5]. O módulo de elasticidade varia entre 40 e 70 GPa, dependendo da composição e tipo de cura [6]. Uma quantidade limitada de estudos compreende o comportamento do material sob fadiga na flexão, sendo necessário estender a pesquisa para o concreto reforçado com fibras e de alto desempenho a fim de ampliar a visão e o entendimento acerca do tema.

Geralmente a fadiga no concreto é avaliada a partir das curvas S-N, em que N representa o número de ciclos que o material suporta quando submetido a uma tensão S, representada em termos de uma porcentagem de sua resistência [7]. Outros parâmetros utilizados para analisar o comportamento do concreto sob fadiga seriam a abertura de fissura (*crack mouth opening displacement* - CMOD) [8–11], a rigidez [12], a largura da fissura [13], o deslocamento [12, 14, 15], a deformação [16], a energia dissipada e acumulada [8, 17], entre outros.

A incorporação de fibras no concreto melhora seu desempenho à fadiga, aumentando sua ductilidade e o limite de fadiga [8, 17–20], possibilitando maior controle da abertura de fissuras [10]. No entanto, o uso de fibras promove grande dispersão nos resultados de fadiga na flexão, que já contam com uma variabilidade própria inerente ao processo [21, 22], devido à aleatoriedade na orientação e distribuição das fibras ao longo do elemento estrutural [23]. Dentre os fatores que influenciam o comportamento do concreto sob fadiga na flexão é possível destacar a quantidade e o tipo de fibras [18], a magnitude das ações [9, 10, 14], o histórico e a frequência de carregamento, a presença de excentricidades no carregamento, as propriedades do material e as condições ambientais [7].

Buscando entender melhor o comportamento do concreto de ultra-alto desempenho sob fadiga na flexão e tendo em vista a relevância do tema em termos do desenvolvimento de novos materiais e tecnologias na construção civil, bem como o excelente desempenho estrutural do material, este trabalho apresenta um estudo da degradação mecânica do CUAD em termos da abertura de fissura (CMOD) e da rigidez do material ao longo do carregamento cíclico, sendo propostas equações para prever a vida à fadiga em relação ao limite superior de carga e estabelecer o limite de fadiga do concreto de ultra-alto desempenho. Optou-se pela realização dos ensaios em amostras pré-fissuradas para obter um melhor

entendimento do processo em situações nas quais a estrutura já sofreu algum tipo de dano. Ainda, avaliou-se o comportamento pós-fadiga de amostras que não sofreram ruptura ao longo de 1.000.000 de ciclos; como esperado, a fadiga não gerou alterações no desempenho das amostras sob flexão para limites inferiores ao limite de fadiga.

1.1. Motivação

Devido ao avanço no desenvolvimento de novos materiais de construção capazes de conferir melhores desempenhos e maior durabilidade às estruturas, é necessário se estudar em profundidade o comportamento desses materiais para promover uma implementação segura e adequada dos mesmos na construção civil. Nesse contexto, grande parte das estruturas está sujeita a ações cíclicas, ou seja, variáveis com o tempo, resultando em danos de fadiga, como o surgimento e a propagação de trincas, que podem comprometer sua funcionalidade e trazer inúmeros riscos às pessoas.

Assim, é essencial compreender o comportamento dos materiais sob fadiga para que sejam propostas diretrizes de projeto seguras e adequadas ao bom funcionamento das estruturas. Este trabalho visa, portanto: (i) avaliar o comportamento do concreto de ultra-alto desempenho sob fadiga na flexão, quantificando sua degradação mecânica a partir dos parâmetros de abertura de fissura e rigidez; e (ii) contribuir para o estudo desse tipo especial de concreto, que ainda carece de normas técnicas, possuindo apenas diretrizes técnicas em países como França, Alemanha e Japão [3].

1.2. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento de um concreto de ultra-alto desempenho sob fadiga na flexão. Para a realização desse objetivo, os seguintes objetivos específicos podem ser delineados:

- Compreender as propriedades básicas do material no estado fresco, a partir do ensaio de espalhamento, e no estado endurecido, por meio dos ensaios de compressão axial e de flexão monotônico;

- Compreender o comportamento à fadiga do material a partir da realização de ensaios de fadiga até 1.000.000 de ciclos em amostras pré-fissuradas, sob diferentes níveis de carregamento em relação à resistência residual;
- Avaliar os resultados em termos da evolução de CMOD e da retenção de rigidez;
- Desenvolver um modelo para predição do número de ciclos para a falha do material em função da tensão aplicada e da rigidez ao longo dos ciclos;
- Calcular e definir o limite de fadiga do material;
- Estudar o comportamento pós-fadiga de amostras não rompidas.

1.3. Organização do Trabalho

O Capítulo 1 apresenta a introdução, a motivação e os objetivos deste trabalho.

O Capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica acerca das definições e características do concreto de ultra-alto desempenho, suas aplicações e seu comportamento mecânico sob compressão e flexão. Em seguida, o mecanismo de fadiga é abordado de uma forma geral, sendo posteriormente apresentados estudos acerca do concreto de ultra-alto desempenho sob fadiga na flexão, estendida também a concretos reforçados com fibras, convencional e de alto desempenho. Por fim, tem-se um resumo das principais questões abordadas nos estudos apresentados.

O Capítulo 3 consiste no desenvolvimento do programa experimental, indicando os materiais utilizados na pesquisa para a produção do concreto de ultra-alto desempenho e os detalhes da execução dos ensaios de caracterização e de fadiga.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização e de fadiga, seguidos da avaliação do comportamento do concreto de ultra-alto desempenho. Aborda-se a variação da abertura de fissura e a degradação mecânica ao longo dos ciclos. Em seguida, é feita uma análise da degradação em função da retenção de rigidez, sendo estabelecidos os limites para a ruptura e as equações que relacionam o nível máximo de tensão com o número de ciclos para a ruptura. Define-se também uma possível relação com a abertura de fissura. Por fim, calcula-

se o limite de fadiga do CUAD e avalia-se o comportamento pós-fadiga das amostras que não romperam após 1.000.000 de ciclos.

O Capítulo 5 traz as conclusões da pesquisa e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

2. Revisão da Literatura

2.1. Definições e Características do Concreto de Ultra-alto Desempenho

O concreto de ultra-alto desempenho (CUAD) consiste em um dos materiais cimentícios mais inovadores desenvolvidos nos últimos 30 anos [24]. No decorrer dos últimos 20 anos, foram observados avanços significativos na pesquisa e aplicação do CUAD, que apresenta excelente comportamento reológico, incluindo trabalhabilidade e autoadensamento, além de elevado desempenho mecânico, durabilidade e ductilidade [3]. O material também apresenta benefícios à vida útil e à sustentabilidade das estruturas [1].

Geralmente o CUAD é composto por cimento e sílica ativa, pó de quartzo, areia de quartzo, aditivo superplastificante e fibras, com fator água-cimento bastante reduzido, variando entre 0,14 e 0,20 [2, 3]. O pó de quartzo possui uma distribuição granulométrica que varia entre 0,1 μm e 100 μm e é utilizado como um material de enchimento inerte [2]. No caso das fibras de aço, as mais utilizadas são as microfibras de aço de 13 mm de comprimento e 0,2 mm de diâmetro [2]. Segundo Shi *et al.* [2] e Azmee e Shafiq [3], a areia possui diâmetro entre 150 μm e 600 μm e representa o maior material granular da mistura. A remoção do agregado graúdo melhora a homogeneidade e a estrutura interna do material [24]. Em relação ao uso de materiais cimentícios suplementares em substituição ao cimento e à sílica ativa, como cinzas volantes e escória de alto forno, seria possível reduzir o custo do CUAD de forma significativa e ainda atingir resistências de 150 MPa a 200 MPa sob regime normal de cura [2, 5].

O desempenho do concreto de ultra-alto desempenho é obtido a partir da otimização dos materiais em sua composição, sendo também influenciado pela forma de preparo e pelo regime de cura adotado [2]. Sua produção tem como base quatro princípios, sendo a redução da porosidade, a melhoria da microestrutura e da homogeneidade e o aumento da tenacidade [2, 3]. Tais princípios são alcançados com uma elevada densidade de empacotamento, proporcionada principalmente pela composição de finos da matriz cimentícia; com a adoção de fatores água-cimento muito baixos, que reduzem a porosidade do concreto, o uso de fibras, que melhoram

a ductilidade, e o emprego de superplastificantes, que aumentam a trabalhabilidade do material [1].

A resistência à compressão do concreto convencional é geralmente inferior a 50 MPa e varia entre 50 e 100 MPa para o concreto de alto desempenho (CAD) [25]. No caso do concreto de ultra-alto desempenho, a variação da propriedade fica entre 150 e 200 MPa, podendo atingir até 800 MPa dependendo da composição, do processo de produção e das condições de cura [5]. Segundo as recomendações da AFGC (*Association Francaise de Génie Civil*) [26], o CUAD deve apresentar resistência à compressão de pelo menos 150 MPa com o uso de fibras de aço para proporcionar comportamento dúctil ao material. Concretos de ultra-alto desempenho com resistência entre 130 e 150 MPa, reforçados com fibras de aço ou outro material, são considerados CUAD de menor resistência [26]. As resistências à tração e à flexão variam, respectivamente, entre 25 e 150 MPa e 30 e 141 MPa [5].

Em relação à durabilidade, o concreto de ultra-alto desempenho apresenta comportamento superior ao concreto convencional quanto à resistência à penetração de íons cloreto, à carbonatação e à abrasão, indicando elevado potencial de aplicação em ambientes nocivos [24]. O material também se mostrou resistente a ciclos de gelo e degelo [1]. Esse desempenho está relacionado à melhora na densidade tanto da estrutura dos grãos da matriz quanto da zona de contato entre matriz e agregados, além dos próprios produtos de hidratação, que levam à construção de uma porosidade caracterizada pela ausência de poros capilares [1].

2.2. Aplicações do CUAD

Diferentes técnicas e soluções para as formulações da composição do concreto de ultra-alto desempenho têm sido adotadas para atender às necessidades específicas e individuais segundo as demandas de dimensionamento, construção e arquitetura. A primeira estrutura construída com o concreto de ultra-alto desempenho foi uma passarela híbrida protendida sobre o rio Magog em Sherbrooke, Canadá, em 1997 [3]. Desde então, foram conduzidas diversas investigações para um dimensionamento ótimo de elementos de CUAD, dadas as propriedades mecânicas avançadas e a elevada durabilidade do material, resultando no projeto e construção de diversas pontes inteiras ou componentes pelo mundo [3],

em países como Austrália, Áustria, Canadá, China, República Tcheca, França, Alemanha, Itália, Japão, Mianmar, Holanda, Nova Zelândia, Eslovênia, Coreia do Sul, Suíça, Vietnã, Estados Unidos, Malásia e Cingapura [4].

O concreto de ultra-alto desempenho possui diversas aplicações, desde infraestruturas até o uso em edificações e não estrutural (Figura 2.1 a Figura 2.5), sendo observadas vantagens como construção simples, designs inovadores, manutenção reduzida ao longo da vida útil, peso e seções transversais reduzidas, impermeabilidade, resistência ao impacto, uso eficaz em sistemas de proteção por barreiras, isolamento acústico, entre outras [3]. Uma recente aplicação que merece destaque é o uso do material em torres eólicas [25, 27]. Segundo Azmee e Shafiq [3], o excelente desempenho do CUAD é responsável pelo grande potencial em diversas aplicações, no entanto, melhorias ainda devem ser realizadas para se utilizar o material de forma otimizada, aproveitando ao máximo sua resistência, durabilidade e capacidade de flexão. Ainda, destaca-se que o material oferece soluções econômicas e inovadoras em áreas onde o uso do concreto convencional é limitado, sendo muito promissor.

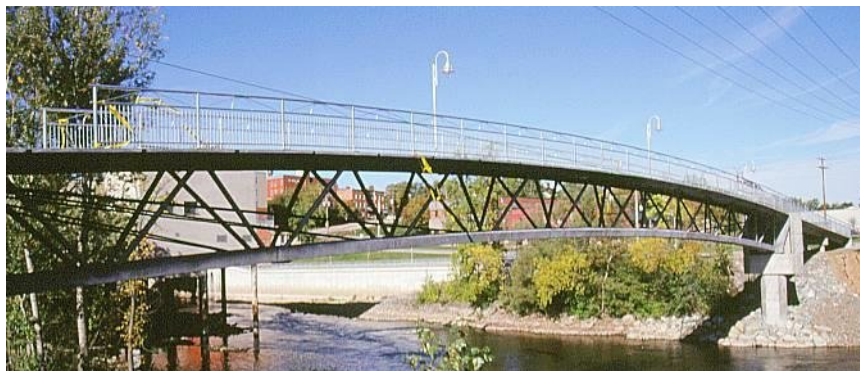


Figura 2.1 - Passarela Sherbrooke - Canadá (1997) [28]



Figura 2.2 - Passarela Seonyu - Coreia do Sul (2004) [29]



Figura 2.3 - Fundação Louis Vuitton - Paris - França (2014) [30]

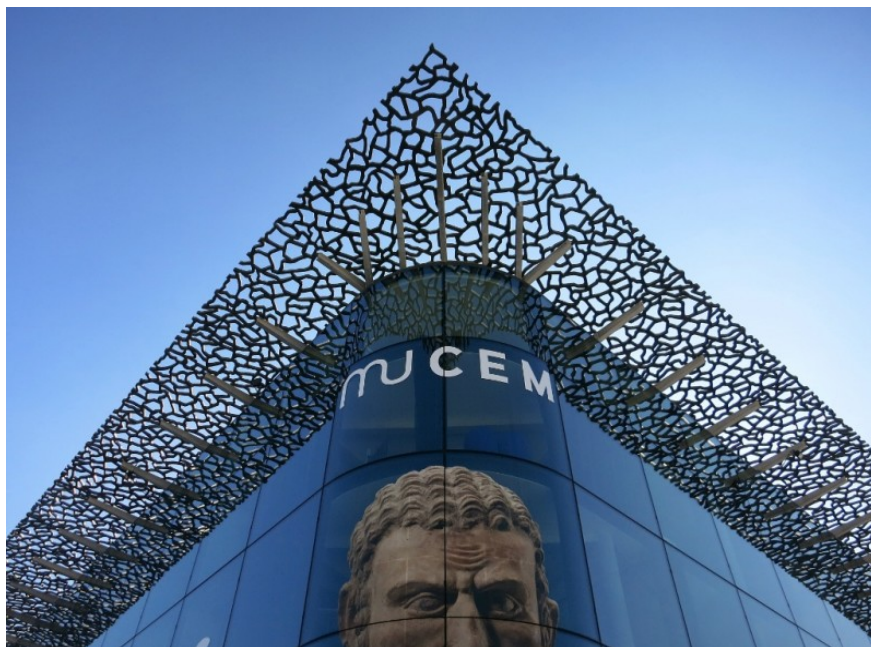


Figura 2.4 - Museu das Civilizações Européias e Mediterrâneas (MUSEM) - Marselha -França (2013) [31]

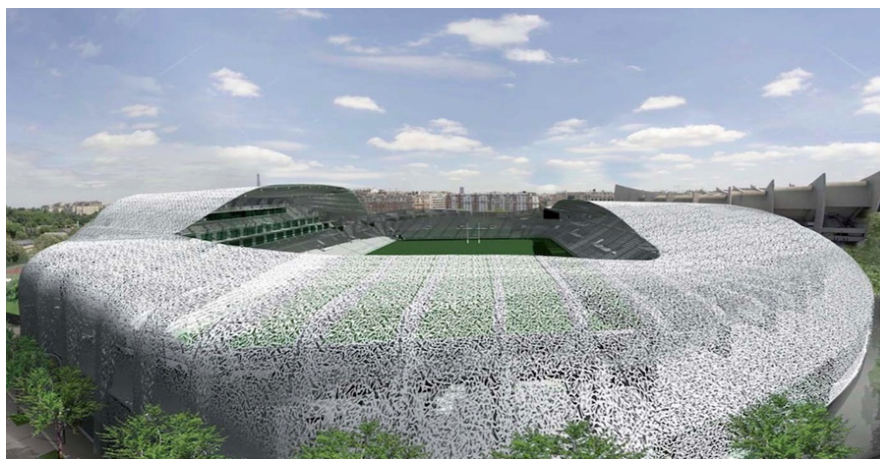


Figura 2.5 - Telhado e fachada do estádio Jean Bouin - Paris - França (2013) [32]

2.3. Comportamento Mecânico do CUAD

2.3.1. Propriedades de Compressão

Segundo Shafieifar, Farzad e Azizinamini [33], o concreto de ultra-alto desempenho (UHPC) apresenta desempenho à compressão significativamente superior ao do concreto convencional (NC), sendo sua resistência, ductilidade e módulo de elasticidade consideravelmente mais elevadas. O concreto convencional possui comportamento elástico até o pico de carga seguido de um comportamento de rápido *strain softening* (Figura 2.6(b)). Após a primeira fissura, quando a deformação lateral supera a capacidade de tração, as amostras perderam completamente a resistência e falharam de forma brusca e repentina, caracterizando o comportamento frágil do material (Figura 2.7(b)). Já o concreto de ultra-alto desempenho apresenta comportamento elástico até aproximadamente 50% da resistência à compressão, seguido de comportamento de *strain hardening* até o pico de carga (Figura 2.6(a)). A falha ocorre de maneira dúctil devido à interação fibra-matriz, fazendo com que as amostras mantenham sua integridade mesmo com a perda total de resistência (Figura 2.7(a)).

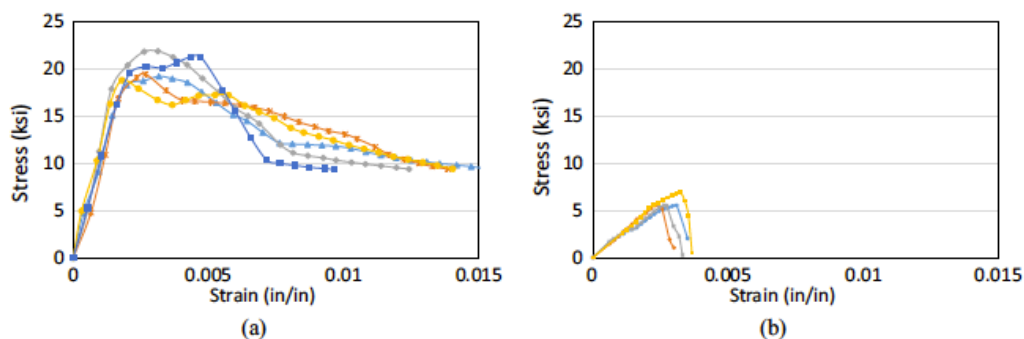


Figura 2.6 - Curvas de tensão-deformação para testes de compressão em amostras cilíndricas de (a) UHPC e (b) NC [33]

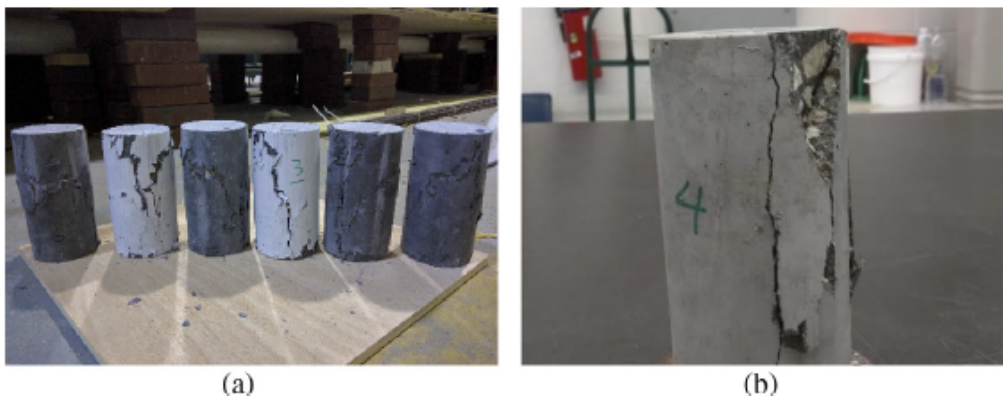


Figura 2.7 - Amostras cilíndricas após teste de compressão em (a) UHPC (b) NC

Diversos outros estudos analisaram a influência das fibras na resistência à compressão do CUAD. Observa-se uma redução na propriedade a partir da incorporação de fibras de aço em algumas situações, como o uso de fibras com gancho e comprimento de 30 mm [34, 35]. As causas atribuídas ao efeito seriam a adição de descontinuidades à matriz e a incorporação de ar a partir da inclusão das fibras na mistura. A adição de um volume maior (acima de 4%) de microfibras (13 mm ou 12,7 mm de comprimento) também diminuiu a resistência do material devido à presença de ar aprisionado proveniente da adição de superplastificante na mistura [35], e à distribuição heterogênea ou aglomeração das fibras [35, 36], apesar de ainda superar a capacidade do concreto sem fibras [35–37]. Outra pesquisa indicou uma redução na resistência a partir da incorporação de fibras de 20 mm e 13 mm nas frações de 1,5% e 3%, porém, segundo os autores, a diferença não foi expressiva [38].

Em contrapartida, diversos outros autores indicam que a adição de fibras de aço ao CUAD aumenta sua resistência à compressão [12, 35–37, 39–42]. O formato e o tamanho das fibras influenciam no desempenho do concreto, dependendo da aderência das fibras e do intertravamento mecânico [42], bem como da razão de aspecto da fibra (L_f/d_f), que quanto maior, maior a eficiência da fibra em formar pontes para resistência e transmissão dos esforços [36, 38, 42]. O uso combinado de diferentes fibras também favorece a resistência, chegando a apresentar desempenho superior ao do concreto com fibras de um único tipo [12, 35, 36, 42].

As fibras também são responsáveis por modificar o modo de falha do CUAD sob compressão, que passa a ocorrer de forma dúctil, mantendo a integridade do material até a completa ruptura, sendo verificada uma redução gradual da tensão pós-pico [33, 37, 42]. Outros fatores que interferem na resistência à compressão são as condições de cura e exposição [37], o teor de areia em relação ao cimento [34] e o fator água/cimento [41].

2.3.2. Propriedades de Flexão

A EN 14651 [43] apresenta orientações para a avaliação do comportamento do concreto reforçado com fibras sob flexão. A tensão no limite de proporcionalidade (LOP) do material é calculada a partir da P_{LOP} , que corresponde à carga máxima no intervalo de 0,05 mm. De acordo com a norma, $f_{R,i}$ equivale à

resistência residual obtida a partir do ensaio de flexão de três pontos em amostras entalhadas, com $i = 1, 2, 3$ e 4 correspondendo, respectivamente, aos valores de CMOD de $0,5, 1,5, 2,5$ e $3,5$ mm. Ainda segundo a norma, o módulo de ruptura (MOR) é definido como o ponto onde verifica-se o início do comportamento de *softening* do material após o LOP. A resistência pós-pico é classificada de acordo com a razão entre $f_{R,3}$ e $f_{R,1}$. A Figura 2.8 indica os parâmetros apresentados, sendo F_L equivalente a P_{LOP} e F_i a força a partir da qual é calculada a resistência $f_{R,i}$.

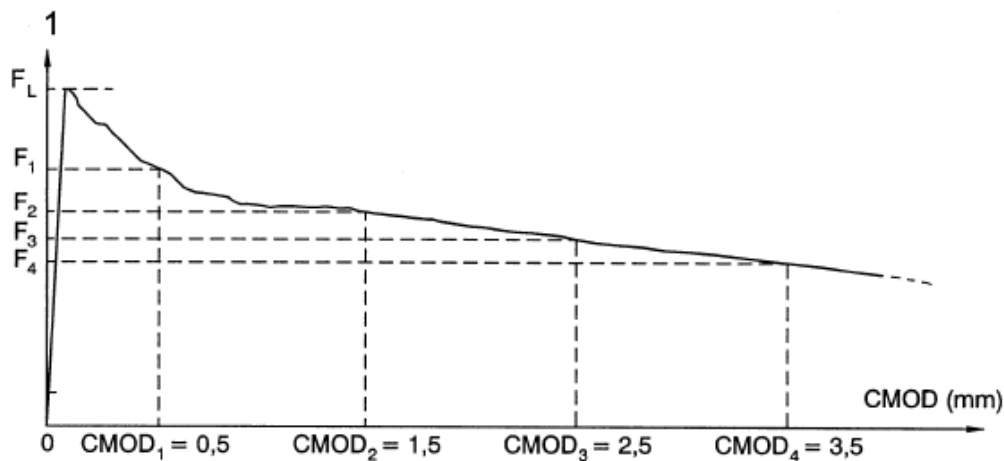


Figura 2.8 - Comportamento à flexão do concreto reforçado com fibras - Diagrama Força x CMOD [43]

A adição de fibras proporciona um aumento na resistência à flexão do concreto de ultra-alto desempenho devido ao efeito de ponte que elas desempenham, que permite a transferência de carga após a fissuração, aumentando a capacidade de resistência do material e aumentando sua ductilidade, evitando a ruptura repentina [35, 40]. O comportamento do concreto reforçado com fibras sob flexão apresenta duas etapas, onde a primeira consiste em um desenvolvimento linear, relativo ao comportamento elástico que ocorre antes da fissuração, ou seja, é governada pela matriz; já a segunda, representa a resposta do material após a fissuração, incluindo a contribuição das fibras [44]. Tal etapa pode ser caracterizada como *deflection softening*, quando ocorre uma redução na capacidade de carga após a fissuração até a falha, ou *deflection hardening*, quando há um aumento na resistência do material. As curvas típicas de carga vs. deslocamento para os comportamentos de *deflection softening* e *deflection hardening* de concretos reforçados com fibras podem ser observadas na Figura 2.9.

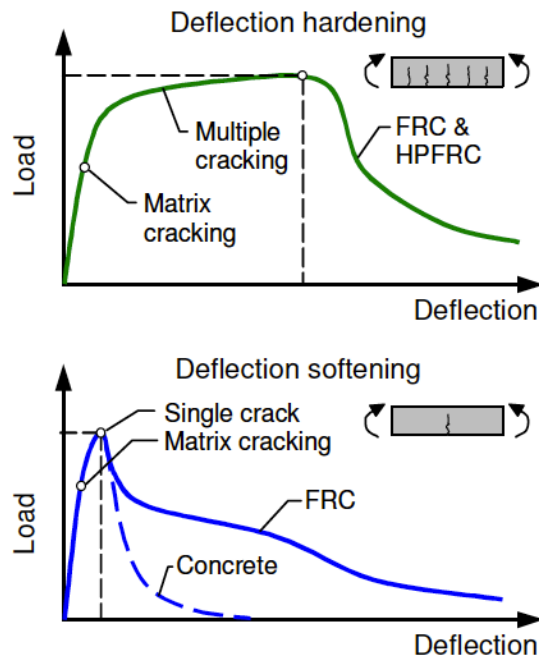


Figura 2.9 - Resposta típica de carga vs. deslocamento para concretos reforçados com fibras [45]

Diferentes fibras de aço implicam em diferentes efeitos na resistência. Alguns autores [33, 35, 40] indicam a partir de seus estudos que o uso de fibras de aço com extremidade enganchada proporciona maiores resistências em relação a outros tipos de fibra, como microfibras de vidro e aço, uma vez que são capazes de servir de ponte para maiores fissuras, retardando a propagação das mesmas [40].

Em relação à quantidade de fibras, constatou-se que quanto maior a fração volumétrica, maior a resistência à flexão [11, 15, 35, 41, 42] devido ao aumento do efeito de ponte e à redução da distância entre as fibras [41]. No entanto, um aumento excessivo acaba sendo prejudicial devido à aglomeração de fibras e ao intertravamento mecânico [35]. Assim, uma combinação ideal de diferentes fibras pode aumentar o desempenho do concreto à flexão [35]. Niu *et al.* [11] constataram que a adição de uma fração de 0,5% em volume de fibras de aço provocou uma redução da capacidade de resistência do concreto após a fissuração, caracterizando um comportamento de *deflection softening*, porém, para frações maiores, houve um comportamento de *deflection hardening*, sendo muito favorável à resistência e a ductilidade do compósito (Figura 2.10).

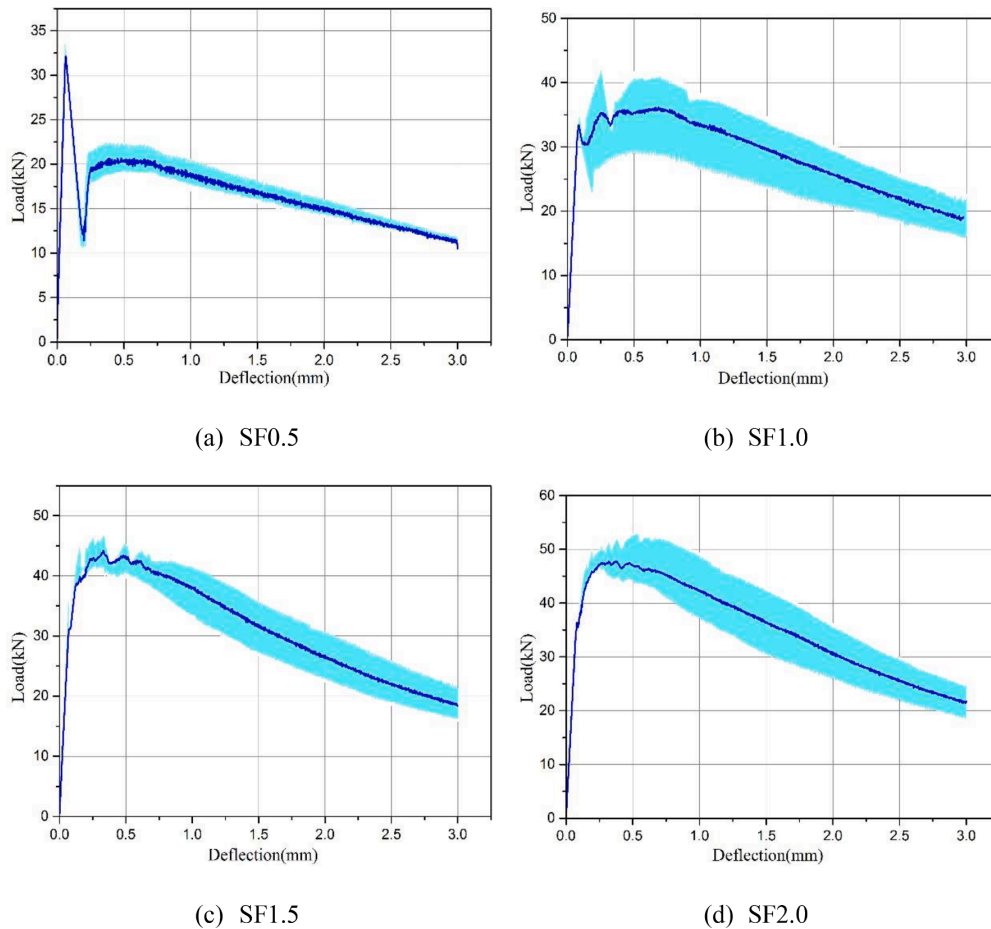


Figura 2.10 - Curvas carga x deslocamento para CUAD com diferentes frações volumétricas de fibra [11]

A forma de moldar as amostras exerce influência na resistência do CUAD devido ao alinhamento e à distribuição das fibras [15]. Quanto ao efeito da orientação das fibras, verificou-se um aumento significativo da resistência à flexão quando orientadas paralelamente ao eixo da viga [41]. Por fim, considerando o CUAD em diferentes idades, percebe-se um aumento na resistência à flexão com o tempo. No entanto, em relação às resistências nas idades de 28 e 90 dias, observa-se uma proximidade entre os valores, atribuída à estrutura densa do CUAD, que não permite a presença de água livre para posterior hidratação do cimento [42].

2.4. Fadiga

2.4.1. Aspectos Gerais

A fadiga pode ser definida como um processo progressivo e permanente de mudanças na estrutura interna do material submetido a carregamentos repetitivos.

No caso do concreto, as mudanças estão associadas à propagação de microfissuras que resultam em um aumento significativo das deformações plásticas, levando a alterações em suas propriedades mecânicas [46]. De acordo com González *et al.* [13], há uma perda progressiva de rigidez do material que reduz a resistência residual à tração na flexão, uma vez que o carregamento cíclico prejudica a interface fibra-matriz através da propagação das fissuras. Logo, estruturas já fissuradas se apresentam mais vulneráveis à fadiga [13].

Existem três categorias em que são classificados os carregamentos de fadiga, i.e. carregamentos de baixo ciclo, alto ciclo e super-alto ciclo. A primeira consiste na aplicação de um número menor de ciclos sob elevadas tensões, enquanto a segunda e a terceira abrangem elevados números de ciclos sob tensões reduzidas [46]. Dentre os carregamentos, é possível destacar vibrações, cargas de tráfego, vento e ondas [47]. A Tabela 2.1 apresenta exemplos de estruturas para as respectivas faixas de carregamento.

Tabela 2.1 - Espectro dos ciclos de fadiga e estruturas correspondentes (adaptada de [47])

Baixo Ciclo: 0 - 10^3 ciclos	Alto Ciclo: 10^3 - 10^7 ciclos	Super-alto Ciclo: 10^7 - 5×10^8 ciclos
Estruturas submetidas a terremotos Estruturas submetidas a tempestades	Pontes Pavimentos aeroportuários Pavimentos rodoviários Dormentes ferroviários Torres eólicas	Estruturas de transporte de massa Estruturas marítimas Fundações de máquinas e equipamentos

Ao estudar a fadiga no concreto, é possível destacar dois parâmetros. O primeiro consiste na resistência à fadiga, que equivale à fração da resistência do material sob a qual ele suporta o carregamento cíclico até um determinado número de ciclos [7]. Já o segundo, corresponde ao limite de fadiga, definido pelo limite máximo de carregamento em relação à resistência do material sob o qual ele não irá falhar quando submetido a 2.000.000 de ciclos [18].

A incorporação de fibras ao concreto melhora o seu desempenho sob fadiga na flexão, proporcionando maiores limites de fadiga, a formação de trincas mais finas e uma maior absorção de energia até a falha [48]. Os efeitos podem ser justificados pela prevalência dos mecanismos de tração, sobre os quais as fibras exercem um maior controle sendo capazes de conter as trincas através dos efeitos de ponte e aumentar a vida à fadiga [46]. No entanto, existem dificuldades em

quantificar essa melhora devido aos diversos fatores que influenciam o comportamento do material sob fadiga, como sua própria composição, a frequência e o tipo de carregamento, a determinação dos limites de carga, entre outros, levando à existência de grande dispersão nos resultados das pesquisas [46].

Segundo Cavalaro e Aguado [23], há uma dispersão intrínseca do concreto reforçado com fibras devido à distribuição e orientação aleatórias das fibras que, somada à variabilidade relativa à própria fadiga [21, 22], faz com que seja necessária a proposição de modelos que considerem bases lógicas para a avaliação das incertezas de projeto, garantindo o estabelecimento de uma probabilidade de falha adequada ou utilizar coeficientes para absorver as imprecisões na formulação das normas de fadiga [9, 22].

2.4.2. Concreto Reforçado com Fibras

Ramakrishnan, Wu e Hosalli [18] estudaram o concreto sem fibras e reforçado com quatro diferentes tipos de fibra, nas frações volumétricas de 0,5% e 1%, sendo: concreto Tipo A com fibras de aço de extremidades com ganchos e razão de aspecto (RA) igual a 100; Tipo B com fibras de aço retas e retangulares de RA igual a 40; Tipo C com fibras de aço corrugadas e RA entre 40 e 65; e Tipo D com fibras de polipropileno. Foram realizados ensaios de fadiga à flexão (3 pontos) em prismas de 152 x 152 x 533 mm, a uma frequência de 20 Hz, com carga mínima de 10% da resistência à flexão obtida no ensaio estático e a carga máxima iniciando em 90%, reduzindo o percentual caso a amostra rompesse com menos de 2.000.000 de ciclos. Determinou-se a tensão de fadiga, definida como a maior tensão de flexão que a amostra pode suportar durante 2.000.000 de ciclos, e o limite de fadiga, correspondente à tensão de fadiga em termos de um percentual do módulo de ruptura da matriz de concreto ou de seu próprio módulo de ruptura [18].

A partir dos resultados, os autores constataram um aumento da tensão de fadiga com a adição de fibras, sendo maior para as fibras com ganchos. Uma relação curvilínea entre a tensão e o número de ciclos foi observada até que a amostra atingisse a tensão de fadiga, onde o comportamento passou a ser linear, indicando que, submetida a valores de tensão menores que a tensão de fadiga, a amostra não romperia (Figura 2.11 e Figura 2.12) [18].

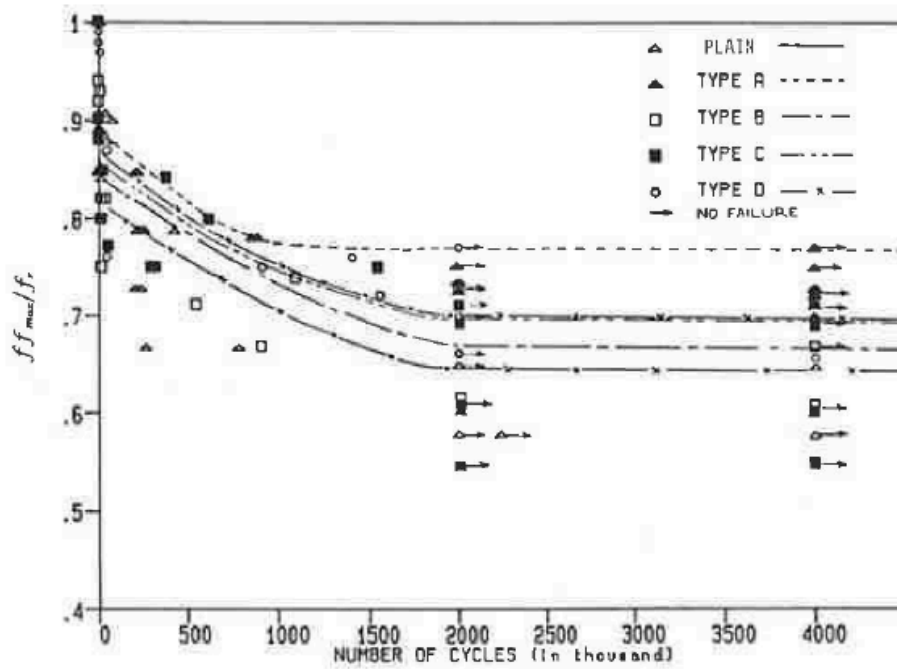


Figura 2.11 - Razão entre tensão de fadiga e módulo de ruptura x número de ciclos - 1,0% de fibras [18]

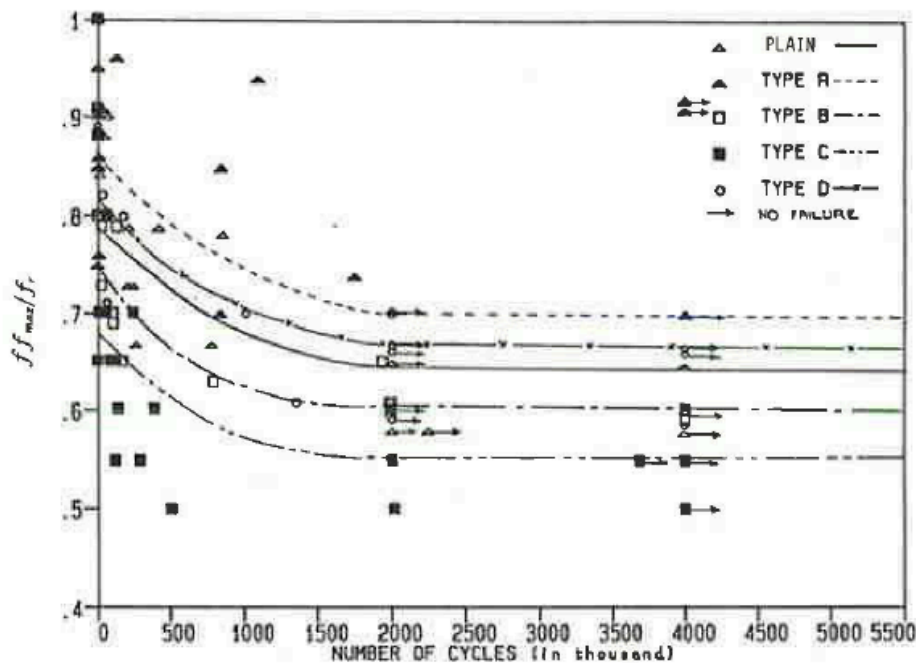


Figura 2.12 - Razão entre tensão de fadiga e módulo de ruptura x número de ciclos - 0,5% de fibras [18]

No estudo, os autores também observaram um aumento do limite de fadiga em termos do módulo de ruptura da matriz com o aumento do percentual de fibras. Considerando a relação com o próprio módulo de ruptura dos respectivos concretos, o aumento ocorreu apenas para as fibras de extremidade enganchada, havendo

redução da propriedade para as demais fibras, o que segundo os autores pode ser atribuído à menor razão de aspecto das fibras. Ainda, submetendo ao ensaio de flexão pós-fadiga as amostras que não romperam após 4.000.000 de ciclos, foi identificado um aumento na resistência, sendo maior quanto menor a tensão aplicada no ensaio de fadiga. Os autores também destacam uma maior variabilidade nos resultados para maiores frações de fibra [18].

Nanni [19] analisou um concreto reforçado com fibras de aço deformadas e com extremidades com gancho em uma fração volumétrica de 0,46% submetido à fadiga na flexão (4 pontos). Os limites de carga foram adotados em relação à carga de primeira fissura, sendo o mínimo de 10% e o máximo variando de 70 a 95% para o concreto com fibras (SFRC) e 60 a 90% para o concreto sem fibras, respectivamente. A frequência utilizada foi de 20 Hz e o limite de ciclos estabelecido em 1.000.000 [19].

A partir dos resultados, foi observado um aumento da carga de primeira fissura com a incorporação de fibras no concreto e também um melhor desempenho à fadiga. Com 70% da carga, as amostras de SFRC suportaram 10^6 ciclos. Para as demais porcentagens, verificou-se que o número de ciclos até a falha foi maior para as fibras com maior razão de aspecto [19].

Naaman e Hammoud [14] avaliaram dois concretos de alto desempenho reforçados com fibras de aço de extremidades com gancho, sendo um com 2% de fibras de 30 mm de comprimento e 0,5 mm de diâmetro (RA = 60) e outro híbrido com 1% da mesma fibra e 1% de fibras de 50 mm de comprimento e 0,5 mm de diâmetro (RA = 100). Foram feitas amostras prismáticas de 100 x 100 x 400 mm, pré-fissuradas e submetidas à fadiga na flexão (3 pontos) até a ruptura ou 5.000.000 de ciclos. Estabeleceu-se o limite mínimo em 10% e o máximo em 70%, 80% e 90% da resistência à flexão obtida no ensaio estático [14].

Os resultados indicam alta dispersão na vida à fadiga entre as amostras, atribuído pelos autores a possíveis falhas em estimar a resistência e estabelecer os limites de carga, afetando de forma significativa o número de ciclos até a falha. Em relação às fibras utilizadas, a composição híbrida mostrou um desempenho melhor para o limite máximo de 80%, porém para os demais limites o comportamento foi semelhante. As amostras que suportaram 5.000.000 de ciclos foram ensaiadas estaticamente e apresentaram aumento na resistência. Ainda, foi constatado um aumento da área dos ciclos de histerese, indicando um aumento do dano nas

amostras, que acontece próximo à ruptura (Figura 2.13), assim como um aumento da variação do deslocamento entre as cargas máxima e mínima com o passar dos ciclos (Figura 2.14). Não foram observadas variações no desempenho do material associadas à razão de aspecto, possivelmente atribuído pelos autores ao fato de o gancho das fibras exercer maior controle no arrancamento que o comprimento das mesmas. Por fim, ficou estabelecido o limite de fadiga em 65% da resistência à flexão no ensaio estático [14].

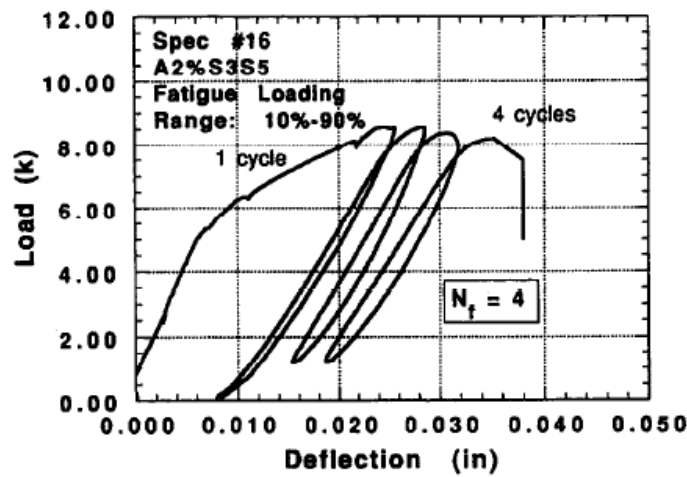


Figura 2.13 - Carga x deslocamento - resposta dos ciclos de histerese da amostra 16 sob fadiga [14]

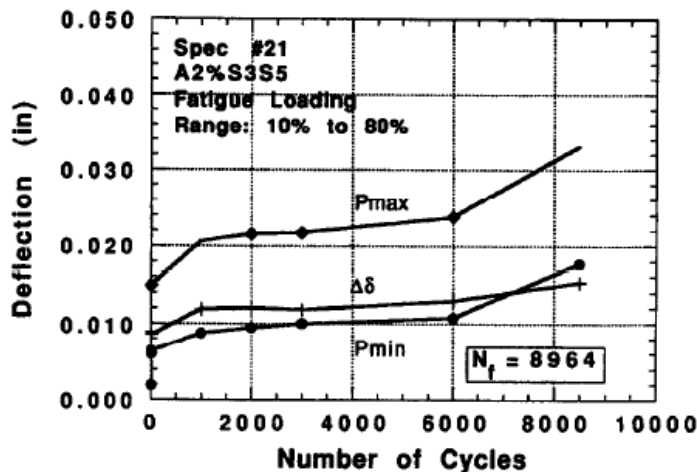


Figura 2.14 - Variação do deslocamento com o ciclo da amostra 21 [14]

Boulekbache *et al.* [17] estudaram três tipos de concreto: convencional (OC), autoadensável (SCC) e de alta resistência (HSC), reforçados com fibras de aço de extremidade enganchada, com razões de aspecto de 65 e 80, nas frações de 0,5% e 1% em volume. As amostras de 150 x 150 x 700 mm foram submetidas a

ensaios de fadiga à flexão (4 pontos) controlados por deslocamento até certa deflexão e então por força para o descarregamento até o início do próximo ciclo.

As análises foram feitas em termos do grau de reversibilidade da amostra (R), do módulo cíclico (E_{cyc}) e da energia acumulada. O grau de reversibilidade é definido pela razão entre o deslocamento reversível (δ_r) e o deslocamento total (δ_t) do loop de histerese, enquanto o módulo cíclico corresponde à inclinação do loop (Figura 2.15). A energia acumulada, por sua vez, corresponde ao acumulado das áreas dos ciclos relativos aos deslocamentos de 1, 2, 3, 4 e 5 mm. A área de cada ciclo de histerese corresponde à energia dissipada [17].

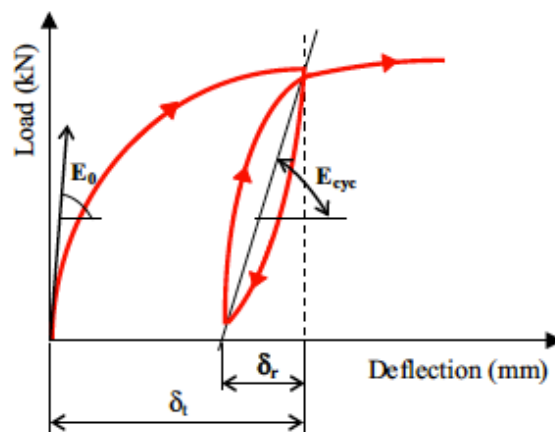


Figura 2.15 - Parâmetros cíclicos [17]

Os resultados indicaram que a presença de fibras no concreto sob carregamento cíclico aumenta a ductilidade do material antes da falha. O comportamento pós-pico é melhorado, caracterizando um *softening*, fazendo com que a energia seja liberada de forma lenta e gradual em caso de falha. A orientação das fibras demonstrou ter grande influência na resistência à flexão do concreto sob carregamento cíclico. O deslocamento reversível do concreto na zona pós fissurada e a energia acumulada aumentaram com o conteúdo de fibras. Com relação à razão de aspecto, o deslocamento reversível aumentou com essa propriedade, enquanto a energia acumulada não foi muito influenciada [17].

Germano, Tiberti e Plizzari [8] apresentaram um estudo de um concreto sem fibras (PF) e reforçado com fibras de aço de 35 mm de comprimento e 0,55 mm de diâmetro (RA = 65) nas frações volumétricas de 0,5% e 1% (SFRC0.5% e SFRC1.0%). Foram realizados ensaios de fadiga na flexão (3 pontos) em prismas

de 150 x 150 x 500 mm a uma frequência de 3 Hz, conforme a Figura 2.16. Diferentes limites mínimo e máximo foram estabelecidos em função da carga máxima de cada amostra ($P_{\text{máx}}$) obtida em uma etapa de pré-fissuração (trecho OAB), sendo 25%-75%, 35%-85% e 15%-65%, mantendo-se uma amplitude de 50% em todos os casos. Tal medida foi feita a fim de reduzir a elevada variação nos resultados de fadiga associada à dispersão nos valores de $P_{\text{máx}}$ das amostras. O critério de parada para o ensaio cíclico (ponto C) foi adotado quando detectado, com o auxílio de um software externo, um aumento rápido no valor da abertura de fissura (CMOD) entre um ciclo e outro, indicando uma aproximação da envoltória de ruptura, quando a amostra não consegue mais sustentar o carregamento e se aproximando da falha. Para avaliar o comportamento do material foram utilizados o incremento de CMOD por ciclo ($d\text{CMOD}/dn$), a variação do CMOD ($\Delta\text{CMOD} = \text{CMOD}_u - \text{CMOD}_0$) e a energia acumulada, correspondente ao somatório da energia dissipada em cada ciclo, calculada através da área do loop de histerese [8].

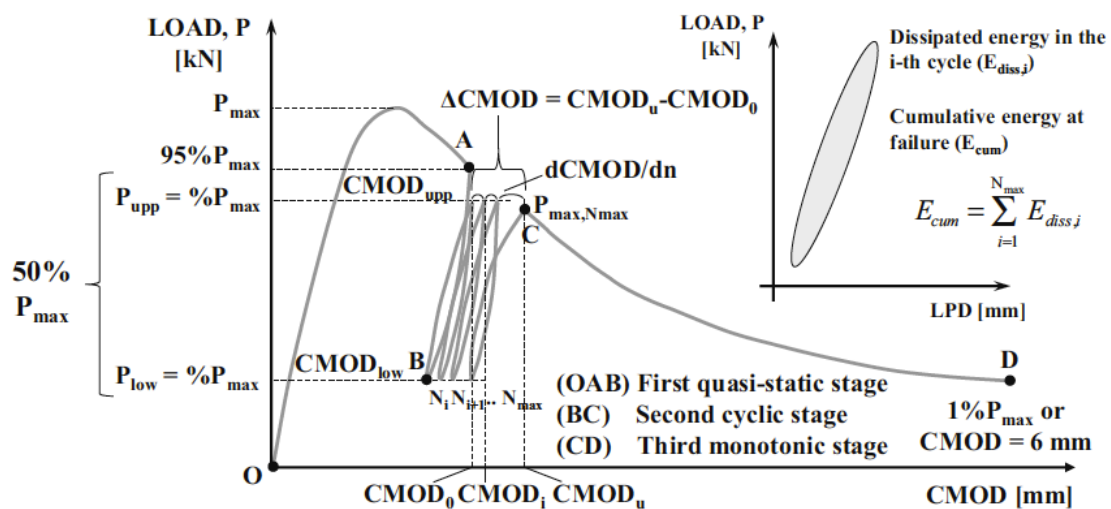


Figura 2.16 - Esquema do ensaio de fadiga e parâmetros avaliados [8]

Diferente do que se esperava inicialmente, os resultados ainda apresentaram elevada dispersão. Em relação à quantidade de fibras, a fração de 0,5% apresentou melhores resultados para a vida à fadiga, necessitando maior número de ciclos para a falha. Isso pode indicar que a presença de mais danos internos provenientes de uma maior quantidade de fibras incorporada à mistura acaba se sobrepondo aos benefícios esperados para a fadiga (Figura 2.17). A partir da Figura 2.18, verifica-se que a variação da abertura da fissura (ΔCMOD) aumenta com a presença de

fibras e diminui com o aumento do limite máximo de carga, ou seja, quanto maior o carregamento imposto durante os ciclos, menos a fissura irá abrir para atingir a envoltória de ruptura [8].

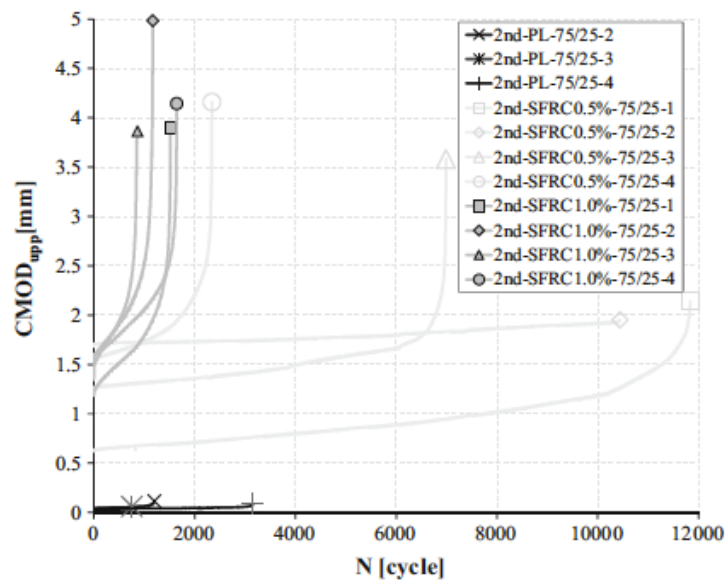


Figura 2.17 - Curva de fluência cíclica para diferentes frações volumétricas de fibra (segunda série) [8]

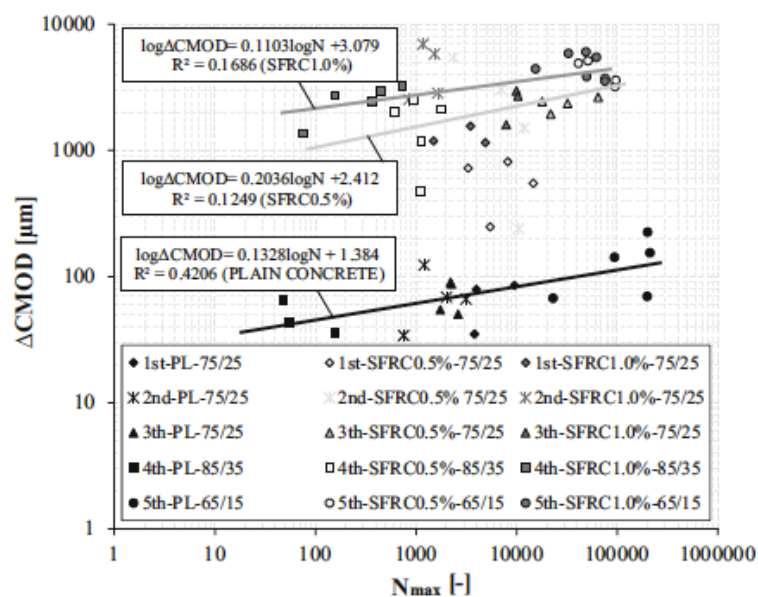


Figura 2.18 - Variação da abertura de fissura x número de ciclos para a falha [8]

A Figura 2.19 apresenta o incremento por ciclo ($dCMOD/dn$) em função da vida à fadiga, sendo possível observar uma relação inversa, de modo que quanto maior o incremento, mais rápido a fissura se abre, e mais rápido a envoltória de

ruptura é atingida. Outro aspecto que pode ser verificado é um aumento do incremento com a incorporação das fibras. Os autores concluem que uma combinação dos parâmetros determina a vida à fadiga do concreto, sendo mais dependente do incremento não sendo possível identificar uma relação clara com ΔCMOD . Em relação à energia acumulada, verificou-se uma relação direta com o número máximo de ciclos, aumentando também com a quantidade de fibras (Figura 2.20). Os autores indicam ainda que as envoltórias de ruptura dos testes de fadiga podem ser estimadas a partir dos ensaios monotônicos [8].

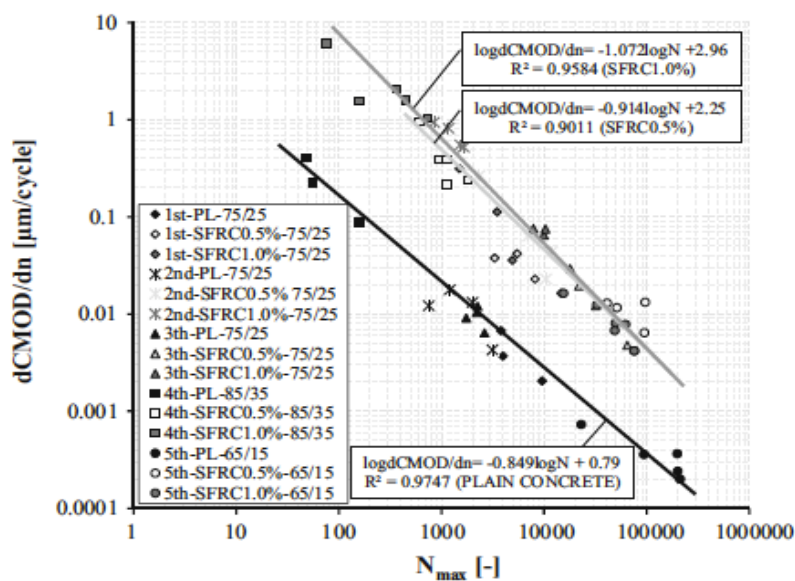


Figura 2.19 - Variação do incremento x número de ciclos para a falha [8]

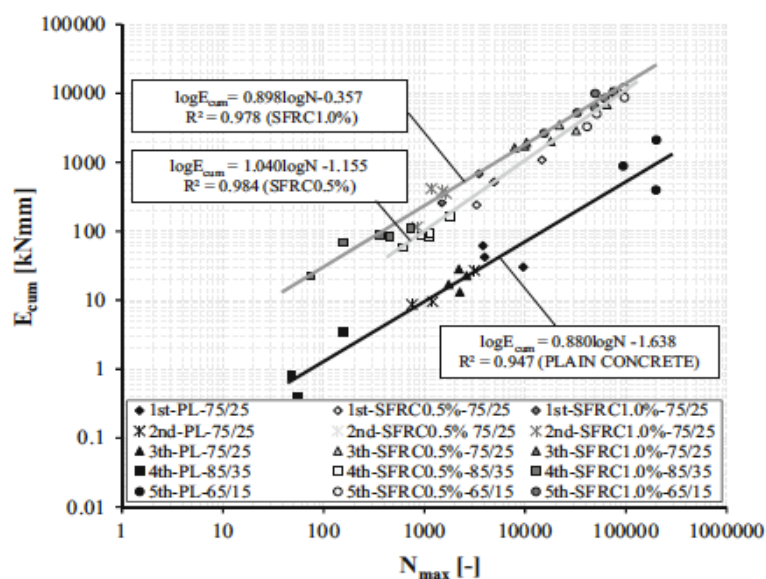


Figura 2.20 - Energia acumulada x número de ciclos para a falha [8]

González *et al.* [13] pesquisaram um concreto de alto desempenho com fibras de aço de 50 mm de comprimento na fração volumétrica de 1% sob fadiga na flexão (3 pontos) em prismas de 150 x 150 x 600 mm. Os testes foram conduzidos em quatro fases. Primeiro, uma pré-fissuração foi realizada em todas as amostras, seguida de testes de fadiga até a ruptura (12 amostras) e até determinado número de ciclos (21 amostras), finalizando com testes estáticos, realizados nas 21 amostras submetidas ao número pré-determinado de ciclos e em outras 7 às quais não se aplicou o carregamento cíclico. Esse processo é ilustrado na Figura 2.21.

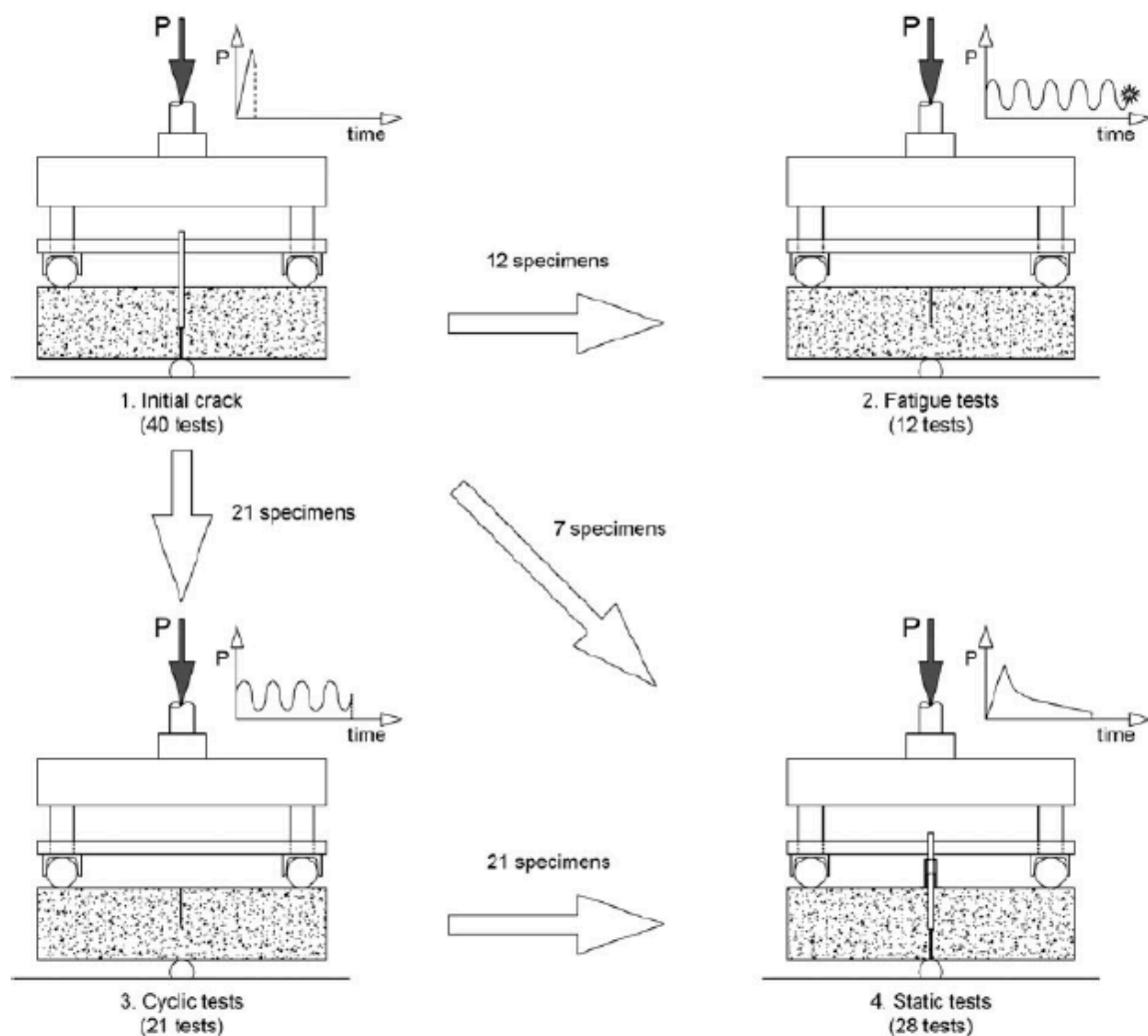


Figura 2.21 - Ensaio realizados [13]

A frequência utilizada foi de 6 Hz e os limites máximo e mínimo de carga adotados foram de 65% e 5% da resistência à flexão obtida na etapa de pré-fissuração. Com a segunda etapa, determinou-se a vida à fadiga do concreto com o auxílio da distribuição de Weibull, considerando a probabilidade de falha de 0,2.

Foram estabelecidos os números limites de ciclo para a próxima etapa segundo o dano D , tomado como igual a 0, 0,2, 0,8 e 0,9, sendo ele a razão entre o número de ciclos e a vida à fadiga [13].

As análises foram feitas com base na variação da resistência residual à tração do concreto sob os diferentes níveis de dano em função da largura da fissura, para as quais foram propostas equações matemáticas potenciais e exponenciais, estas apresentando melhor correlação (Figura 2.22 e Figura 2.23). Os coeficientes das curvas ajustadas apresentaram uma relação com o nível de dano, o que, segundo os autores, é um comportamento padrão para outras correlações envolvendo o dano causado por carregamento cíclico. Também são propostas equações que estimam o valor da resistência residual à tração em função do dano [13].

No geral, observou-se que as cargas cíclicas levam a uma redução progressiva da rigidez das amostras e, conseqüentemente, à redução da resistência residual à tração. Sob o aspecto mesoestrutural, o carregamento cíclico induz fissuras na interface entre a fibra e a pasta de cimento levando a um enfraquecimento da ligação fibra-matriz e uma redução da resistência residual. Também foi verificada grande dispersão nos resultados [13].

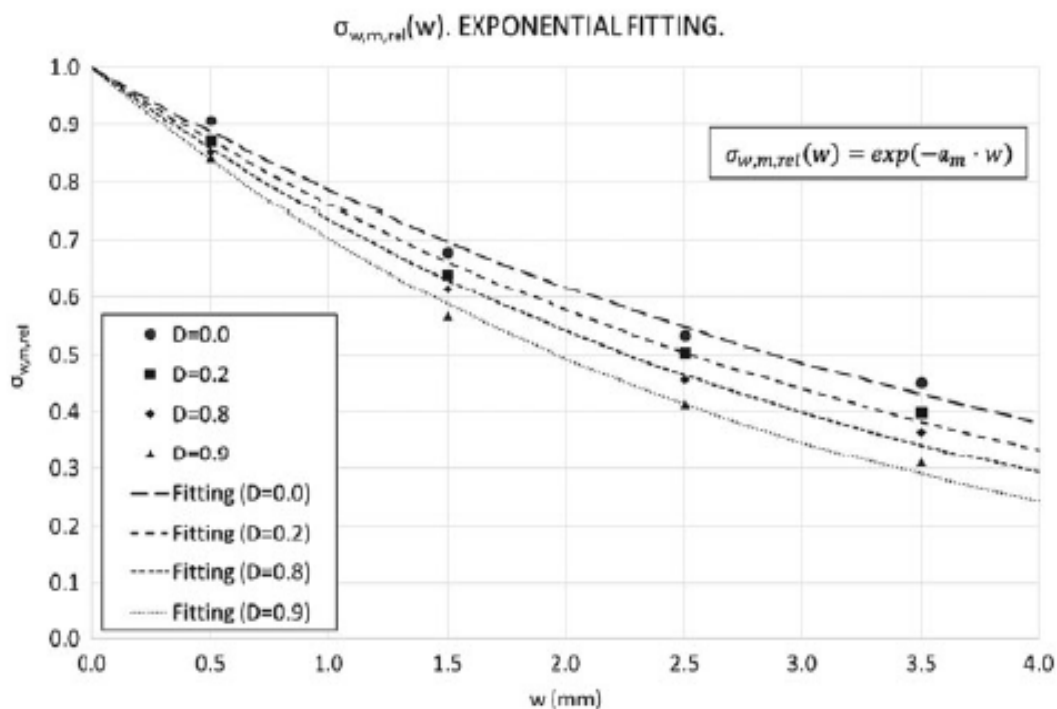


Figura 2.22 - Resistência à tração média relativa x largura da fissura [13]

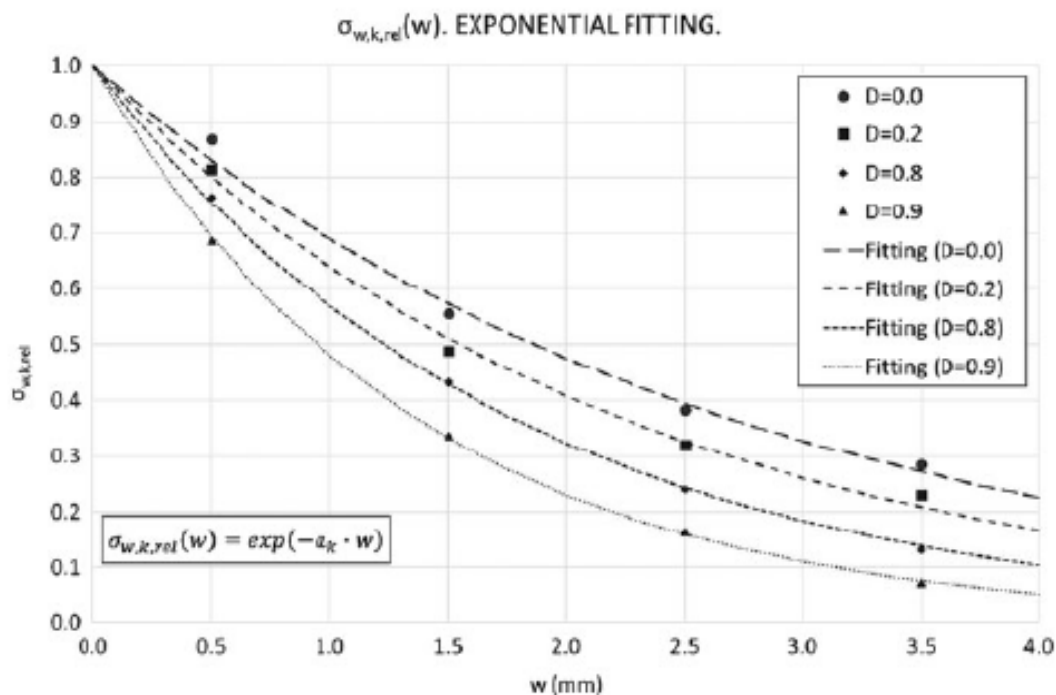


Figura 2.23 - Resistência à tração característica x largura da fissura [13]

Banjara e Ramanjaneyulu [20] estudaram um concreto reforçado com fibras de 35 mm de comprimento e razão de aspecto igual a 65, nas frações volumétricas de 0,5%, 1% e 2% sob fadiga na flexão. Foram estabelecidos os limites de carga mínimo e máximo em 20% e 65%, 75% e 85%, respectivamente, em relação à resistência à flexão obtida em ensaios estáticos prévios, sendo mantida a frequência de 5 Hz para os ensaios. As amostras de 100 x 100 x 500 mm foram entalhadas, sendo medida a abertura de fissura durante o ensaio (CMOD).

A partir dos resultados, foram analisadas equações propostas por outros autores para a curva S-N, sendo proposta uma expressão unificada, considerando o efeito médio das fibras de aço, e uma outra equação para estimar a vida à fadiga do concreto incluindo a fração volumétrica (Figura 2.24). Também foram propostos modelos numéricos baseados no dano à fadiga e na mecânica da fratura para estimar a vida à fadiga. No geral, observou-se que a incorporação de fibras no concreto aumenta a ductilidade e melhora seu desempenho à fadiga [20].

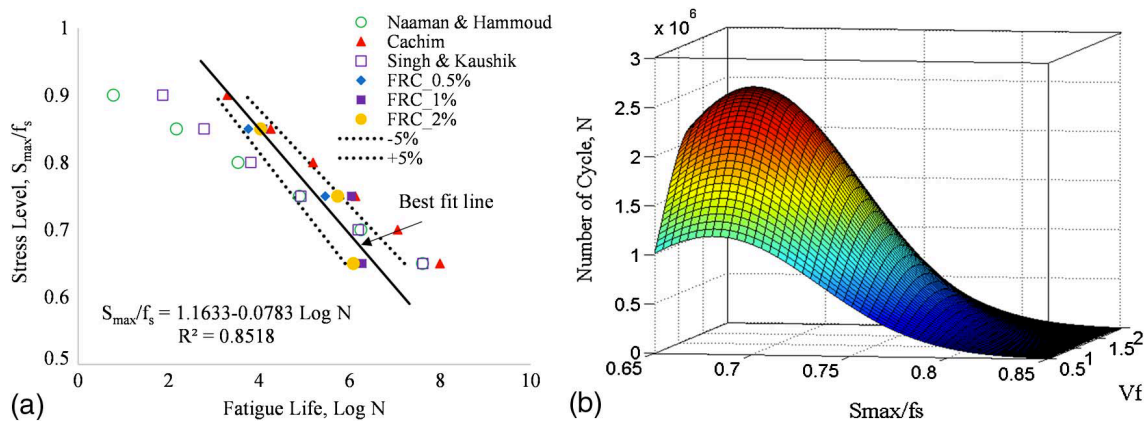


Figura 2.24 - Curvas S-N para concreto reforçado com fibras sob fadiga na flexão (a) comparação de modelos de S-N (b) efeito do conteúdo de fibras na curva S-N [20]

Carlesso, De la Fuente e Pialarissi-Cavalaro [9] realizaram um estudo de um concreto de alto desempenho (HPFRC), com fibras de aço de 13 mm e 0,16 mm de diâmetro a uma fração volumétrica de aproximadamente 2%, sob fadiga na flexão em amostras de 75 x 75 x 275 mm. As amostras foram submetidas a uma pré-fissuração até CMOD igual a 0,5 mm e a carga correspondente ($P_{0,5\text{mm}}$), utilizada como referência para o limite máximo dos ciclos ($S = 0,65, 0,70, 0,75, 0,80, 0,85$ e $0,90$), sendo o limite mínimo igual a 30% do máximo. A frequência utilizada foi de 6 Hz e o teste foi conduzido até 2.000.000 de ciclos. Os resultados apresentaram grande variabilidade, indicando que a vida à fadiga de amostras pré-fissuradas é resultado de uma diferença probabilística na orientação e distribuição das fibras na seção e um reflexo da própria dispersão da fadiga.

Considerando a curva de fluência cíclica, que apresenta abertura de fissura superior (CMOD_{upp}) em função do número de ciclos (Figura 2.25), verificou-se que quanto maior o nível de carga aplicado, menor é a vida à fadiga e mais acentuada é a resposta da fase II, que representa uma evolução linear estável cuja inclinação denota o incremento de abertura de fissura por ciclo ($d\text{CMOD}/dn$). A fase III corresponde a um aumento rápido das deformações até a falha, ocorrendo de forma mais suave e com CMOD_{upp} maior para maiores níveis de carga, indicando que níveis menores de tensão produzem uma falha mais frágil. Segundo os autores, maiores níveis de tensão promovem a falha através do contínuo arrancamento das fibras, gerando assim um comportamento dúctil, enquanto menores níveis de carga levam a um enfraquecimento progressivo da interface fibra-matriz, através da propagação de microfissuras [9].

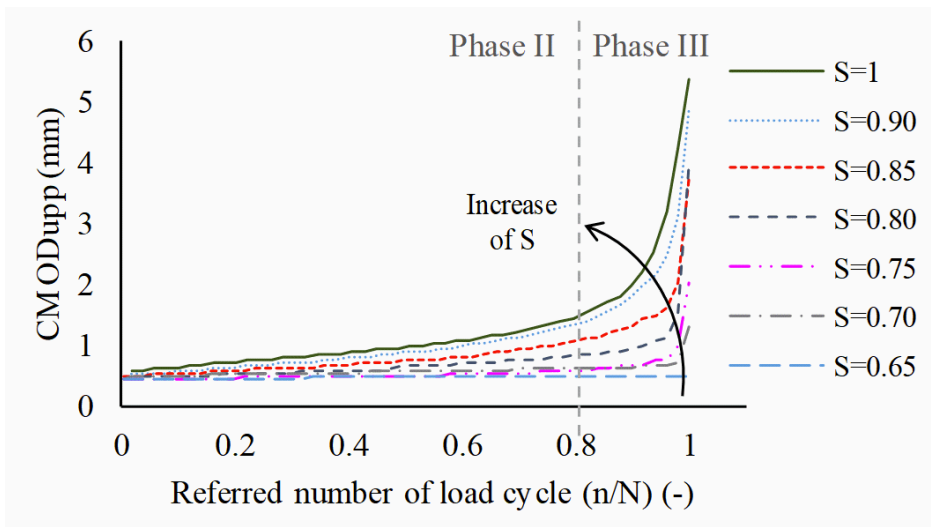


Figura 2.25 - Curva média de fluência cíclica para os diferentes níveis de tensão [9]

A fase I denota elevado crescimento da deformação causado pelas microfissuras pré-existentes, não sendo representada no gráfico pois as amostras foram pré-fissuradas. Em relação à variação de CMOD entre o último ciclo e o primeiro ($\Delta\text{CMOD} = \text{CMOD}_f - \text{CMOD}_i$), foi identificado que maiores níveis de carga estão relacionados a maiores variações de CMOD e, portanto, menor vida à fadiga (Figura 2.26) [9].

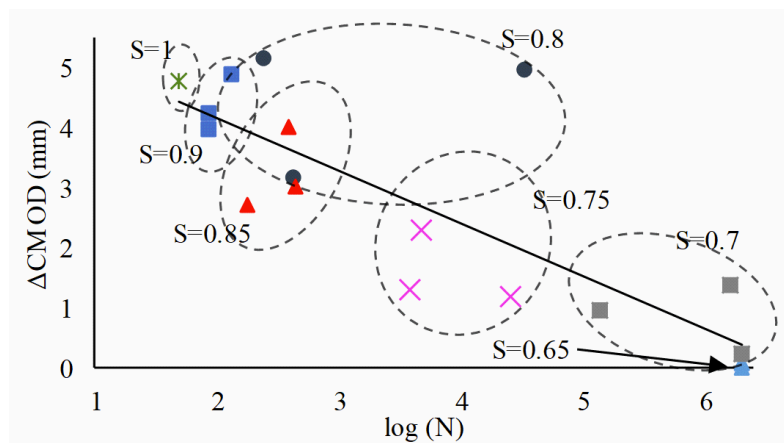


Figura 2.26 - Relação entre a variação de CMOD e o número de ciclos para a falha [9]

Os autores também encontraram uma relação entre a resistência à fadiga das amostras e a curva estática, indicando que a envoltória de ruptura pode ser aproximada pela mesma. Como constatado anteriormente, a variação de CMOD mostra-se inicialmente constante. Os ciclos vão induzindo danos progressivos na seção transversal, aumentando o CMOD e a perda da capacidade de resistência da

amostra. Assim, tão logo seja atingida a envoltória de ruptura, o processo de dano se acelera até que a falha ocorra. Esse processo é ilustrado na Figura 2.27 [9].

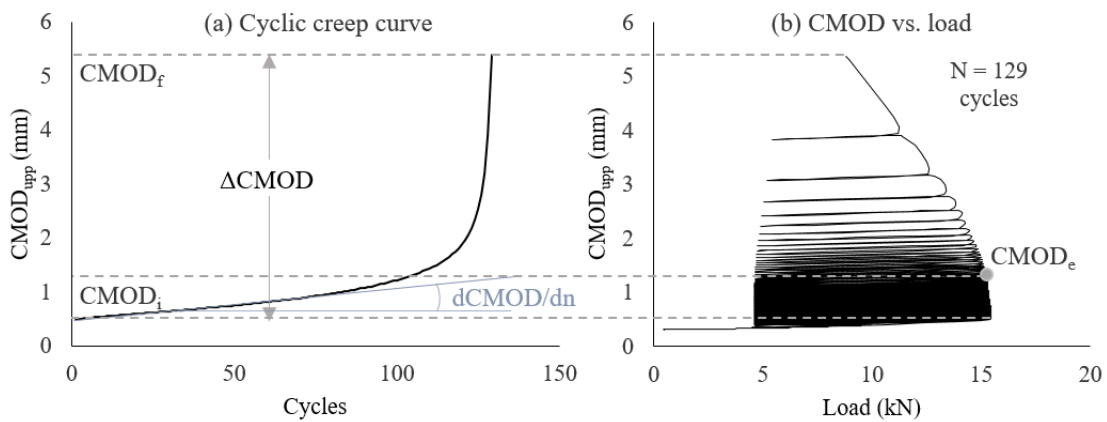


Figura 2.27 - Comparação entre diagramas de fluência cíclica e CMOD x carga [9]

O limite de fadiga encontrado foi de 0,66 considerando 2.000.000 de ciclos segundo a curva S-N obtida com os resultados. As amostras que não romperam foram ensaiadas estaticamente após a fadiga. Além de não serem observadas alterações na capacidade de resistência das amostras, verificou-se que algumas apresentaram carga máxima superior à carga $P_{0,5\text{mm}}$. Ao examinar a seção transversal após os ensaios, verificou-se que as microfibras de aço não apresentaram ruptura, o que indica que a falha sob fadiga ocorre sob contínuo arrancamento das fibras, sendo atribuída aos danos na interface fibra-matriz que reduzem de forma progressiva a capacidade de ancoragem. Por fim, foram utilizados métodos matemáticos para prever o comportamento à fadiga pela curva S-N considerando uma abordagem probabilística segundo a distribuição de Weibull e o modelo de McCall, o último se mostrando mais adequado para a probabilidade de falha desejada (50%) [9].

Stephen e Gettu [10] avaliaram um concreto reforçado com 0, 10, 30 e 45 kg/m^3 de fibras de aço com extremidades com gancho com 60 cm de comprimento e 0,75 mm de diâmetro sob fadiga na flexão. Foram produzidas pequenas vigas de 150 x 150 x 750 mm, pré-fissuradas até abertura de fissura igual a 0,5 mm e carga correspondente $F_{R,1}$, sendo posteriormente ensaiadas à fadiga, considerando os limites máximos de 50%, 60%, 70%, 80% e 90% e mínimo de 10% em relação a $F_{R,1}$. Os ensaios foram realizados até CMOD igual a 5 mm ou 2.000.000 de ciclos.

A partir dos resultados (Figura 2.28), foi observado na fase II um aumento mais intenso de CMOD para maiores limites de carga, justificado pela maior energia imposta às amostras em um menor intervalo de tempo, levando a um maior dano na zona de propagação da fratura. Assim, para cargas maiores, o comprimento crítico da fratura é atingido antes, fazendo com que a ruptura ocorra em menos ciclos. Para maiores frações de fibra, esse crescimento é mais inibido, uma vez que as fibras controlam mais a abertura da fissura. Com relação à transição entre as fases II e III (ao atingir o comprimento crítico), observou-se que ela ocorreu em $CMOD_{cr}$ maiores para maiores faixas de carga. Sob maiores cargas de fadiga, a fissura abre mais durante os ciclos, mobilizando mais as fibras de modo que elas reduzem mais o efeito da fadiga, levando a valores maiores para o CMOD crítico. Notou-se também que esse comportamento é mais significativo para concretos com menores quantidades de fibra. Ainda, observou-se que a degradação de rigidez ocorre de maneira mais rápida após o CMOD crítico [10].

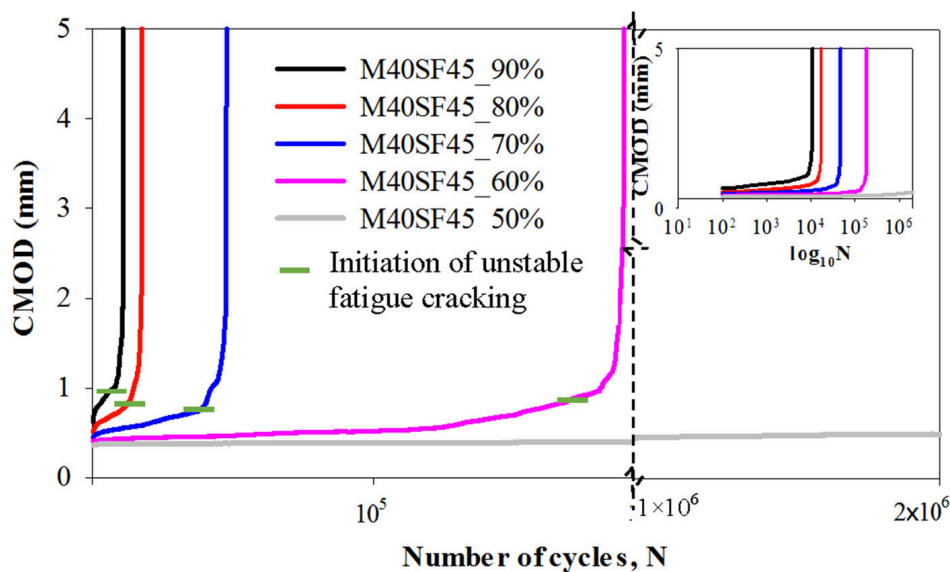


Figura 2.28 - Evolução do CMOD para amostras com 45kg/m^3 de fibras [10]

A Figura 2.29 apresenta de forma generalizada as fases de fissuração I, II e III: aumento inicial (azul), crescimento lento estável (verde) e crescimento rápido instável (vermelho). Inicialmente, apenas uma parte da zona fissurada criada na etapa de pré-fissuração encontra-se sob tensão, de modo que poucas fibras são mobilizadas. Assim, ocorre um aumento de CMOD, porém, sob uma taxa decrescente, à medida em que mais fibras são ativadas e um maior controle de

abertura é proporcionado. Na segunda fase, há um aumento da zona fissurada e mais fibras estão ativas, exercendo o papel de ponte na transferência de carga entre as partes do concreto, de modo que o CMOD cresça de forma gradual e constante. Por fim, depois de vários ciclos, as fibras são arrancadas ou se rompem, levando a um aumento rápido no CMOD e redução significativa na rigidez, levando a amostra à falha [10].

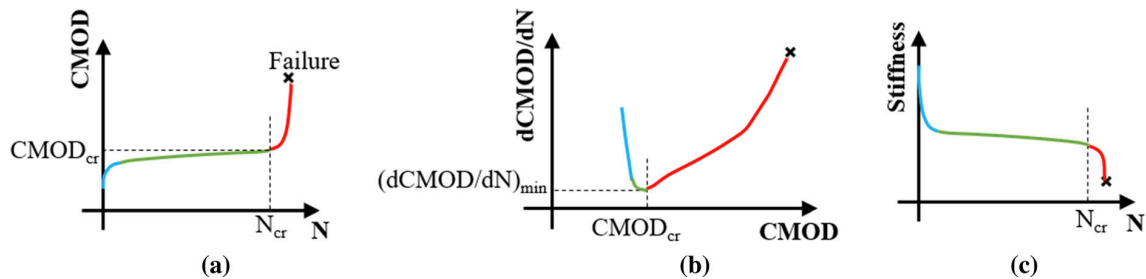


Figura 2.29 - Resposta à fadiga (a) aumento de CMOD, (b) taxa de evolução do CMOD e (c) redução da rigidez [10]

A Figura 2.30 apresenta uma evolução hipotética da zona de propagação da fissura no concreto reforçado com fibras. Tem-se na Figura 2.30(a) o início da fissura sob carregamento monotônico seguido do carregamento cíclico. Na Figura 2.30(b), as etapas correspondentes indicam em A, o entalhe a partir do qual a fissura será formada, de comprimento a_0 ; em B, quando a fissura se inicia a uma pequena abertura (CMOD = 0,5 mm), tendo seu comprimento aumentado em Δa_1 e as características de microfissuras e arrancamento das fibras; em C, o momento em que parte da carga foi removida após a etapa de pré-fissuração, havendo uma recuperação do CMOD, porém o dano causado ao concreto se mantém ($a_0 + \Delta a_1$); em D, a amostra submetida ao carregamento cíclico sob carga significativamente inferior à que causou o início da fratura, de modo que a fratura abre e fecha mas não se propaga até que a ligação fibra-matriz se deteriore e o efeito de ponte seja perdido, levando a um aumento progressivo sem grandes danos à rigidez até que a abertura crítica (CMOD_{cr}) seja alcançada; em E, uma elevada perda de resistência devido à fadiga, tal que a fissura se propaga rapidamente em direção ao colapso. Caso o carregamento de fadiga seja próximo à carga inicial, a etapa D ocorre em poucos ciclos [10].

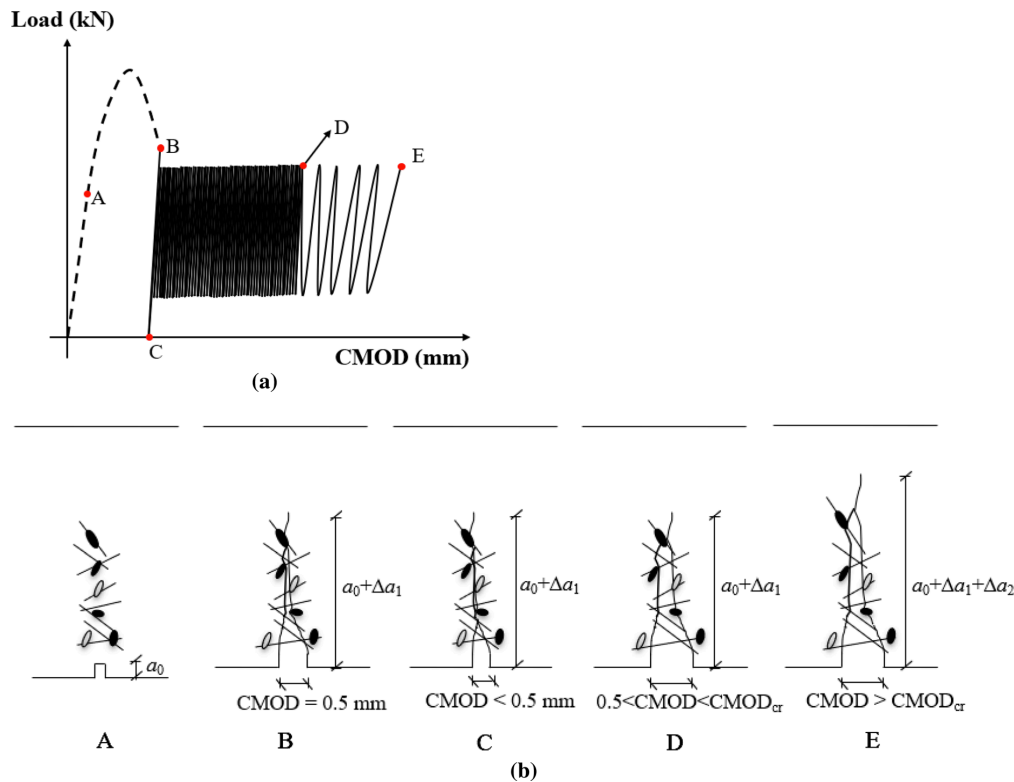


Figura 2.30 - Resposta típica da carga x CMOD e (b) evolução hipotética da zona de propagação da fissura sob carregamento cíclico [10]

Ainda, foram determinadas as curvas S-N para o concreto de acordo com as quantidades de fibras adicionadas (0, 10, 30 e 45 kg/m³). Definiu-se também as curvas em termos do ciclo correspondente ao $CMOD_{cr}$, segundo os autores, mais apropriadas para determinar os estados limites últimos, principalmente para os casos em que a abertura da fissura deve ser limitada. Os modelos indicam que a incorporação de baixas quantidades de fibras aumentam significativamente o desempenho à fadiga do concreto devido ao efeito de ponte e o retardamento da propagação das fissuras. Para maiores quantidades de fibra, os benefícios produzidos são expressivos apenas para altos níveis de carga de fadiga [10].

2.4.3. Concreto de Ultra-alto Desempenho

Chanvillard *et al.* [44] apresentaram um estudo de fadiga na flexão de duas misturas de CUAD, Ductal® FM1 e Ductal® FM2, reforçadas com fibras de aço a uma proporção de 2% em volume. Foram utilizados prismas de 100 x 100 x 400 mm, submetidos a pré-fissuração (Figura 2.31) seguida de ensaio de fadiga até aproximadamente 1.000.000 de ciclos a uma frequência de 5 Hz e com limites inferior e superior de 10% e 90%, respectivamente, da carga de primeira fissura. A

partir dos resultados, verificou-se que a abertura de fissura (CMOD) era inferior a 0,02 mm, estando assim o carregamento abaixo do limite de fadiga do material. Foram realizados ensaios estáticos ao final dos ciclos (Figura 2.32), que indicaram que o ensaio de fadiga não exerceu influência sobre o comportamento mecânico geral dos concretos, comprovando que a carga aplicada estava realmente abaixo do limite de fadiga.

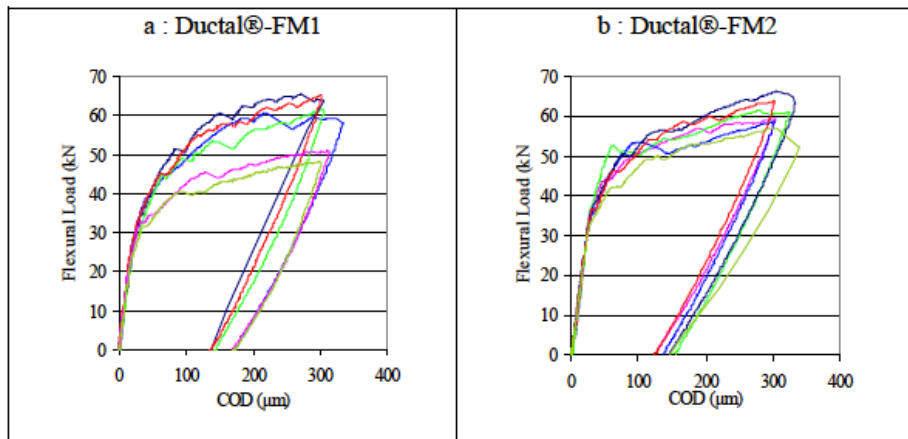


Figura 2.31 - Pré fissuração das amostras [44]

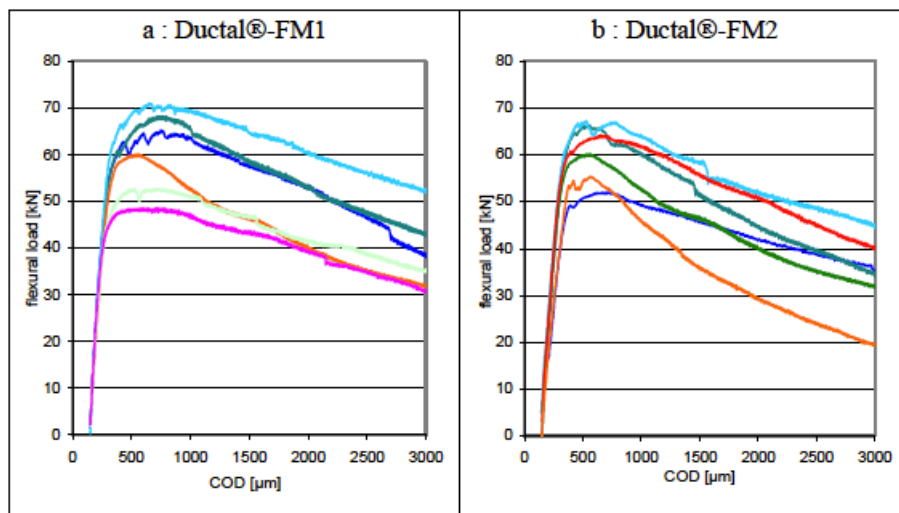


Figura 2.32 - Comportamento à flexão pós-fadiga [44]

Lappa, Braam e Walraven [15] realizaram um estudo envolvendo concretos de alto desempenho (HSFRC) e ultra-alto desempenho (BSI/CERACEM). O primeiro com 1,6% de fibras de aço de 13 mm de comprimento e diâmetro de 0,16 mm, e o segundo com 2,5% de fibras de aço de 20 mm de comprimento e 0,3 mm de diâmetro. Foram avaliadas pequenas vigas de 25 x 25 x 100 cm sob flexão em

ensaios estáticos e cíclicos com controle de carga e frequência de 10 Hz. O limite de carga máximo do ensaio de fadiga foi estabelecido em diferentes porcentagens da carga máxima obtida no ensaio estático (55%, 65%, 70%, 75% e 80%), sendo mantido em 20% o limite mínimo. As amostras foram submetidas até 10.000.000 de ciclos ou a sua ruptura.

Segundo os autores, os resultados apresentaram elevada dispersão, não sendo confiáveis para a determinação de curvas S-N. No entanto, observou-se uma relação inversa entre a inclinação do deslocamento (relativa à segunda parte do teste de fadiga em que o deslocamento aumenta de forma constante) e o número de ciclos para a falha (N), ou seja, quanto maior a inclinação, menor o N (Figura 2.33). Outra relação observada foi entre a inclinação do deslocamento e a deformação inicial, medida ao final do primeiro carregamento cíclico, indicando que menores deformações iniciais estão relacionadas a uma falha sob maior quantidade de ciclos (Figura 2.34) [15].

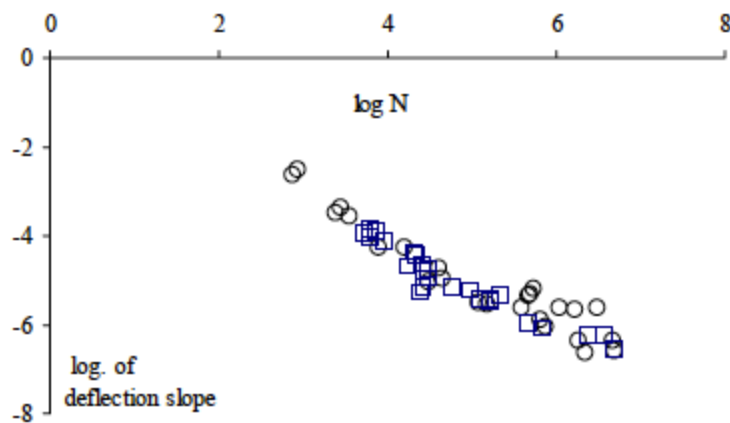


Figura 2.33 - Número de ciclos para a falha x inclinação do deslocamento [15]

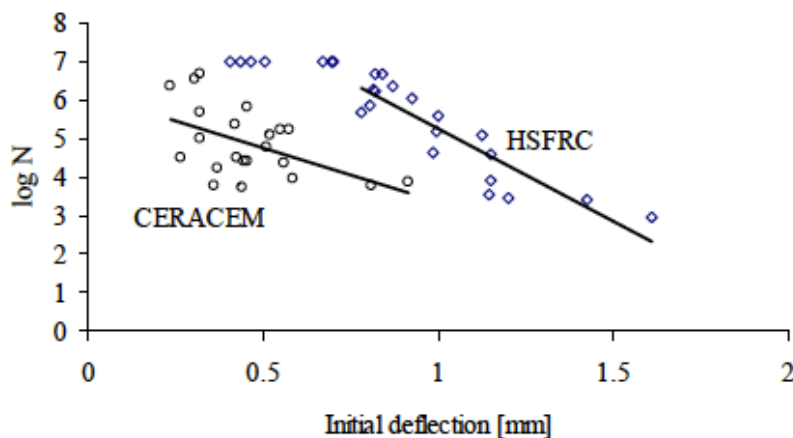


Figura 2.34 - Deslocamento inicial x número de ciclos para a falha [15]

Parant, Rossi e Boulay [16] estudaram um concreto de ultra-alto desempenho, reforçado com 11% em volume de fibras de aço de 25 mm de comprimento e extremidades com gancho, sob fadiga na flexão (4 pontos) em amostras de 600 x 200 x 40 mm a uma frequência de 2,5 Hz. Os limites máximos da carga aplicada variaram entre 77% e 103% da resistência à flexão no ensaio estático.

Os resultados apresentaram grande dispersão. Segundo os autores, a referência de carga deveria ser a resistência da própria amostra, porém, é desconhecida. Eles então propuseram estimar a vida à fadiga a partir da deformação estática inicial (ϵ_i) produzida pelo primeiro carregamento estático. Foi então estabelecida uma deformação crítica inicial, abaixo da qual as amostras não rompem até 2.000.000 de ciclos (entre $1,27 \times 10^{-3}$ e $1,44 \times 10^{-3}$) e acima da qual a ruptura é inevitável. Observou-se uma relação linear inversa entre o número de ciclos para a falha e a deformação inicial (Figura 2.35) [16].

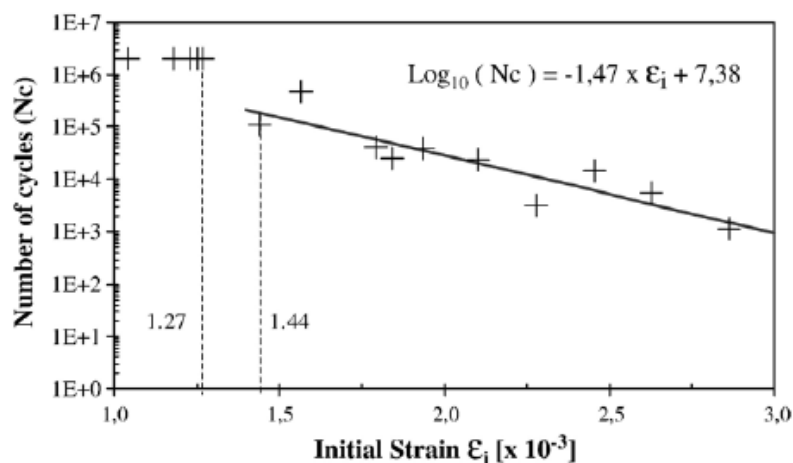


Figura 2.35 - Diagrama deformação inicial x número de ciclos na ruptura [16]

Para determinar o limite de fadiga, os autores relacionaram a deformação inicial a uma tensão correspondente por meio do comportamento estático do material. Em seguida, associaram a tensão ao número de ciclos. Utilizando o limite inferior da deformação crítica de $1,27 \times 10^{-3}$, encontrou-se uma tensão correspondente a 65% da resistência à flexão, sendo estabelecido assim o limite de fadiga. Por fim, as amostras que não romperam no ensaio de fadiga foram submetidas à flexão estática, sendo constatado um aumento na resistência [16].

Al-Azzawi e Karihaloo [49] analisaram um concreto de ultra-alto desempenho com 2,5% de fibras de aço de 30 mm de comprimento em amostras de 340 x 100 x 35 mm, submetidas a ensaios de fadiga na flexão a uma frequência de 5 Hz. Os limites de carga máximo foram estabelecidos em três porcentagens da resistência à flexão obtida no ensaio monotônico, sendo 64,62%, 72,70% e 88,85%, enquanto o limite mínimo foi fixado em 9,69% da resistência. As amostras foram ensaiadas até a falha ou até 1.000.000 de ciclos. Os resultados (Figura 2.36) indicam uma redução da vida à fadiga com o aumento do limite máximo aplicado, sendo que para 64,62% não houve ruptura, chegando uma amostra a sustentar 2.000.000 de ciclos. Observou-se certa dispersão nos resultados para o mesmo limite de carga, justificado pela presença de defeitos internos, como a ausência de fibras na seção transversal das amostras identificada pelos autores.

Stress amplitude range (%)	Load amplitude range (kN)	Fatigue life (cycles)		
		N1	N2	N3
9.69–64.62	0.6–4.0	>1,000,000	>1,000,000	>2,000,000
9.69–72.70	0.6–4.5	99,000	87,600	—
9.69–88.85	0.6–5.5	25,200	5,400	—

Figura 2.36 - Número de ciclos sustentados pelas amostras [49]

Devido à sensibilidade da fluidez do concreto autoadensável às condições ambientes de temperatura e umidade, os testes foram refeitos medindo-se o espalhamento a cada moldagem. Segundo os resultados, todas as amostras sustentaram 1.000.000 de ciclos, sendo também constatada uma distribuição uniforme das fibras nas amostras ensaiadas [49].

Krahl, Carrazedo e El Debs [12] realizaram um estudo de um concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras de aço de 13 mm de comprimento e 0,2 mm de diâmetro sob flexão cíclica em prismas de 150 x 150 x 500 mm. Os testes foram feitos sob controle de deslocamento. Para o estágio de múltipla fissuração, o descarregamento era feito a cada 0,05 mm, enquanto no estágio de *softening*, após a formação da microfissura, aplicava-se um ciclo a cada 0,5 mm (Figura 2.37).

A degradação das amostras foi avaliada pelo índice de dano D_g , igual a $1 - K_i/K_0$, sendo K_0 correspondente à rigidez inicial do elemento e K_i a rigidez atual (Figura 2.38). Para o primeiro ciclo, os índices médios de dano observados para 1%

e 2% de fibras foram de 0,42 e 0,47, respectivamente. De acordo com os autores, o aumento vigoroso do dano pode ser associado ao efeito de tração na formação das fissuras, que é instável. Ainda, o maior dano inicial relacionado à maior fração volumétrica de fibras pode ser justificado pela conseqüente presença de mais poros e microfissuras no material. No entanto, o aumento do dano é mais intenso para as amostras de menor fração volumétrica de fibras, atribuído à menor capacidade das fibras em formar pontes entre as fissuras e retardar a abertura da fissura, ou seja, quanto maior a quantidade de fibras, mais lentamente o dano se desenvolve no material [12].

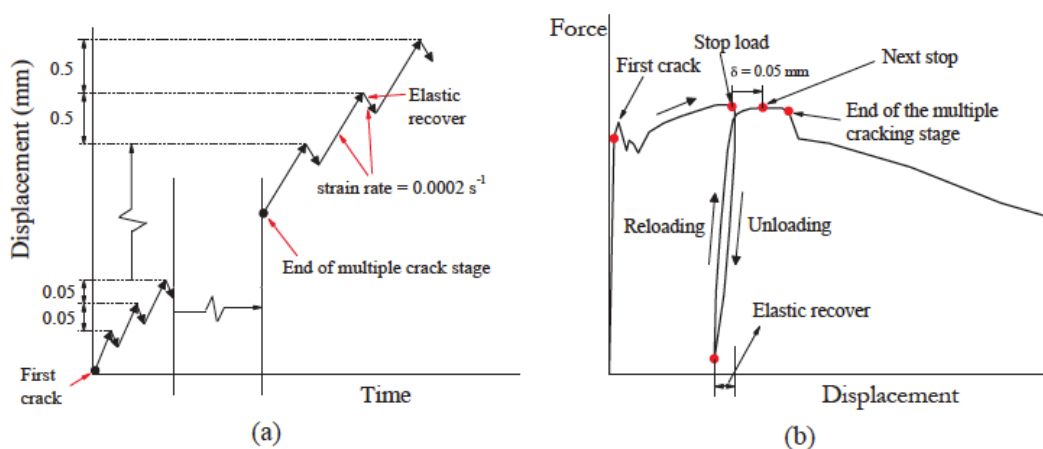


Figura 2.37 - Procedimento para o carregamento cíclico na flexão

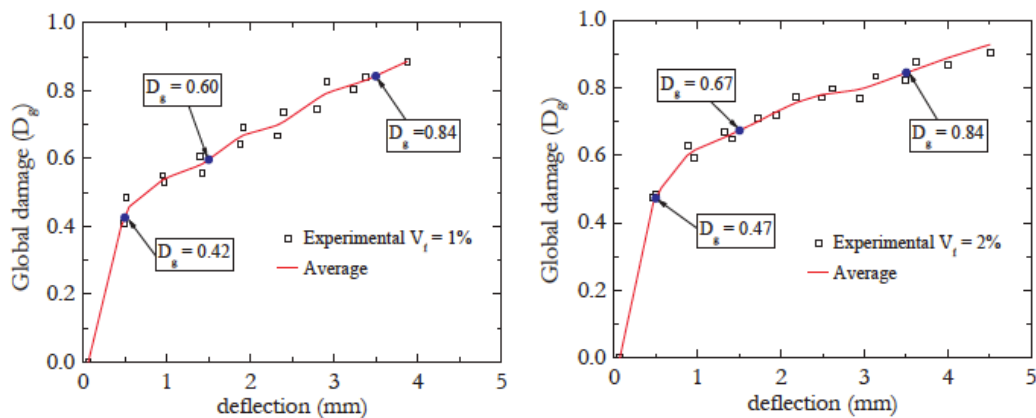


Figura 2.38 - Evolução do dano global para diferentes frações volumétricas [12]

Niu *et al.* [11] apresentaram um estudo sobre um concreto de ultra-alto desempenho reforçado com fibras de aço de 13 mm de comprimento e 0,20 mm de diâmetro nas frações volumétricas (SF) de 0,5%, 1%, 1,5% e 2%, submetido a

ensaios de fadiga na flexão em prismas de 100 x 100 x 400 mm. A frequência utilizada foi de 8 Hz, sendo o limite superior de carga (S) igual a uma porcentagem da resistência obtida nos ensaios estáticos (80%, 75%, 70% e 65%) e o limite inferior igual a 10% do limite superior. Os ensaios foram realizados até a ruptura das amostras ou o limite de 2.000.000 de ciclos. O enfoque do trabalho foi avaliar através de correlação de imagem digital (DIC, do inglês *digital image correlation*) a evolução da abertura de fissura, da deformação na ponta da fissura e do comprimento de propagação da fissura.

A partir dos resultados, verificou-se que, para um mesmo nível de tensão, a vida à fadiga aumenta com o aumento da fração volumétrica de fibras. Foram identificados três estágios de propagação na relação entre CMOD máximo de cada ciclo e o número de ciclos: I) desenvolvimento rápido, II) desenvolvimento estável e III) falha, responsáveis por, respectivamente, 5-10%, 70-85% e 10-20% da vida em fadiga do concreto (Figura 2.39). Assim, verifica-se que a falha começa entre 80% e 90% da vida em fadiga [11].

Em relação ao comprimento da trinca, ela se propagou de forma rápida nos estágios iniciais, atingindo então um estado estacionário e por fim uma evolução súbita. Estabeleceu-se o limite do estado estacionário em 20 mm para 0,5% de fibras e 60 mm para as demais frações. Outro parâmetro analisado foi a taxa de propagação da trinca durante o desenvolvimento estável (estágio II), que foi maior para maiores níveis de tensão e para menores frações volumétricas de fibra [11].

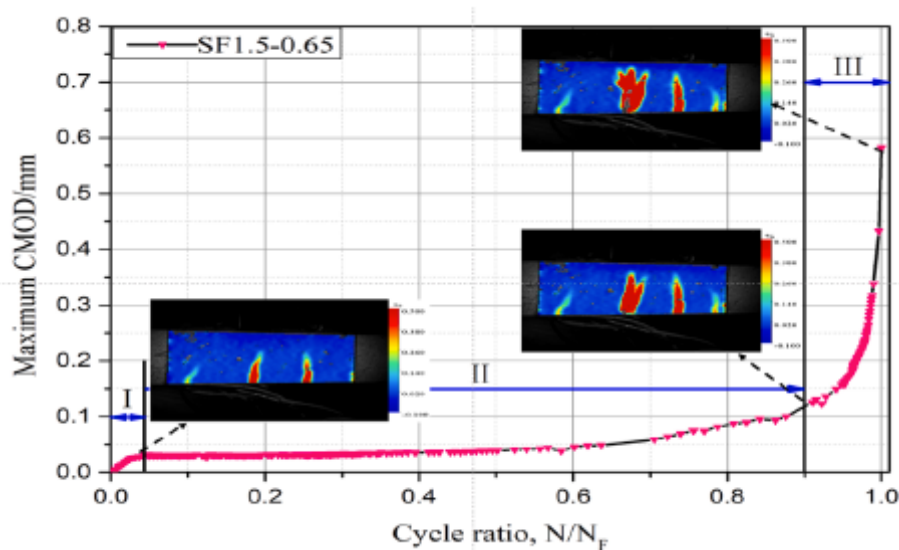


Figura 2.39 - Morfologia das trincas após cada estágio de propagação durante o carregamento cíclico da amostra SF1.5 (S = 0,65) [11]

2.4.4. Aspectos Conclusivos

Como pode ser observado, existe ainda uma quantidade limitada de estudos na literatura acerca do concreto de ultra-alto desempenho sob fadiga na flexão. Assim, fez-se necessário buscar referências de concretos reforçados com fibras e também concretos de alto desempenho para complementar a visão e o entendimento do fenômeno.

A partir dos estudos apresentados, é possível concluir que a incorporação de fibras no concreto aumenta a carga de primeira fissura [19] e melhora seu desempenho à fadiga, aumentando a ductilidade [17, 20] e o limite de fadiga [8, 17–20]. Com as fibras, é possível obter um maior controle da abertura de fissuras, reduzindo o crescimento de CMOD [10]. Percebe-se também um aumento da energia acumulada [8, 17] e do deslocamento reversível [17].

Em relação à quantidade de fibras, foram encontradas informações divergentes, porém relativas aos diferentes tipos de concreto. Para o concreto de ultra-alto desempenho, sugere-se que o aumento da fração volumétrica faz com que o dano se desenvolva mais lentamente devido à maior capacidade das fibras em formar pontes [12], proporcionando também uma redução na propagação das trincas e conseqüentemente um aumento do comprimento de propagação estável [11]. Por outro lado, para o concreto reforçado com fibras, o desempenho à fadiga foi melhor para menores proporções de fibra (0,5% em volume), sugerindo que um aumento da quantidade de fibras aumenta a presença de danos inerentes ao material e esse efeito se sobrepõe aos benefícios associados às fibras [8], proporcionando menor vida à fadiga [10]. Apesar disso, para limites maiores no carregamento cíclico, um aumento da fração volumétrica se mostrou vantajoso [10].

Outros fatores relacionados às fibras que influenciam o comportamento do concreto são a orientação [17], o uso combinado de diferentes fibras, que pode melhorar o desempenho do material [14], e o tipo de fibra, sugerindo que as que possuem extremidades com gancho apresentam melhor desempenho [18]. Em relação à razão de aspecto (RA), inferiu-se que quanto maior a propriedade, maior é o limite de fadiga [18, 19] e o deslocamento reversível [17], porém também foi verificado que a mesma não influenciou a energia acumulada [17] ou o desempenho do material [14].

Sobre os limites de carga impostos ao carregamento de fadiga, verificou-se para o concreto de ultra-alto desempenho que a propagação da trinca é maior para maiores limites [11]. No caso do concreto reforçado com fibras e de alto desempenho, foram observados para maiores percentuais de carga menores valores de ciclos até a falha (N) [9, 18], bem como a ocorrência de falhas mais frágeis para menores níveis de tensão [9]. Outro parâmetro que aumenta para maiores tensões é a abertura de fissura crítica ($CMOD_{cr}$), a partir da qual a evolução ocorre de maneira súbita até a ruptura [10].

Diferentes parâmetros foram utilizados para avaliar a vida à fadiga. Para o concreto de ultra-alto desempenho, verificou-se que menores deslocamentos iniciais levam a maiores valores de N [15], assim como menores deformações aumentam a vida à fadiga [16]. Analisando o deslocamento em função do número de ciclos, ele cresce de maneira praticamente constante na segunda fase e quanto menor a inclinação desse trecho, maior a vida à fadiga da amostra [15]. Em relação à evolução do dano em função do deslocamento, a inclinação é maior para menores quantidades de fibra [12]. No caso do concreto reforçado com fibras e de alto desempenho, a variação do deslocamento em função do número de ciclos aumenta com o passar dos ciclos [14], assim como a evolução do CMOD, sendo mais inclinada para maiores porcentagens de carga [9, 10].

Alguns autores estabeleceram o limite de fadiga na flexão do concreto de alto desempenho (CAD) e ultra-alto desempenho em torno de 65% [9, 14, 16]. A Tabela 2.2 apresenta resumidamente os resultados dos estudos considerando o tipo de concreto, o referencial de carga, o limite mínimo de carregamento, a frequência utilizada e o limite de fadiga. É possível observar uma variabilidade nos parâmetros adotados, porém resultando em um limite semelhante para dos diferentes concretos analisados. Considerando amostras que sobreviveram aos ensaios de fadiga até um número de ciclos da ordem de 10^6 , foi constatado um aumento na resistência residual à flexão [9, 14, 16, 18, 44].

Por fim, diversos autores identificaram grande dispersão nos resultados dos ensaios de fadiga [8, 9, 13–16, 18, 49] independente do referencial de carga adotado, sendo a resistência média obtida com os ensaios estáticos ou a resistência da própria amostra em ensaios de pré-fissuração, que poderiam hipoteticamente reduzir a dispersão. Uma medida que reduziu a dispersão dos resultados foi a

aferição do espalhamento em cada concretagem, uma vez que para concretos autoadensáveis o concreto é mais suscetível a mudanças ambientes de temperatura e umidade, podendo influenciar o seu desempenho [49].

Tabela 2.2 - Parâmetros e limite de fadiga para diferentes concretos estudados

Estudo	Tipo de Concreto	Carga Referência	Limite mínimo (%)	Frequência de Carregamento (Hz)	Limite de Fadiga (%)
Carlesso, De la Fuente e Pialarissi-Cavalaro [9]	CAD	$P_{0,5mm}$ (pré-fissuração)	19,8	6	66
Naaman e Hammoud [14]	CAD	P_{MOR} (ensaio estático)	10	20	65
Parant, Rossi e Boulay [16]	CUAD	P_{MOR} (ensaio estático)	6,5	2,5	65

3. Programa Experimental

3.1. Introdução

O programa experimental deste trabalho foi desenvolvido em duas fases. Na primeira fase obteve-se o espalhamento, resistência à compressão, módulo de elasticidade e comportamento à flexão do material com o intuito de caracterizar o concreto de ultra-alto desempenho utilizado. Na segunda fase, executou-se os ensaios de fadiga, os quais permitiram analisar o comportamento do material em termos da variação da abertura de fissura e da degradação mecânica ao longo dos ciclos, possibilitando compreender a degradação em função da retenção de rigidez. Isso levou ao estabelecimento de limites para a ruptura do concreto sob fadiga e equações que relacionam o nível máximo de tensão com o número de ciclos para a ruptura, sendo possível determinar o limite de fadiga do CUAD. O comportamento pós-fadiga das amostras que não romperam após 1.000.000 de ciclos também foi avaliado.

3.2. Descrição do Programa

3.2.1. Materiais e Dosagem

O traço do concreto de ultra-alto desempenho adotado neste trabalho foi desenvolvido por Lima [50]. O cimento utilizado na produção do concreto foi o cimento CPV-ARI-RS da fabricante Votorantim Cimentos, cujos parâmetros dos lotes recebidos estavam em conformidade com as condições especificadas na norma NBR 16697 [51]. O agregado miúdo de areia natural utilizado é caracterizado pelo material passante da peneira de 1,18 mm, com distribuição granulométrica apresentada na Figura 3.1 e módulo de finura igual a 2,04, segundo a norma NBR NM 248 [52].

Para as adições, utilizou-se pó de quartzo (sílica #325) e sílica ativa, cujas propriedades químicas são apresentadas na Tabela 3.1. Segundo as informações fornecidas pelos fabricantes, os materiais atendem às especificações mínimas estabelecidas na NBR 12653 [53]. A distribuição granulométrica das adições foi

obtida a partir do equipamento de CILAS 1190 da PUC-Rio e pode ser observada na Figura 3.2.

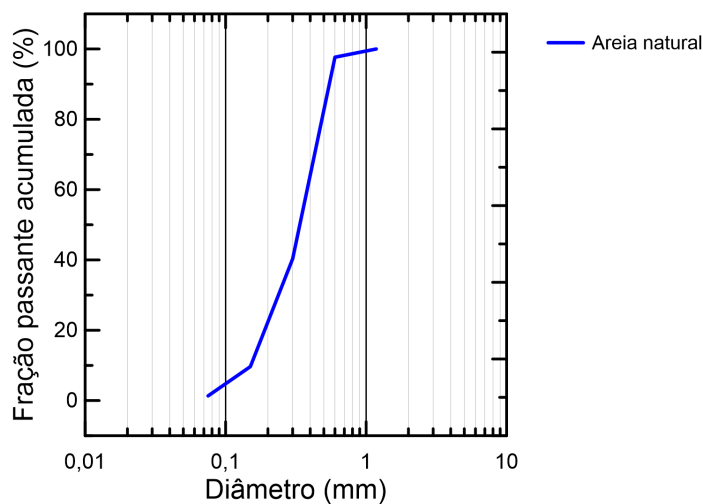


Figura 3.1 - Granulometria areia natural

Tabela 3.1 - Propriedades químicas - pó de quartzo e sílica ativa

Propriedades	Sílica #325	Sílica ativa
Fabricante	<i>Céramus</i>	<i>Tecnosil</i>
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	99,67%	≥ 94,7%
SO ₃ (%)	-	-
Teor de umidade (%)	0,20%	0,38%
Perda ao fogo (%)	-	1,45%
Álcalis disponíveis	-	1,18%

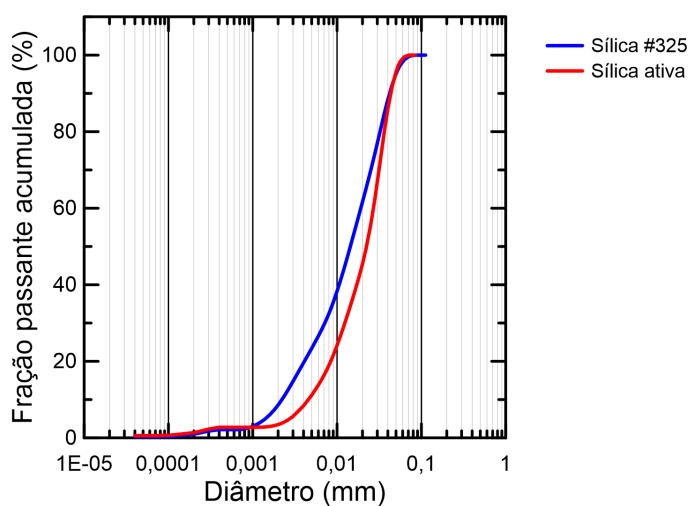


Figura 3.2 - Granulometria - pó de quartzo e sílica ativa

O baixo fator água cimento, igual a 0,17 e característico dos concretos de ultra-alto desempenho, demanda a utilização de aditivos superplastificantes, capazes de conferir maior fluidez e trabalhabilidade ao concreto sem comprometer a sua resistência [2]. Utilizou-se, portanto, o MasterGlenium 51, produzido pela fabricante MBCC Group Brasil, que possui uma estrutura química com polímeros de éter policarboxílico de largas cadeias, densidade de 1,20 g/cm³ e 32% de sólidos em sua composição. Suas especificações atendem aos requisitos da norma NBR 11768 [54].

Por fim, foram incorporadas fibras de aço retas (Figura 3.3) da fabricante Bekaert. As fibras possuem comprimento (L_f) igual a 13 mm, diâmetro (d_f) de 0,20 mm e razão de aspecto 65, massa específica de 7,8 g/cm³, resistência à tração de 3000 MPa e módulo de elasticidade igual a 210 GPa. A composição do concreto encontra-se na Tabela 3.2.



Figura 3.3 - Fibras de aço

Tabela 3.2 - Composição do concreto de ultra-alto desempenho [50]

Insumo	Quantidade (kg/m ³)
Cimento	1011
Areia	883
Sílica ativa	58
Pó de quartzo (sílica #325)	80
Água	175,5
Superplastificante	50
Fibra de aço	160

3.2.2. Procedimento de Mistura

Para a produção do concreto de ultra-alto desempenho utilizou-se um misturador planetário com capacidade de 30 l, seguindo-se o seguinte procedimento de mistura:

- Adição dos materiais secos (agregados e aglomerantes) no tambor de mistura previamente saturado, seguida de mistura por 1 minuto;
- Adição de 50% da água e do superplastificante, seguida de mistura por 8 minutos;
- Adição dos 50% restantes de água e superplastificante, seguida de mistura por 12 minutos;
- Incorporação das fibras, lentamente, seguida de mistura por mais 3 minutos, até que o material apresentasse aparência homogênea.

3.2.3. Preparo e moldagem das amostras

Para os ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade foram moldados três cilindros de 100 mm de altura e 50 mm de diâmetro. No caso dos ensaios de flexão monotônico e cíclico, foram moldados três prismas de 400 mm x 100 mm x 100 mm, considerando, para o último, o mesmo número de amostras por faixa de carregamento máximo (90%, 80%, 70% e 50%). A Tabela 3.3 apresenta a quantidade de amostras por ensaio.

Tabela 3.3 - Quantidade de amostras por ensaio

Ensaio	Número de Amostras
Compressão	3
Flexão monotônico	3
Flexão cíclico - 90%	3
Flexão cíclico - 80%	3
Flexão cíclico - 70%	3
Flexão cíclico - 50%	3

No preparo das amostras, foram utilizadas formas metálicas previamente preparadas com desmoldante Desmoltec 25, fabricado pela *GCP Applied Technologies*, sendo utilizado para facilitar a desmoldagem e preservar a integridade dos corpos de prova. Após preenchidas pelo concreto de ultra-alto desempenho, com característica autoadensável, as formas eram protegidas por um plástico filme para evitar a perda de água pelo material para o ambiente nas primeiras 24h. Ao fim desse período, as amostras eram desmoldadas, identificadas e colocadas em câmara úmida até atingir a idade de 28 dias, quando então os cilindros eram faceados para retificar as superfícies, tornando-as uniformes e adequadas para a execução dos ensaios de compressão. Todos os ensaios foram realizados com 28 dias de cura, sendo os ensaios de fadiga executados em 30 ± 2 dias.

3.2.4. Ensaios de Caracterização

3.2.4.1. Espalhamento

O ensaio de espalhamento foi realizado de acordo com as normas NBR 15823-1 [55] e 15823-2 [56] para concreto autoadensável. Para tal, utilizou-se o cone de Abrams invertido posicionado sobre uma placa metálica, ambos previamente umedecidos. Preencheu-se o cone com o concreto fresco, removendo-se o molde lentamente na direção vertical para que o concreto pudesse escoar pela placa. Estabilizado o escoamento, mediu-se o espalhamento a partir da média de duas medidas perpendiculares do diâmetro do concreto após a liberação do material do cone de Abrams. Avaliou-se também a estabilidade do concreto, relacionada à

distribuição dos agregados e à ocorrência de exsudação ao longo do perímetro do material após o término do escoamento. A Figura 3.4 apresenta os detalhes da montagem do ensaio.

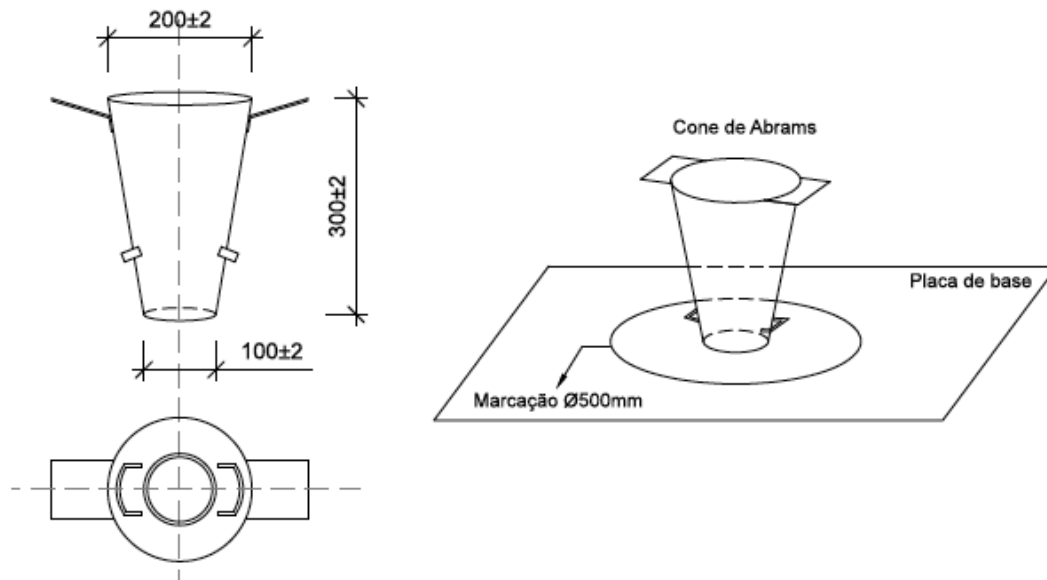


Figura 3.4 - Dimensões (em mm) do cone de Abrams e detalhe do ensaio de espalhamento [57]

3.2.4.2. Comportamento Mecânico sob Compressão e Módulo de Elasticidade

Os ensaios para determinação da resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto de ultra-alto desempenho foram realizados de acordo com as normas NBR 5739 [58] e NBR 8522 [59], respectivamente. Utilizou-se um equipamento universal de ensaios mecânicos MTS, modelo 810/500, com capacidade de carga de 500 kN. Para determinar a resistência à compressão, definida pela razão entre a carga máxima aplicada e a área da seção transversal do corpo de prova, utilizou-se o controle de força a uma taxa de 0,6 kN/s. Para a determinação do módulo de elasticidade, correspondente ao coeficiente angular da curva tensão vs. deformação em seu trecho inicial (até 30% da tensão máxima), foram utilizados dois transdutores de deslocamento verticais (*Linear Variable Differential Transformer* - LVDT) para aferição da deformação durante a aplicação do carregamento, conforme ilustrado na Figura 3.5.

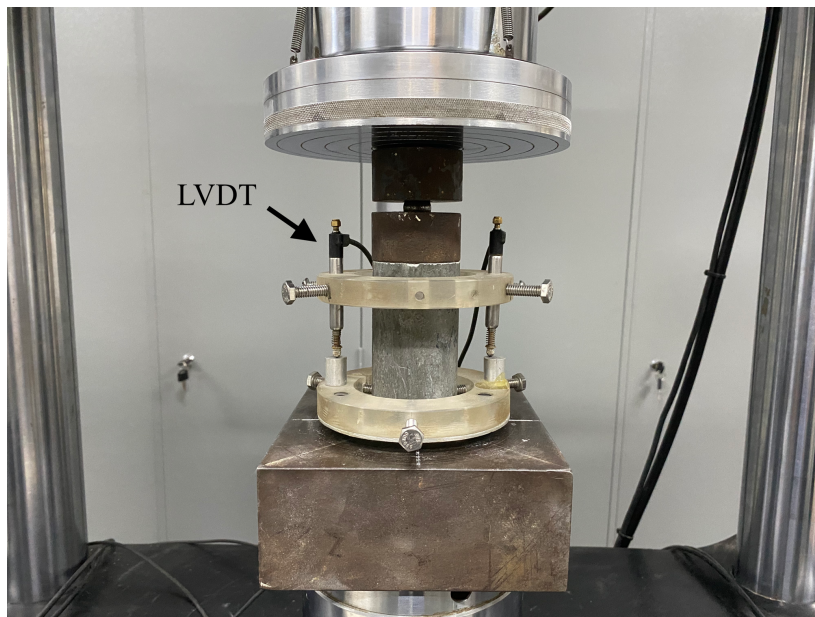


Figura 3.5 - Detalhes da montagem do ensaio de compressão

3.2.4.3. Comportamento Mecânico sob Flexão

Os ensaios de flexão de três pontos do concreto de ultra-alto desempenho foram realizados aos 28 dias segundo a norma EN 14651 [43], semelhante à norma brasileira NBR 16940 [60]. Com o auxílio de uma serra diamantada de espessura igual a 3 mm, fez-se um entalhe de 15 mm no centro da face inferior de cada amostra, na direção do ponto de aplicação de carga. Adotou-se um recuo de 25 mm a partir das extremidades para a delimitação dos apoios, formando-se um vão de 350 mm.

O equipamento utilizado no ensaio foi um atuador hidráulico MTS, com controle de loop fechado e célula de carga com capacidade de 100 kN. Os testes foram controlados pela abertura de fissura, CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*), com o auxílio de um clip-gauge e a uma taxa constante de 0,05 mm/min, até atingir 0,10 mm, seguida de uma taxa de 0,20 mm/min até atingir a abertura de 4 mm de CMOD. A Figura 3.6 apresenta as dimensões e detalhes do ensaio e a Figura 3.7 o ensaio em execução.

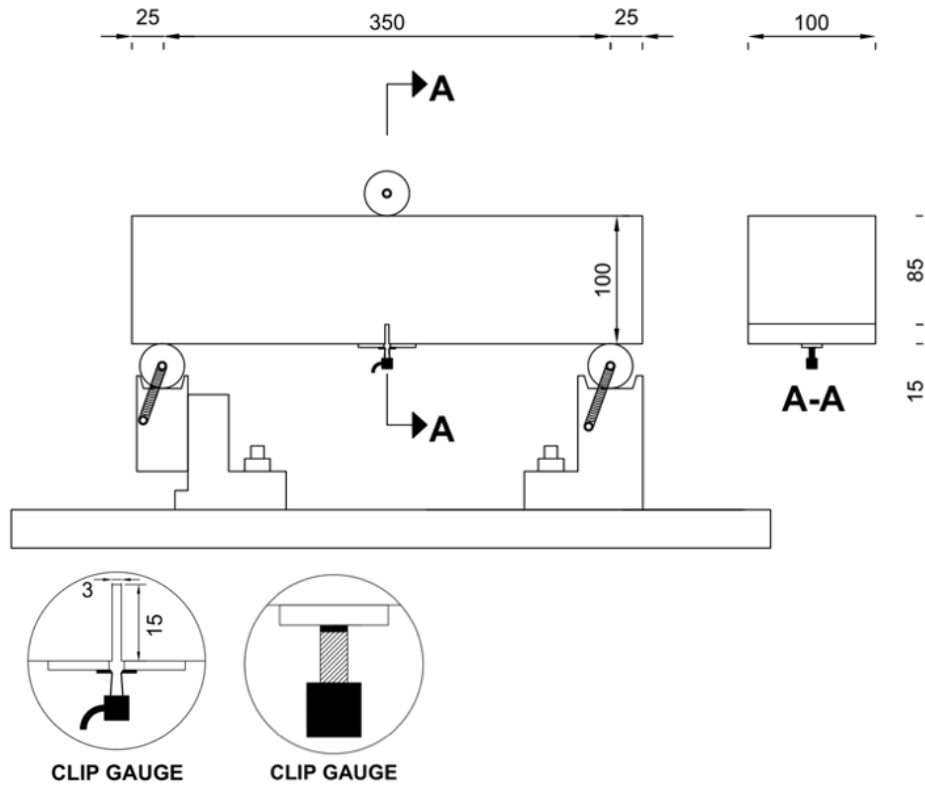


Figura 3.6 - Detalhes da montagem do ensaio de flexão

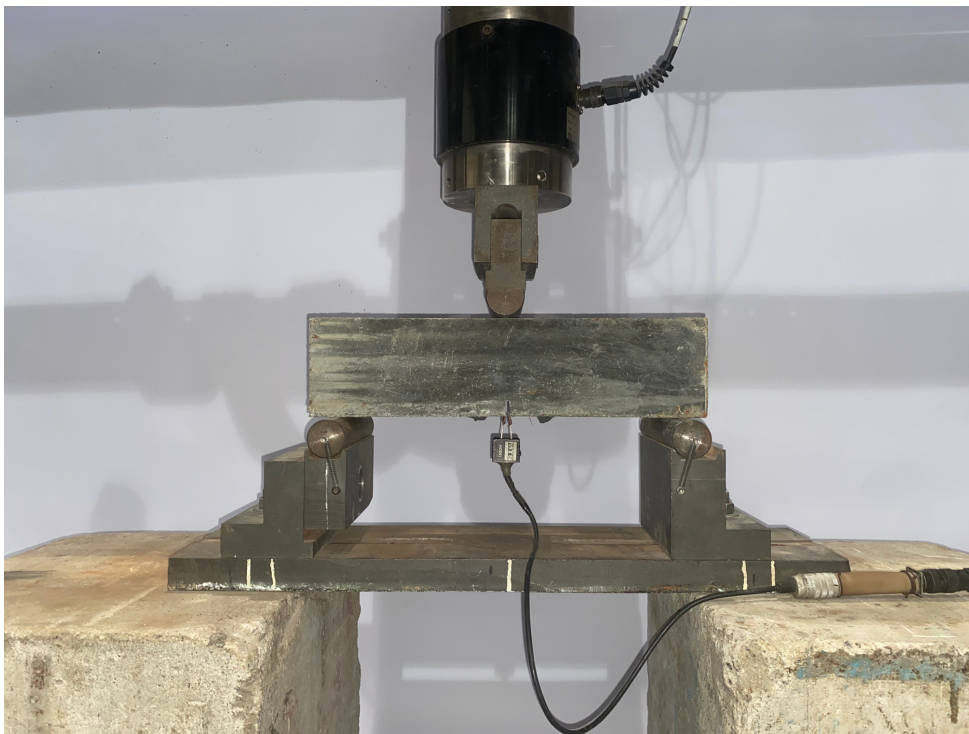


Figura 3.7 - Ensaio de flexão em execução

3.2.5. Ensaios de Fadiga na Flexão

Os ensaios de fadiga na flexão foram realizados seguindo a mesma configuração dos ensaios de flexão monotônicos, previamente apresentada. Inicialmente, as amostras foram submetidas a uma pré-fissuração, correspondente a 0,5 mm de CMOD, que caracteriza o estado limite de serviço [61]. Para tal, utilizou-se uma taxa de abertura de fissura de 0,05 mm/min até a abertura correspondente a 0,1 mm, seguida de uma taxa de 0,2 mm/min até a abertura de 0,5 mm. O valor da tensão correspondente a essa abertura ($f_{R,1}$) foi utilizado como referência na definição dos valores máximo e mínimo aplicados à respectiva amostra no carregamento cíclico. Foram estabelecidos os limites máximos ($f_{máx}$) em 90%, 80%, 70% e 50% de $f_{R,1}$, adotando-se em todos os casos o limite mínimo ($f_{mín}$) igual a 30% de $f_{máx}$. Para cada tensão ($f_{R,1}$, $f_{máx}$ e $f_{mín}$), tomou-se a carga correspondente ($P_{R,1}$, $P_{máx}$ e $P_{mín}$).

Determinadas as cargas máxima e mínima às quais a amostra seria submetida, continuou-se o ensaio de fadiga, carregando a amostra até $P_{méd}$ (tensão correspondente $f_{méd}$), igual à média entre $P_{máx}$ e $P_{mín}$, mantendo-se a carga por 5 segundos e em seguida iniciando o carregamento cíclico. A literatura apresenta valores de frequência para torres eólicas entre 4,5 e 150 Hz, considerando-se as quatro primeiras frequências naturais. Como parte do projeto PD-0394-1905/2019 (Furnas – PUC-Rio): “*Determinação de parâmetros para Ensaios Mecânicos do Concreto Reforçado com Fibras (CRF) sob Condições Extremas de Carregamento em Empreendimentos de Geração Hidrelétrica e Eólica*”, adotou-se a frequência de 6 Hz nesta pesquisa, considerando-se um valor mais próximo das frequências naturais observadas em problemas de engenharia civil. O ensaio era finalizado quando a abertura de fissura atingisse 4,0 mm, indicando a sua ruptura, ou ao final de 10^6 ciclos. As amostras que não romperam ao final dos 10^6 ciclos foram submetidas ao ensaio de flexão estático pós-fadiga, a uma taxa de deslocamento constante igual a 0,2 mm/min. A aquisição de dados se deu a uma frequência de 1024 Hz, sendo registrados os dez primeiros ciclos, os ciclos múltiplos de 200 e os últimos trinta ciclos. Os procedimentos de ensaio podem ser observados nas Figuras 3.8 e 3.9.

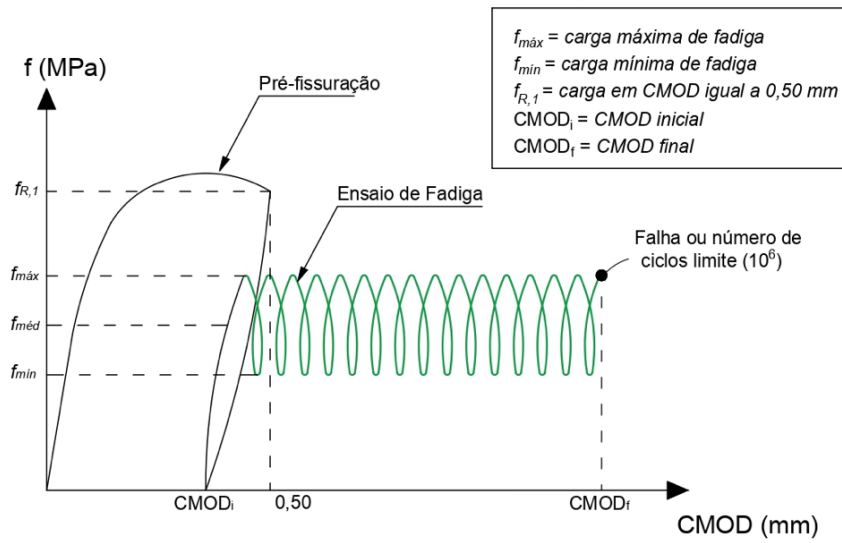


Figura 3.8 - Procedimentos do ensaio de fadiga na flexão - Amostras que romperam

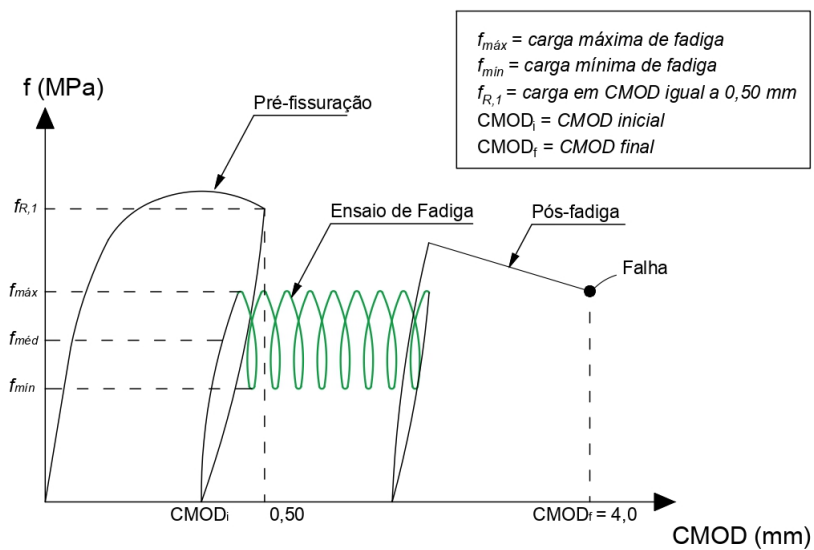


Figura 3.9 - Procedimentos do ensaio de fadiga na flexão - Amostras que não romperam

4. Resultados e Análises

4.1. Ensaios de Caracterização

4.1.1. Espalhamento

O concreto apresentou um espalhamento de 945 mm e aparência homogênea, indicando boa distribuição das fibras e ausência de segregação ou exsudação. Os detalhes da execução do ensaio podem ser observados na Figura 4.1. Verificou-se um aumento de 27,7% no espalhamento comparando ao resultado obtido por Lima [50], que utilizou o mesmo traço para o concreto. Tal diferença pode ser atribuída a divergências no procedimento de mistura e no tipo de equipamento utilizado, além da influência das condições ambientais de temperatura e umidade [49].



Figura 4.1 - Ensaio de espalhamento (a) montagem (b) resultado

4.1.2. Comportamento Mecânico sob Compressão e Módulo de Elasticidade

As curvas Tensão vs. Deformação para as amostras ensaiadas podem ser observadas na Figura 4.2. Na Figura 4.3 visualiza-se o plano de ruptura das amostras ao final do ensaio, i.e. ruptura em um plano de cisalhamento. Os valores de resistência e módulo de elasticidade encontram-se dispostos na Tabela 4.1.

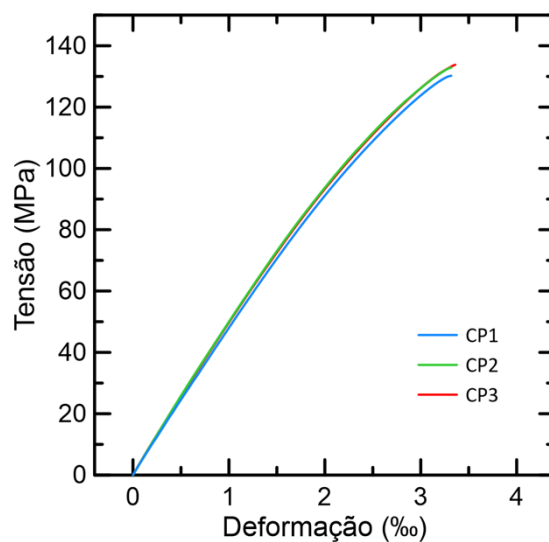


Figura 4.2 - Ensaio de compressão do CUAD - Curvas tensão x deformação



Figura 4.3 - Corpos de prova após a ruptura sob compressão axial

Tabela 4.1 - Resistência à compressão e módulo de elasticidade do CUAD

Amostra	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
CP1	130,2	48,0
CP2	132,9	50,6
CP3	133,8	50,0
Média	132,3	49,5
Desvio Padrão	1,9	1,4

A média obtida para a resistência à compressão e o módulo de elasticidade foi, respectivamente, 7% menor e 28% maior em relação aos resultados apresentados em [50]. As divergências podem ser justificadas pela diferença entre os fabricantes de cimento e sílica ativa utilizados, o que pode influenciar a microestrutura do material.

4.1.3. Comportamento Mecânico sob Flexão

A Figura 4.4 apresenta as curvas Tensão vs. CMOD relativas ao comportamento do concreto de ultra-alto desempenho sob flexão. Tal comportamento é também representado pelos parâmetros de resistência segundo EN 14651 [43] indicados na Tabela 4.2, que apresenta a carga e a tensão no limite de proporcionalidade (P_{LOP} e σ_{LOP}), a carga, a tensão e o CMOD correspondentes ao módulo de ruptura (P_{MOR} , σ_{MOR} e $CMOD_{MOR}$), as resistências residuais ($f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ e $f_{R,4}$) e a razão entre $f_{R,3}$ e $f_{R,1}$.

A Figura 4.5 apresenta a amostra CP3 ao término do ensaio, indicando que apesar de haver formação de múltiplas fissuras, a ruptura se deu com a propagação de uma microfissura. A seção transversal da amostra CP3 após o término do ensaio pode ser visualizada na Figura 4.6, onde verifica-se que a ruptura se deu predominantemente devido ao arrancamento das fibras.

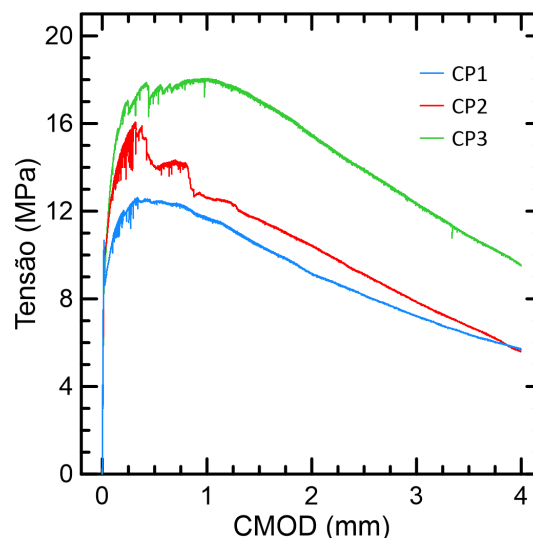


Figura 4.4 - Resposta no ensaio de flexão - Curvas tensão x CMOD

Tabela 4.2 - Parâmetros de resistência à flexão do CUAD

Amostra	P_{LOP} (kN)	σ_{LOP} (MPa)	P_{MOR} (kN)	σ_{MOR} (MPa)	$CMOD_{MOR}$ (mm)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	$f_{R,3}/f_{R,1}$ -
CP1	14,28	10,68	16,88	12,62	0,34	12,42	10,46	8,16	6,36	0,66
CP2	15,71	11,04	22,86	16,07	0,32	14,07	11,59	9,10	6,72	0,65
CP3	15,26	11,35	24,27	18,06	0,98	17,44	16,94	13,92	10,84	0,80
Média	15,08	11,02	21,34	15,58	0,54	14,65	13,00	10,40	7,98	0,70
Desvio Padrão	0,73	0,34	3,92	2,75	0,37	2,56	3,46	3,09	2,49	0,08

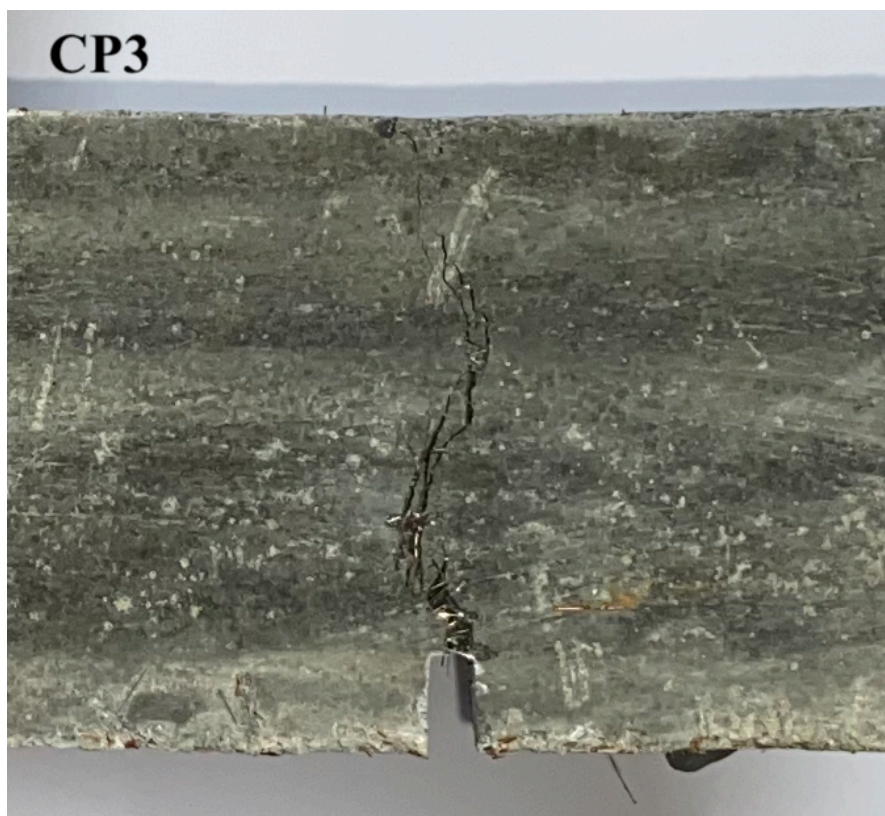


Figura 4.5 - Amostra CP3 após o ensaio de flexão de três pontos



Figura 4.6 - Seção transversal após ensaio de flexão de três pontos - Amostra CP3

A partir dos resultados, observa-se que um comportamento característico de *deflection hardening*. A variação mais expressiva no comportamento do material após o seu limite de proporcionalidade, quando o comportamento do material deixa de ser elástico, pode ser atribuída à variabilidade da distribuição e orientação das fibras na seção transversal. O efeito de ponte das fibras contribui ativamente para o controle da abertura da fissura e, conseqüentemente, para a resistência do concreto submetido à flexão, que irá sofrer variações conforme a quantidade de fibras atuando na seção e a aderência das mesmas à matriz. O resultado obtido por [50] para a resistência à flexão média (σ_{MOR}) foi 23,5% menor. Tal diferença pode ser justificada pela aquisição de cimento e sílica ativa de fabricantes distintos: composições distintas influenciam a microestrutura e resistência do material.

4.2. Ensaios de Fadiga na Flexão

A Tabela 4.3 apresenta de forma resumida os resultados dos ensaios de fadiga na flexão, indicando: carga ($P_{0,5\text{mm}}$) e resistência residual ($f_{R,I}$), obtidas na etapa de pré-fissuração da amostra; limites de carga máximo ($P_{\text{máx}}$) e mínimo ($P_{\text{mín}}$) para o ensaio de fadiga; número de ciclos percorridos por cada amostra (N); valores da abertura de fissura inicial (CMOD_i) e final (CMOD_f), bem como sua variação (ΔCMOD); e a rigidez inicial (k_0). Observa-se que a ruptura ocorreu apenas para amostras submetidas aos limites superiores de 80% e 90% de $f_{R,I}$, com exceção da amostra 80-CP1, que, como as demais, suportou 1.000.000 de ciclos. Ainda, constata-se que quanto maior o limite de carga, menor o número de ciclos para a ruptura, como concluíram outros autores em pesquisas anteriores [9–11, 18].

Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de fadiga na flexão

Amostra	$P_{0,5\text{mm}}$ (kN)	$f_{R,I}$ (MPa)	$P_{\text{máx}}$ (kN)	$P_{\text{mín}}$ (kN)	N	CMOD_i (mm)	CMOD_f (mm)	ΔCMOD (mm)	k_0 (kN/mm)
90-CP1	20,37	15,49	18,33	5,50	1880	0,3778	4,0	3,6222	176,4
90-CP2	13,65	10,26	12,29	3,69	2028	0,3672	4,0	3,6328	110,0
90-CP3	17,71	13,20	15,94	4,78	252	0,3669	4,0	3,6331	169,2
80-CP1	22,75	16,53	18,20	5,46	1000000	0,3692	0,5472	0,1780	197,9
80-CP2	14,39	10,21	11,51	3,45	760988	0,3976	4,0	3,6024	166,7
80-CP3	10,52	7,70	8,42	2,52	773780	0,4232	4,0	3,5768	135,0
70-CP1	13,24	10,05	9,27	2,78	1000000	0,3753	0,4022	0,0269	129,1
70-CP2	15,33	11,14	10,73	3,22	1000000	0,3945	0,4206	0,0261	177,7
70-CP3	12,18	8,94	8,53	2,56	1000000	0,3474	0,3728	0,0254	101,2
50-CP1	22,67	17,04	11,34	3,40	1000000	0,3476	0,3602	0,0126	220,1
50-CP2	15,49	11,79	7,75	2,32	1000000	0,3388	0,3571	0,0183	135,5
50-CP3	15,85	11,63	7,93	2,38	1000000	0,3902	0,3974	0,0072	191,1

Como esperado, quanto maior a quantidade de fibras na seção transversal, maior a contribuição para o efeito de ponte na zona fissurada [62], e, consequentemente, maior o valor da tensão residual $f_{R,I}$ [9]. Assim, a dispersão nos resultados de $f_{R,I}$ para o material pode ser justificada pela variabilidade na

quantidade de fibras presentes na seção transversal, constatada a partir de imagens dos prismas ao final dos ensaios, como indica a Figura 4.7 (amostras 80-CP1 e 80-CP3 que apresentaram, respectivamente, o maior e o menor $f_{R,1}$).

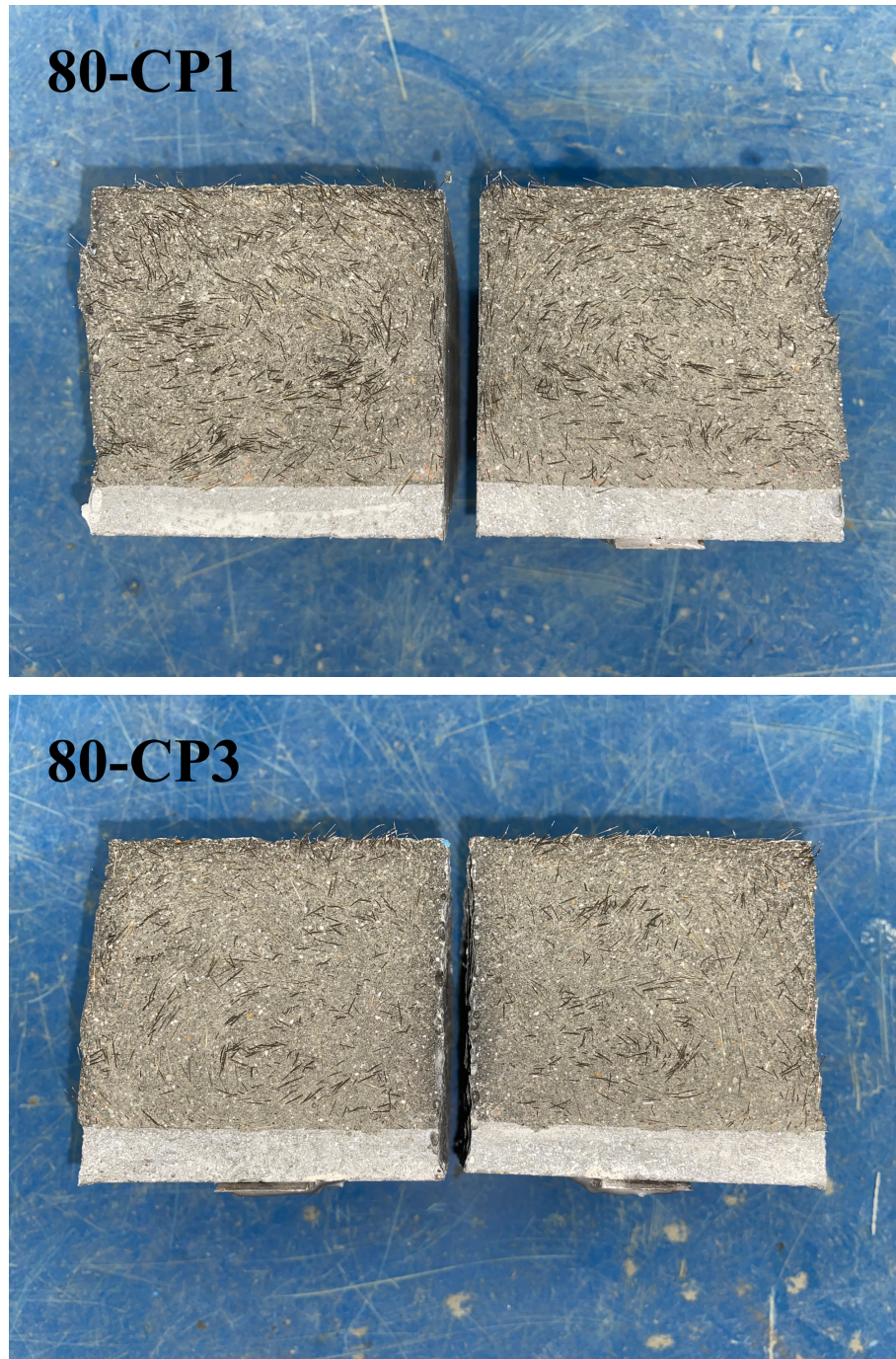


Figura 4.7 - Seção transversal após ensaio de fadiga na flexão - Amostras 80-CP1 e 80-CP3

Na etapa de pré-fissuração a amostra é carregada até atingir CMOD igual a 0,5 mm, sendo então descarregada. A diferença entre esse valor e o valor de CMOD ao término dessa etapa ($CMOD_i$) indica a recuperação da deformação sofrida pela

amostra ($CMOD_{Rec}$). Uma observação feita a partir dos resultados é a existência de uma relação direta entre a resistência residual e a recuperação da abertura da fissura, i.e. quanto maior o valor de $f_{R,I}$, maior é a recuperação da deformação sofrida pela amostra (Figura 4.8). Valores superiores de $f_{R,I}$ indicam uma maior presença de fibras na seção, de modo que mais fibras atuam absorvendo energia elástica durante o carregamento, proporcionando assim uma maior recuperação quando cessados os esforços. A presença das fibras permite que o material se deforme através da deformação das mesmas, dado que o concreto, já fissurado, perde a capacidade de resistir aos esforços e se deformar.

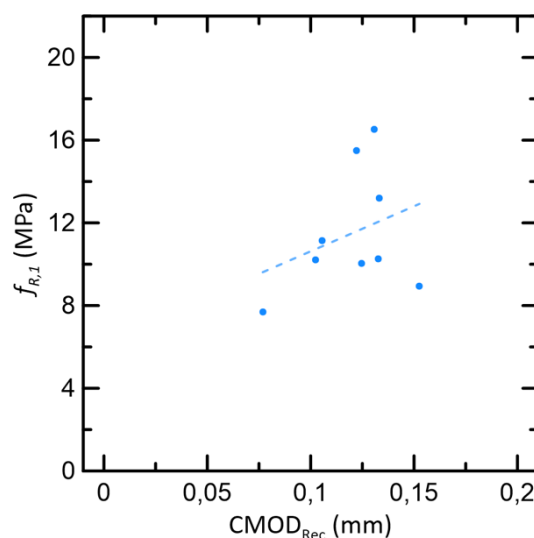


Figura 4.8 - Resistência residual x recuperação de CMOD

A variação de CMOD não apresentou uma relação direta com $P_{0,5mm}$ como observado por Carlesso, De la Fuente e Pialarissi-Cavalaro [9], que constataram que, para amostras submetidas ao mesmo limite superior de tensão, o $\Delta CMOD$ é menor quanto maior o $P_{0,5mm}$. Tal relação não foi possível de se estabelecer, uma vez que todas as amostras romperam com CMOD igual a 4 mm, de modo que a variação de CMOD é muito semelhante para as amostras pois os valores de CMOD inicial também são próximos. Entretanto, verificou-se que, como esperado, quanto maior o limite percentual máximo para os ciclos de fadiga, maior é a variação da abertura de fissura, considerando-se as amostras que não romperam (Figura 4.9).

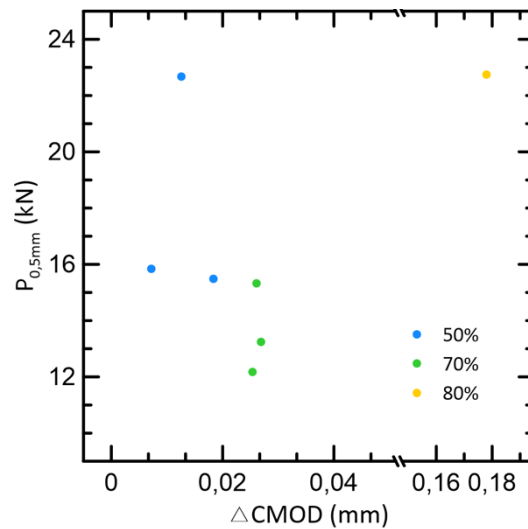


Figura 4.9 - Carga residual x variação de CMOD

4.2.1. Variação da Abertura de Fissura ao Longo dos Ciclos

A Figura 4.10 apresenta a evolução da abertura de fissura (CMOD), tomada como o valor máximo relativo a cada ciclo, ao longo do ensaio de fadiga para todas as amostras, caracterizando a típica curva de fluência cíclica. A ruptura ocorreu apenas em amostras submetidas aos níveis máximos de 80% e 90% de $f_{R,1}$, indicada pelo CMOD igual a 4 mm. As demais amostras suportaram 10^6 ciclos sem grandes variações no CMOD, com exceção da amostra 80-CP1.

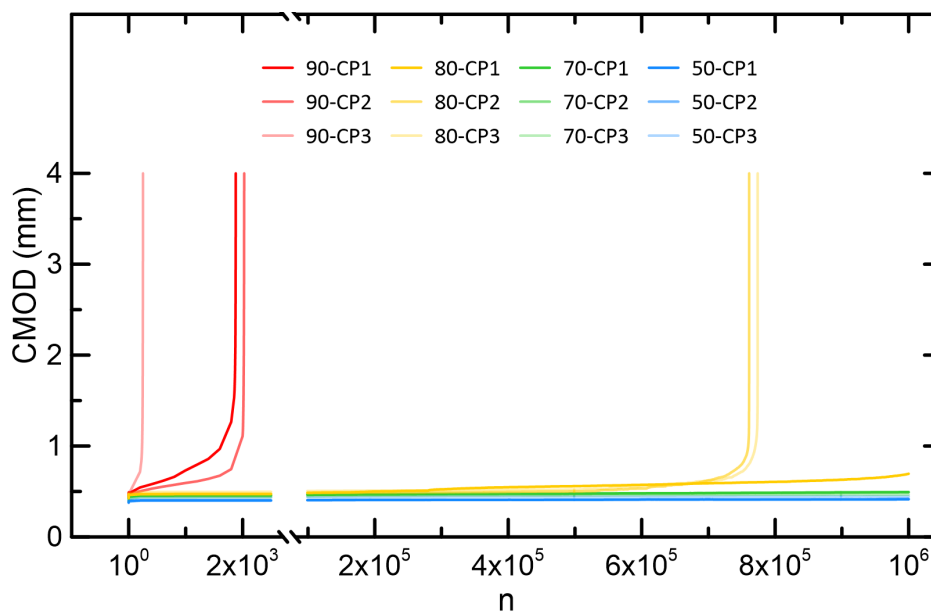


Figura 4.10 - Evolução de CMOD ao longo dos ciclos - Curva de fluência cíclica

A Figura 4.11 apresenta gráficos para fins de avaliação e comparação do comportamento das amostras, contendo os resultados em função do número de ciclos relativo, que corresponde à razão entre o número de ciclos (n) e o ciclo máximo (N). A Figura 4.11(a) indica as amostras que romperam e a Figura 4.11(b), as amostras que suportaram 10^6 ciclos. Apesar da amostra 80-CP1 não ter atingido uma abertura de 4 mm, ela apresentou um aumento considerável da mesma, indicando uma evolução rumo à ruptura. A Figura 4.11(c) apresenta a variação de CMOD apenas para os níveis máximos de 50% e 70% de $f_{R,I}$, para os quais não foram observados aumentos consideráveis na abertura de fissura que pudessem indicar princípio de ruptura.

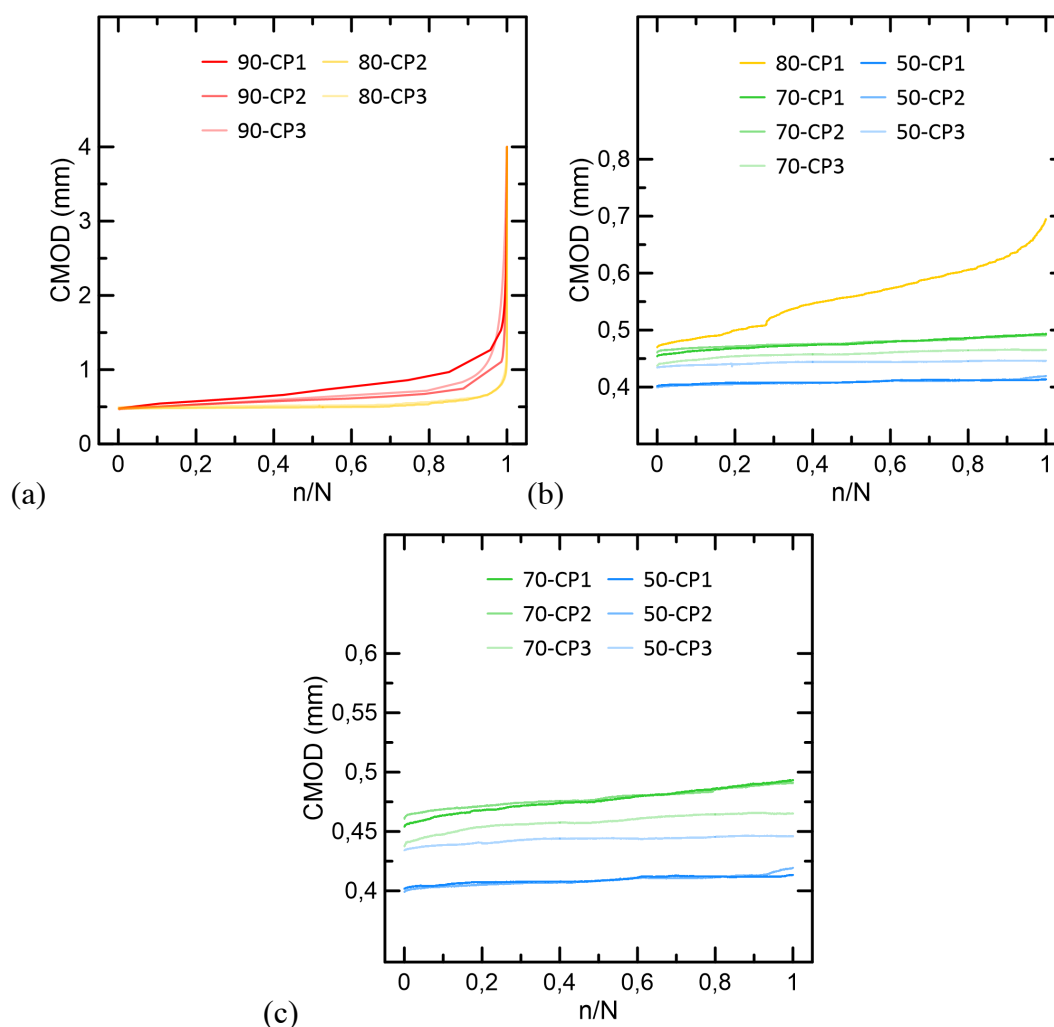


Figura 4.11 - CMOD x número de ciclos relativo para (a) amostras que romperam (b) amostras que não romperam (c) níveis de tensão 50% e 70%

O comportamento médio das amostras de acordo com cada nível máximo de tensão pode ser observado na Figura 4.12(a) para os níveis em que houve ruptura

e na Figura 4.12(b) para os níveis cujas amostras não romperam. Como em estudos anteriores [9–11], são observadas duas fases distintas nas curvas das amostras que sofreram ruptura. Inicialmente, a abertura de fissura aumenta a uma taxa praticamente constante. Como constatado por Carlesso, De la Fuente e Pialarissi-Cavalaro [9] e Niu *et al.* [11], em torno de n/N igual a 80% o aumento passa a ser mais pronunciado. É possível observar a ocorrência de um aumento súbito por volta de 90% de n/N para as amostras submetidas ao limite máximo de 90% de $f_{R,I}$ e em torno de 95% de n/N para 80% de $f_{R,I}$, quando então as amostras se aproximam da ruptura. Assim, é definido o ciclo relativo limite (n/N_{Lim}). Considerando-se os níveis de tensão de 50% e 70%, verifica-se que a evolução da abertura ocorre de forma mais acentuada para o nível de tensão maior (70% de $f_{R,I}$), como constatado em outros estudos [9, 10].

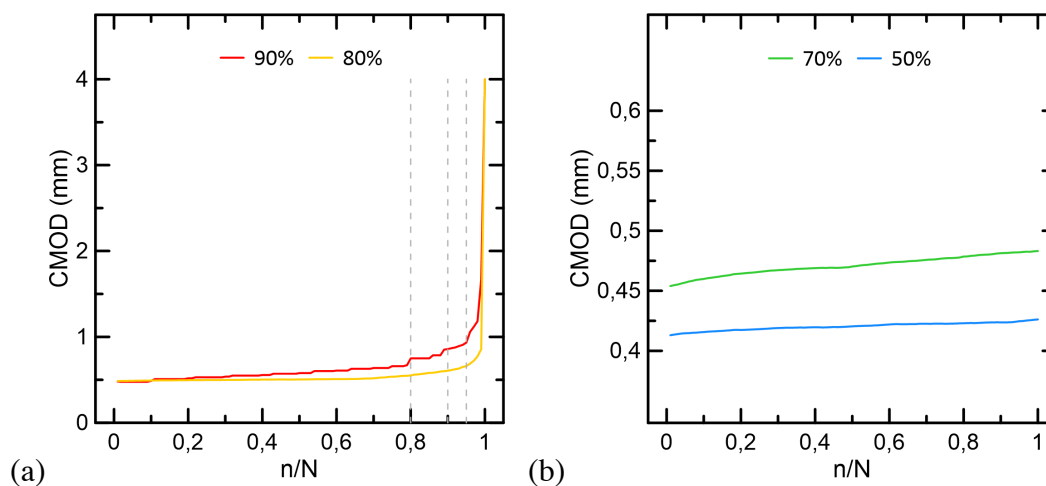


Figura 4.12 - Evolução de CMOD médio para (a) amostras que romperam com 80% e 90% (b) amostras que não romperam com 50% e 70%

Ainda para melhor visualizar o padrão de comportamento do material para as amostras que romperam, a Figura 4.13 apresenta os gráficos com o CMOD relativo ($CMOD_{rel}$), correspondente à razão entre $CMOD_n$ e $CMOD_i$, que mostra o quanto a abertura de fissura evoluiu em relação à abertura inicial após a pré-fissuração.

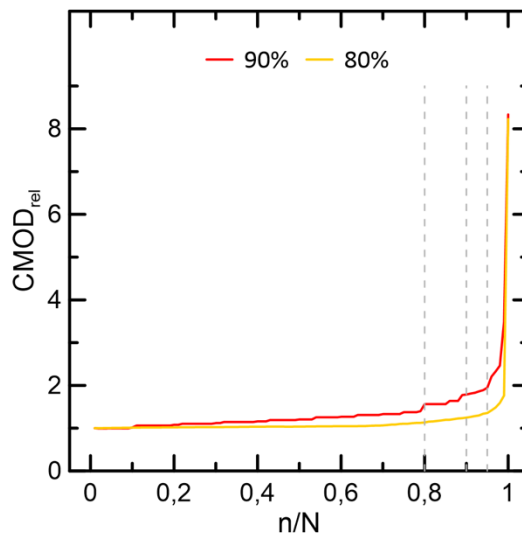


Figura 4.13 - Evolução de CMOD relativo ao longo do número de ciclos relativo para amostras que romperam com 80% e 90%

4.2.2. Degradação Mecânica do CUAD no Ensaio de Fadiga

O processo de pré-fissuração realizado anteriormente aos ensaios de fadiga compromete a capacidade da matriz cimentícia de resistir às forças de tração na flexão das amostras na seção fissurada, fazendo com que as fibras passem a exercer esse papel. A variação de carga entre $P_{\text{máx}}$ e $P_{\text{mín}}$ leva ao surgimento gradual de microfissuras na interface entre fibra e matriz, promovendo a degradação do compósito e então o crescimento da microfissura no meio da seção da amostra. A contribuição das fibras para a rigidez do material compósito já foi amplamente discutida, especialmente em relação ao uso de fibras contínuas ou tecidos inseridos em diversas matrizes [48, 63], porém pouco foi discutido em relação à perda de rigidez do concreto reforçado com fibras sob fadiga.

A rigidez (k) do material pode ser aferida a partir da inclinação dos ciclos de histerese. Para cada amostra ensaiada, calculou-se a rigidez inicial (k_0) como sendo a correspondente ao ciclo 400, com exceção da amostra com 90-CP3 cuja rigidez inicial corresponde ao ciclo 10 visto que esta rompeu com 252 ciclos. A Figura 4.14(a) apresenta os ciclos de histerese para as amostras relativas ao nível de 50% de $f_{R,I}$, nos ciclos inicial (400), intermediário (500.000) e final (1.000.000), onde não se observam variações significativas na rigidez. Já no caso da Figura 4.14(b), relativa ao limite de 70%, é possível visualizar alguma redução de rigidez nas amostras ao final do ensaio de fadiga. A perda da propriedade fica ainda mais

evidente no caso das amostras submetidas aos níveis máximos de carga de 80% (Figura 4.14(c)) e 90% (Figura 4.14(d)).

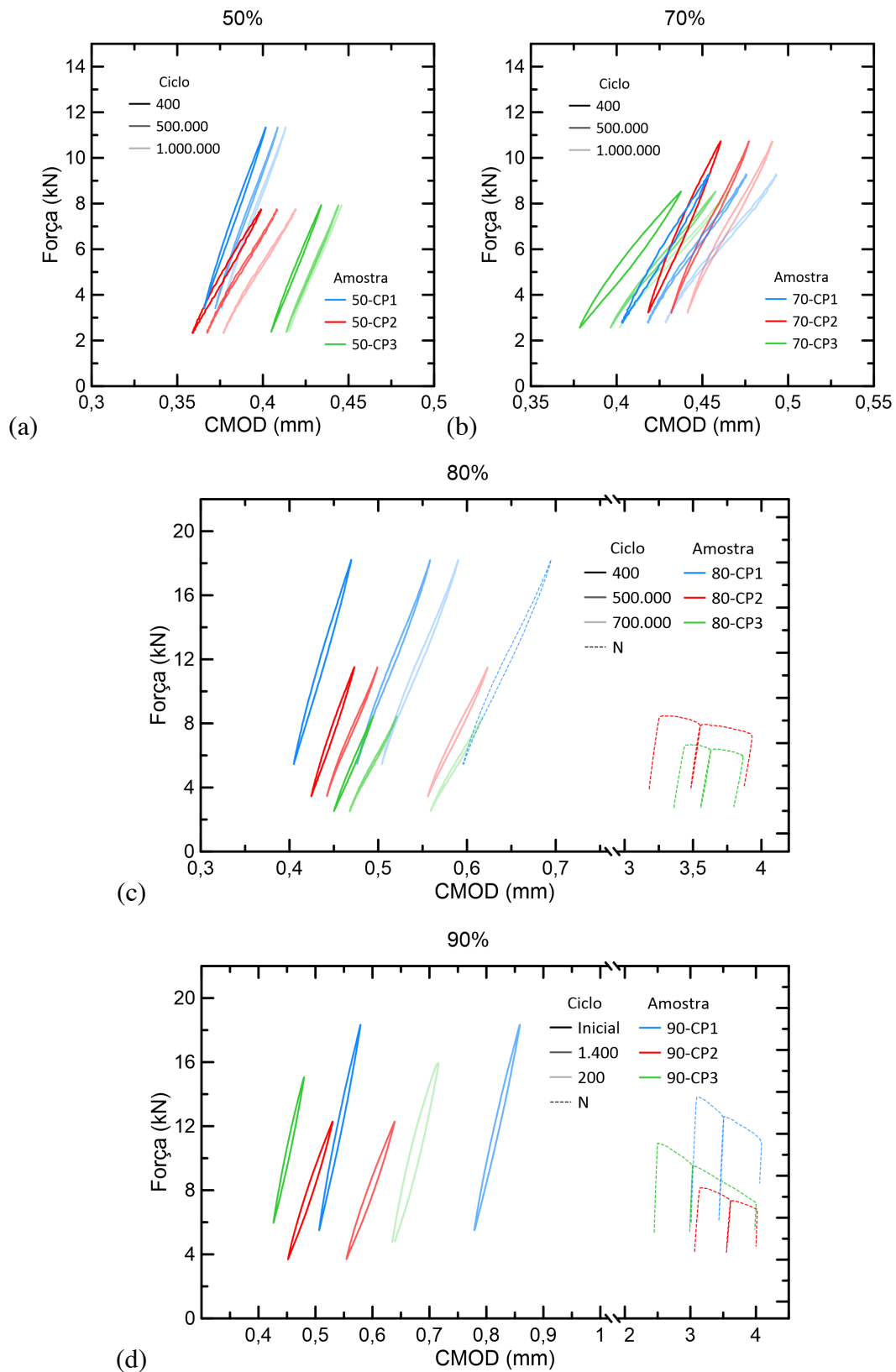


Figura 4.14 - Evolução dos ciclos ao longo do ensaio de fadiga para nível de tensão de (a) 50% (b) 70% (c) 80% (d) 90%

A perda de rigidez resulta em um aumento na abertura de fissuras e está associada a uma degradação mecânica do concreto reforçado com fibras [17]. Comparando diretamente amostras submetidas a diferentes níveis de tensão máxima ao longo de 10^6 ciclos (80-CP1, 70-CP2 e 50-CP2) na Figura 4.15, tanto a perda de rigidez quanto a evolução da abertura de fissura ocorrem de forma mais acentuada para níveis crescentes de tensão, indicando que quanto maior o limite máximo de tensão, maior o dano ao material. Essa observação está de acordo com o que foi reportado anteriormente para o CMOD em outros estudos [9–11, 18].

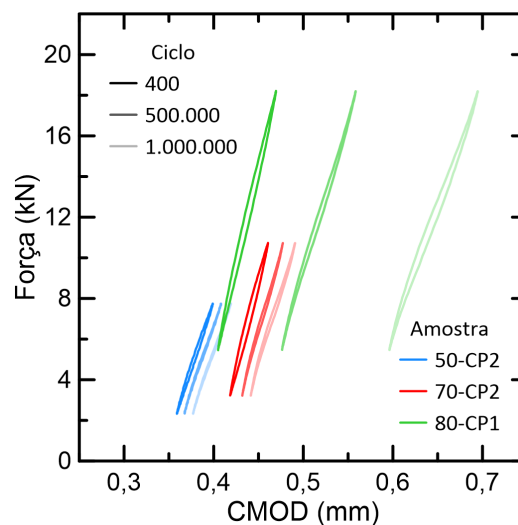


Figura 4.15 - Evolução dos ciclos ao longo do ensaio de fadiga para as amostras 80-CP1, 70-CP2 e 50-CP2

A Figura 4.16(a) apresenta a quantificação da perda de rigidez ao longo dos ciclos para as amostras ensaiadas. A princípio, observa-se uma variação na inclinação do gráfico para os diferentes limites máximos adotados, confirmando que a redução da rigidez ocorre de forma mais acentuada para maiores limites. Na Figura 4.16(b), em função do número de ciclos relativo (n/N), observa-se uma mudança na inclinação das amostras que romperam, fazendo com que a disposição não seja representativa do comportamento do material quanto à redução de rigidez ao longo dos ciclos. Logo, as análises serão realizadas em relação ao número de ciclos no decorrer do ensaio de fadiga.

Uma vez que a matriz de concreto já foi fissurada, sua rigidez pouco contribui para o material ao longo dos ciclos de fadiga, de forma que as fibras exercem uma influência predominante sobre a propriedade. A variação de rigidez das amostras observada na Figura 4.16 pode ser atribuída à quantidade de fibras na

seção fissurada, que será maior quanto maior for a tensão residual ($f_{R,I}$) obtida na pré-fissuração das amostras. Assim, a presença de uma maior quantidade de fibras na seção fissurada contribui para uma maior resistência do material à deformação, i.e., ele irá apresentar maior rigidez inicial. Tal relação é evidenciada na Figura 4.17 e também pode ser visualizada nas Figuras 4.14 e 4.15, nas quais amostras de maior $f_{R,I}$ apresentam maior inclinação no gráfico.

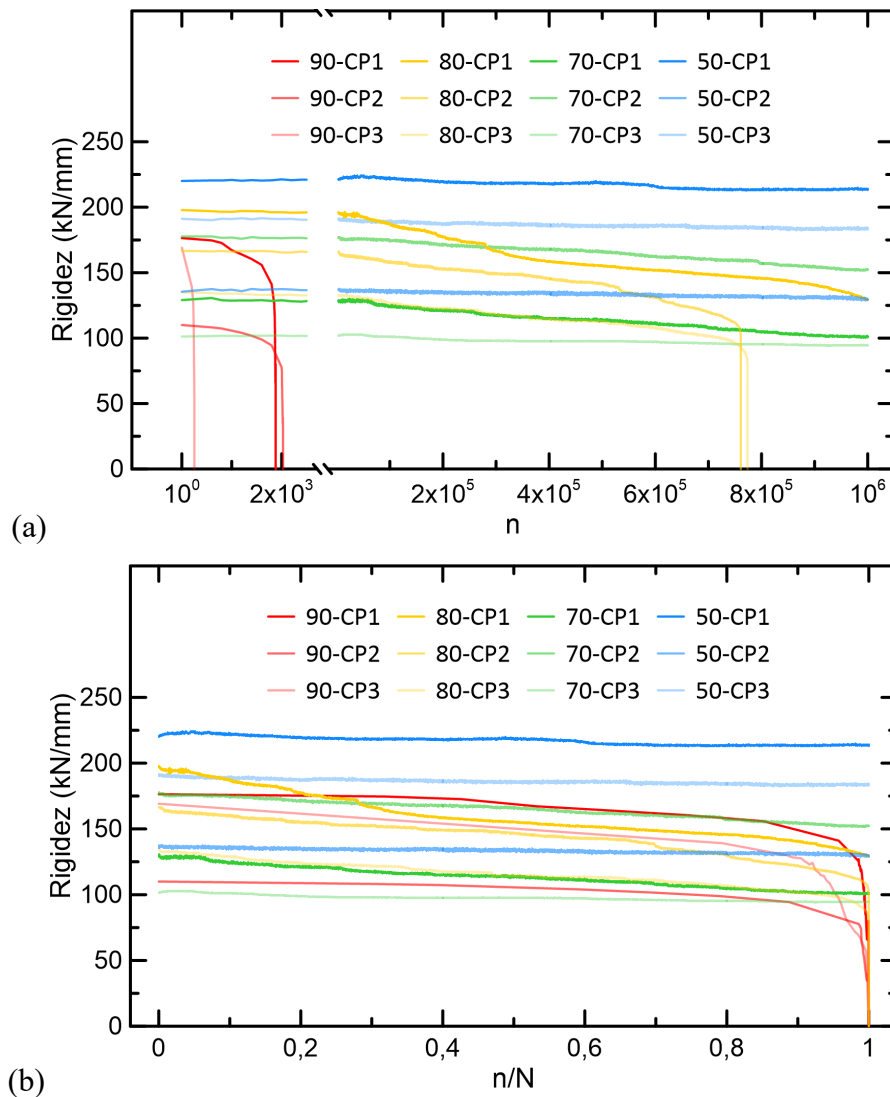


Figura 4.16 - Degradação da rigidez ao longo (a) dos ciclos (b) do número de ciclos relativo

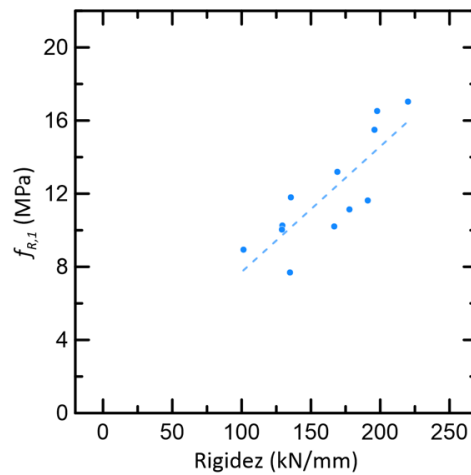


Figura 4.17 - Resistência residual x rigidez inicial

4.2.2.1. Análise da Degradação Mecânica em Função da Retenção de Rigidez

A fim de melhor avaliar e comparar o comportamento das amostras, determinou-se a retenção de rigidez (R), correspondente à razão entre a rigidez do ciclo n (k_n) e a rigidez inicial (k_0), variando de 1 a 0. Esse parâmetro corresponde ao complemento do índice de dano global D_g , definido como $1 - k_n/k_0$. O gráfico de Retenção de rigidez vs. Ciclo (Figura 4.18) evidencia um comportamento linear para as amostras que suportaram 10^6 ciclos. Em amostras que sofreram ruptura, observa-se um comportamento inicialmente linear, seguido de uma curva e uma perda de rigidez acentuada até a ruptura do material. Visto que os resultados envolvem amostras que romperam e não rompidas e para que haja maior representatividade quanto à inclinação do trecho inicial (conforme descrito anteriormente), eles serão analisados em função do número de ciclos (n) ao invés da razão n/N .

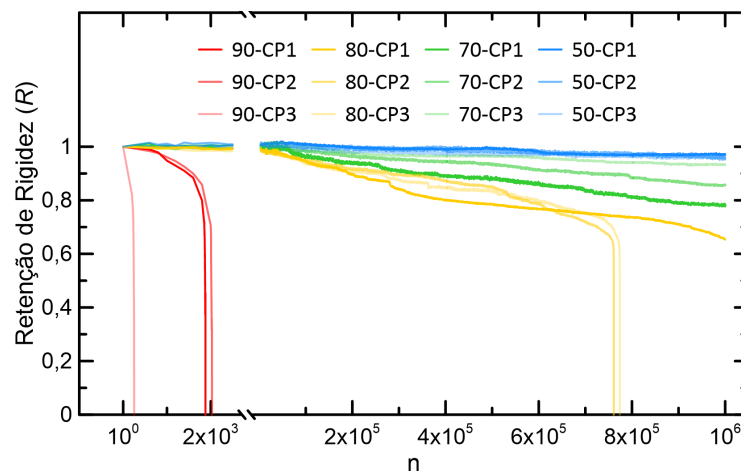


Figura 4.18 - Retenção de rigidez ao longo dos ciclos

A partir dos dados do ciclo que antecede o ciclo de ruptura, verifica-se que a mesma ocorre com uma retenção de rigidez entre 45% e 28% para o nível de tensão de 90% e entre 26% e 23% para o nível de tensão de 80%. No entanto, a fim de se caracterizar o comportamento do material de maneira simplificada e envolvendo as amostras rompidas e não rompidas, será considerado apenas o trecho linear das amostras ensaiadas. O momento do início da ruptura será adotado, de forma conservadora, como equivalente à ruptura, sob uma determinada retenção de rigidez, definida como retenção de rigidez na ruptura (R_r).

Avaliando-se graficamente os resultados das amostras rompidas (Figura 4.19), é possível considerar o início da ruptura a partir do fim do comportamento linear do material. Em relação às amostras com nível de tensão em 90%, essa delimitação não ficou muito bem definida como para as amostras com nível de tensão igual a 80%. Logo, será considerada a ocorrência aproximada da ruptura em dois possíveis níveis de retenção de rigidez: 80% e 85%, para o nível de tensão de 90%, a serem verificados. Para o nível de tensão de 80%, o limite referente à ruptura pode ser estabelecido em torno de 70% de retenção.

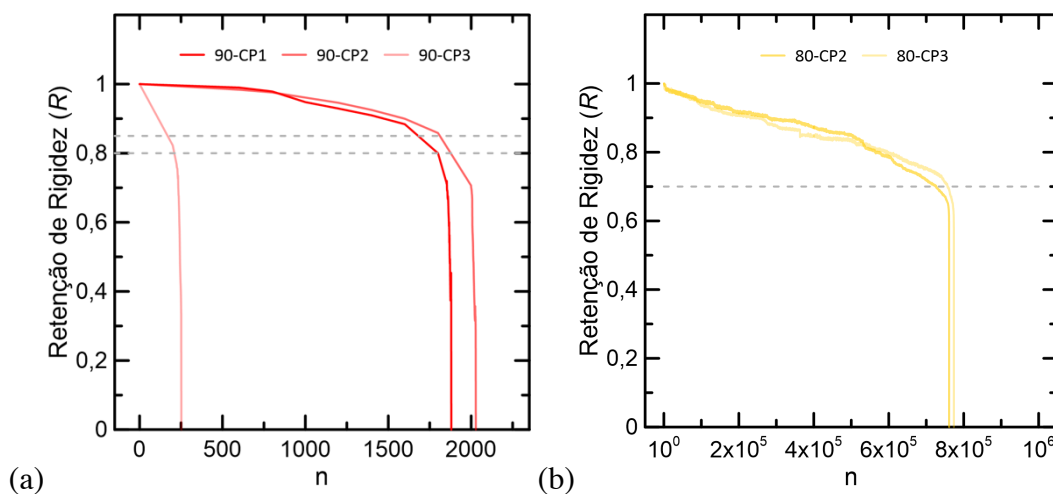


Figura 4.19 - Retenção de rigidez ao longo dos ciclos para amostras que romperam nos níveis de tensão de (a) 90% (b) 80%

Assim, determinou-se o comportamento de cada amostra aproximado por uma reta por regressão linear segundo a Equação 1, sendo R a retenção de rigidez, n o número de ciclos, a e b os respectivos coeficientes e R^2 o coeficiente de determinação. A Figura 4.20 apresenta graficamente a aproximação utilizada para

as respectivas amostras, enquanto a Tabela 4.4 indica os coeficientes obtidos. O fluxograma disposto na Figura 4.21 indica como foi feita a calibração das equações.

$$R = an + b \quad (1)$$

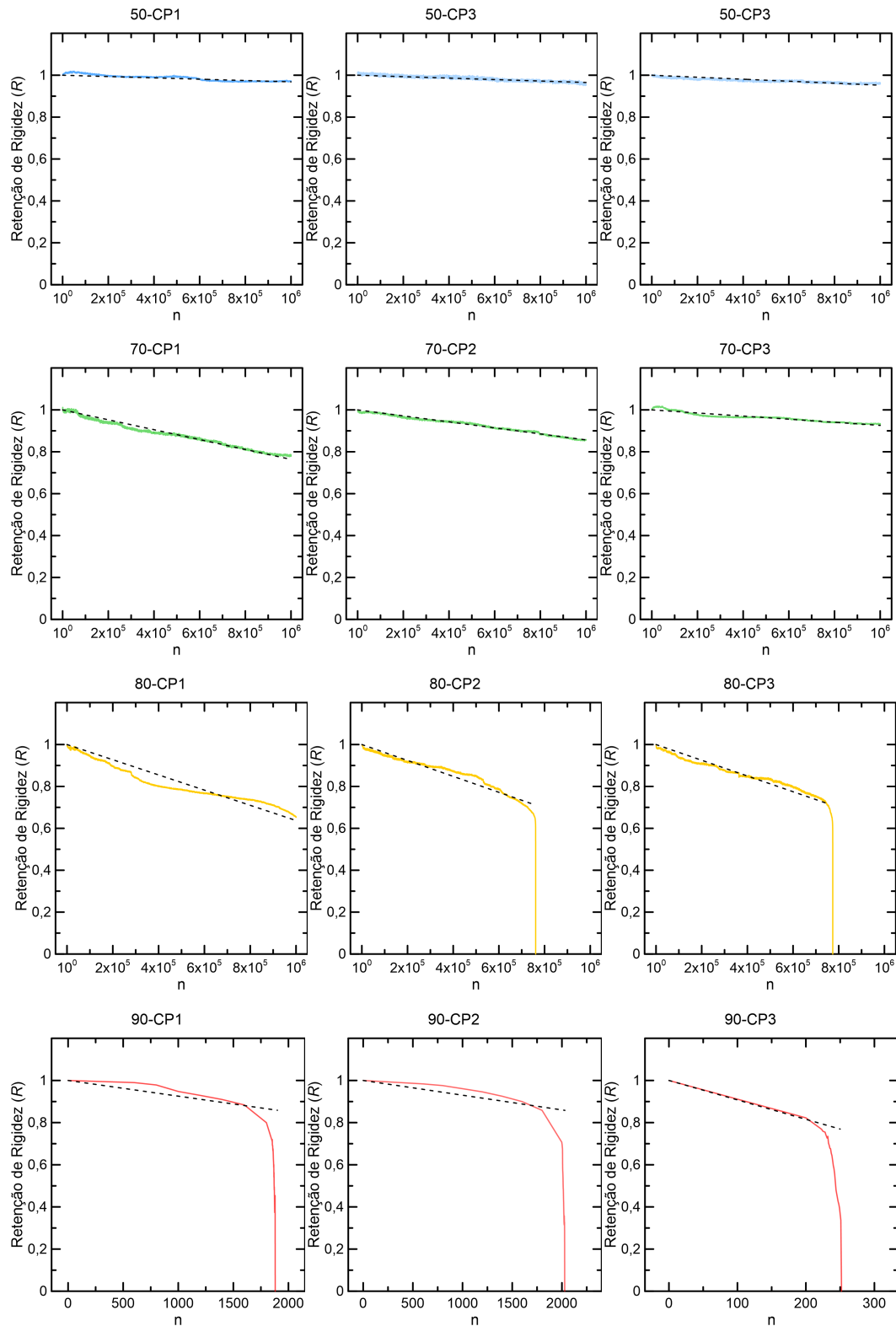
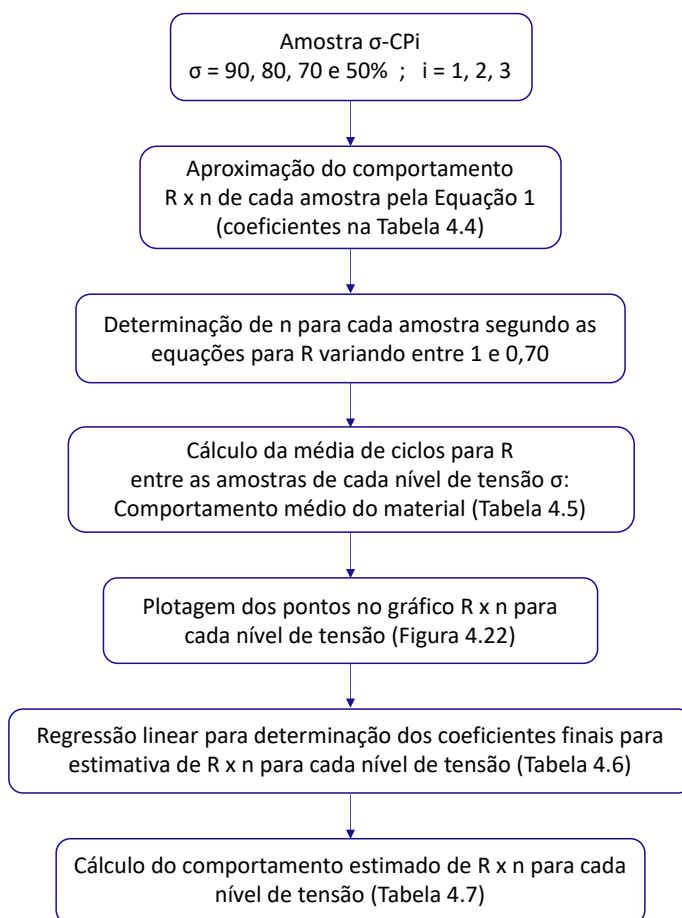


Figura 4.20 - Regressão linear para a retenção de rigidez x número de ciclos de cada amostra

Tabela 4.4 - Coeficientes para equações de retenção de rigidez x número de ciclos

Amostra	a	b	R^2
90-CP1	-7,4417E-5	1	0,7369
90-CP2	-6,9890E-5	1	0,7312
90-CP3	-9,2219E-4	1	0,9960
80-CP1	-3,6263E-7	1	0,8655
80-CP2	-3,7997E-7	1	0,8383
80-CP3	-3,7536E-7	1	0,8217
70-CP1	-2,3636E-7	1	0,9724
70-CP2	-1,4336E-7	1	0,9868
70-CP3	-7,4015E-8	1	0,9099
50-CP1	-3,1656E-8	1	0,7805
50-CP2	-3,4638E-8	1	0,8351
50-CP3	-4,7737E-8	1	0,6556

Figura 4.21 - Procedimentos para a determinação do comportamento estimado de $R \times n$ para cada nível de tensão

Utilizando-se as equações de reta obtidas, determinou-se para cada amostra o ciclo correspondente a uma série de valores de retenção de rigidez, variando entre 1 e 0,70. Em seguida, foi feita a média do número de ciclos determinado entre as amostras de cada nível de tensão, obtendo-se o respectivo comportamento médio de Retenção de Rigidez vs. Ciclo, segundo a Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Comportamento médio de retenção de rigidez x ciclo para os diferentes níveis de tensão

Retenção de Rigidez (R)	Média de Ciclos			
	50%	70%	80%	90%
1	0	0	0	0
0,98	542718	164780	53690	192
0,96	1085436	329561	107380	384
0,95	1356795	411951	134225	481
0,94	1628155	494341	161071	577
0,92	2170873	659121	214761	769
0,9	2713591	823902	268451	961
0,88	3256309	988682	322141	1153
0,86	3799027	1153463	375831	1345
0,85	4070386	1235853	402676	1442
0,84	4341745	1318243	429521	1538
0,82	4884464	1483023	483212	1730
0,8	5427182	1647804	536902	1922
0,78	5969900	1812584	590592	2114
0,76	6512618	1977364	644282	2306
0,75	6783977	2059755	671127	2403
0,74	7055336	2142145	697972	2499
0,72	7598054	2306925	751663	2691
0,7	8140773	2471706	805353	2883

Os pontos foram plotados em um gráfico, definindo-se a partir de regressão linear uma expressão segundo a Equação 1 para cada nível máximo de tensão (σ), conforme apresentado na Figura 4.22. Os coeficientes das equações estão dispostos na Tabela 4.6, configurando os coeficientes finais representativos para a estimativa da retenção de rigidez pelo número de ciclos para cada nível de tensão. Logo, foram calculados os ciclos correspondentes aos valores de retenção de rigidez característicos do comportamento estimado do material sob diferentes níveis de tensão, apresentados na Tabela 4.7.

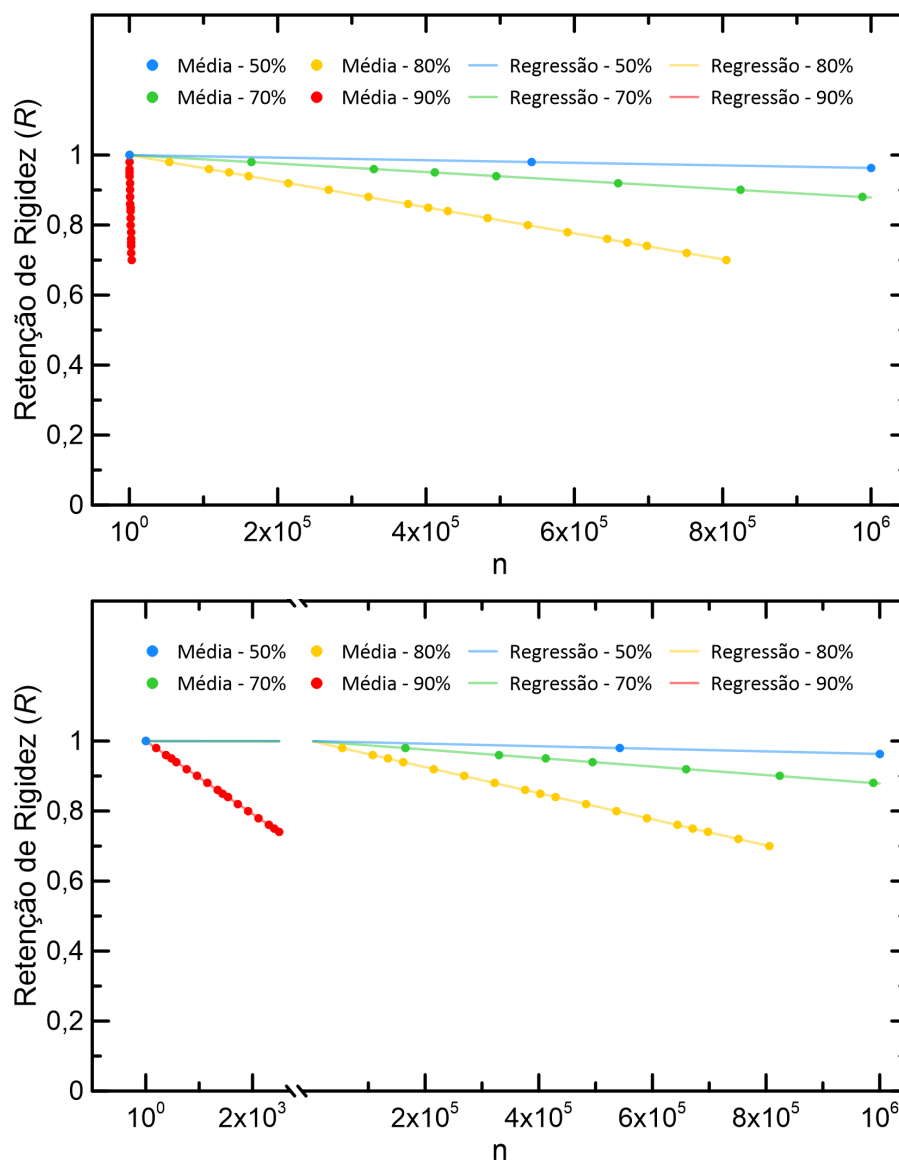


Figura 4.22 - Comportamento médio de retenção de rigidez x número de ciclos para diferentes níveis de tensão

Tabela 4.6 - Coeficientes finais representativos para estimativa da retenção de rigidez x número de ciclos para cada nível de tensão

Nível máximo de tensão (σ)	a	b	R^2
0,5	-3,6852E-8	1	1
0,7	-1,2137E-7	1	1
0,8	-3,7251E-7	1	1
0,9	-1,0406E-4	1	1

Tabela 4.7 - Comportamento estimado de retenção de rigidez x ciclo para os diferentes níveis de tensão

Retenção de Rigidez (R)	Ciclos Estimados			
	50%	70%	80%	90%
1	0	0	0	0
0,98	542711	164785	53690	192
0,96	1085423	329571	107380	384
0,95	1356778	411963	134225	480
0,94	1628134	494356	161070	577
0,92	2170846	659141	214759	769
0,9	2713557	823927	268449	961
0,88	3256268	988712	322139	1153
0,86	3798980	1153498	375829	1345
0,85	4070335	1235890	402674	1441
0,84	4341691	1318283	429519	1538
0,82	4884402	1483068	483209	1730
0,8	5427114	1647854	536898	1922
0,78	5969825	1812639	590588	2114
0,76	6512537	1977424	644278	2306
0,75	6783892	2059817	671123	2402
0,74	7055248	2142210	697968	2499
0,72	7597959	2306995	751658	2691
0,70	8140671	2471781	805348	2883

Com o objetivo de relacionar o nível de tensão aplicado (σ), a retenção de rigidez (R) e o ciclo (n) para o material, plotou-se um gráfico de $\text{Log}(n)$ vs. $1/\sigma$ para diferentes níveis de retenção de rigidez (Figura 4.23). Os valores de n utilizados foram os obtidos com o cálculo anterior (Tabela 4.7).

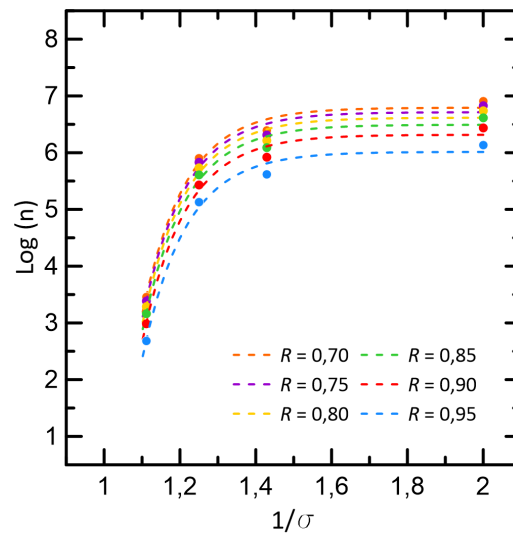


Figura 4.23 - Relação $\text{Log}(n)$ x $1/\sigma$ para diferentes níveis de retenção de rigidez

Com o auxílio da ferramenta de *fitting* do software Origin 2019b [64] foram obtidas equações no formato da Equação 2 para cada retenção de rigidez especificada. Os coeficientes C , D e y_0 são apresentados na Tabela 4.8, que inclui também os coeficientes de determinação.

$$\text{Log}(n) = y_0 + Ce^{D(1/\sigma)} \quad (2)$$

Tabela 4.8 - Parâmetros das equações do comportamento de $\text{Log}(n)$ x $1/\sigma$ para diferentes níveis de retenção de rigidez

Retenção (R)	y_0	C	D	R^2
0,95	6,01486	-57605,15	-8,78582	0,9912
0,90	6,31589	-57605,15	-8,78582	0,9912
0,85	6,49198	-57605,15	-8,78582	0,9912
0,80	6,61692	-57605,15	-8,78582	0,9912
0,75	6,71383	-57605,15	-8,78582	0,9912
0,70	6,79301	-57605,15	-8,78582	0,9912

A partir das equações para as respectivas retenções de rigidez, foram calculados os ciclos correspondentes aos diferentes níveis de tensão, dispostos na Tabela 4.9. Assim, determina-se o comportamento calculado do concreto de ultra-alto desempenho.

Tabela 4.9 - Comportamento calculado do CUAD a partir da relação $\text{Log}(n) \times 1/\sigma$ para diferentes níveis de retenção de rigidez

Retenção de Rigidez (R)	Ciclos Calculados - Equações $\text{Log}(N)$			
	50%	70%	80%	90%
0,95	1031605	650786	108530	462
0,90	2063210	1301573	217060	923
0,85	3094807	1952354	325590	1385
0,80	4126421	2603146	434121	1847
0,75	5158026	3253932	542651	2309
0,70	6189614	3904707	651179	2770

Ao observar os coeficientes na Tabela 4.8, verificou-se que apenas o y_0 variou com a mudança da retenção de rigidez. Plotando-se os pontos Retenção de Rigidez vs. y_0 (Figura 4.24), verifica-se com o auxílio da ferramenta de *fitting* do software Origin 2019b [64] uma relação polinomial de grau 4, dada pela Equação 3, com coeficiente de determinação (R^2) igual a 1. A partir dessa equação, é possível determinar o coeficiente que irá ditar a relação entre o número de ciclos e a tensão para uma retenção de rigidez qualquer.

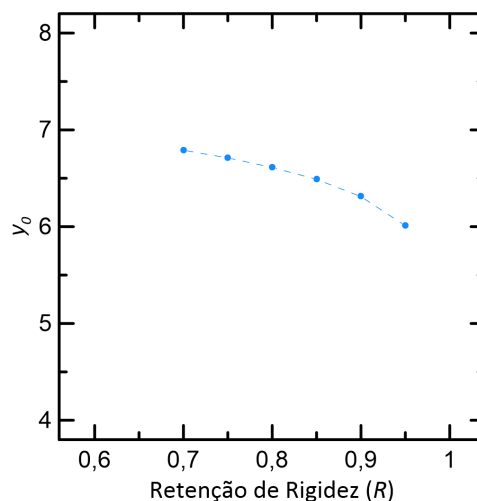


Figura 4.24 - Retenção de rigidez x y_0

$$y_0 = -211,633R^4 + 653,545R^3 - 759,861R^2 + 392,245R - 68,799 \quad (3)$$

4.2.2.2. Determinação dos Limites de Ruptura

Como discutido no item anterior, a análise da abertura de fissura ao longo dos ciclos em CMOD vs. Ciclo relativo permitiu estabelecer o momento em que as amostras se aproximam da ruptura, sendo n/N_{Lim} em torno de 90% de n/N para as amostras submetidas ao limite máximo de 90% de $f_{R,I}$ e 95% de n/N para 80% de $f_{R,I}$. Na análise da retenção de rigidez, foram estabelecidos os limites para a ruptura (R_r) correspondentes à retenção de 80% ou 85% para 90% de $f_{R,I}$ e 70% para 80% de $f_{R,I}$. A Tabela 4.10 apresenta esses limites de forma resumida.

Tabela 4.10 - Limites de ruptura propostos para diferentes níveis de tensão segundo os parâmetros Ciclo relativo e Retenção de rigidez

Limite máximo de Tensão	CMOD vs. Ciclo Relativo	Retenção de rigidez vs. Ciclo
	Ciclo relativo limite - n/N_{Lim}	Retenção de rigidez na ruptura - R_r
90% de $f_{R,I}$	90%	80% ou 85%
80% de $f_{R,I}$	95%	70%

Buscando-se relacionar os limites de ruptura estabelecidos segundo os diferentes critérios, avaliou-se o ciclo relativo (n/N) referente à retenção de rigidez correspondente à ruptura (R_r) para cada amostra segundo os respectivos limites máximos de tensão. Para as amostras com limite máximo de tensão igual a 80%, os valores de n foram obtidos diretamente de acordo com a retenção de rigidez. No caso do limite de 90%, devido à reduzida aquisição de dados, foi necessário realizar uma interpolação entre os valores de n para determinação aproximada do ciclo correspondente. Os dados utilizados no cálculo estão dispostos na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Determinação do ciclo para amostras de diferentes níveis de tensão e retenção de rigidez na ruptura

R _r	70%		80%		85%	
Amostra	Ciclo	R	Ciclo	R	Ciclo	R
80-CP2	725200	0,7001	-	-	-	-
80-CP3	757200	0,7001	-	-	-	-
	-	-	1600	0,8837	1600	0,8837
90-CP1	-	-	1799	0,8000	1680	0,8500
	-	-	1800	0,7998	1800	0,7998
	-	-	1800	0,8584	1800	0,8584
90-CP2	-	-	1877	0,8000	1811	0,8500
	-	-	1999	0,7066	1999	0,7066
	-	-	200	0,8226	0	1,0000
90-CP3	-	-	210	0,8000	169	0,8500
	-	-	223	0,7682	200	0,8226

Calculando-se o ciclo relativo de cada amostra e a média dos resultados para cada limite de tensão (Tabela 4.12), verifica-se grande proximidade entre os valores obtidos e o valor de n/N_{Lim} , estabelecido anteriormente para a ruptura a partir da relação com o CMOD, considerando o nível de tensão de 80%. Isso indica que as diferentes formas de abordagem da falha do material sob fadiga estão em consonância.

No caso do nível de tensão de 90%, a média entre as amostras se mostrou mais adequada para a falha em 80% de retenção de rigidez, porém, as duas primeiras amostras ficaram mais próximas do limite de ruptura segundo o ciclo relativo para a retenção de 85%. Sendo assim, para estabelecer o limite mais apropriado, será determinada a vida à fadiga, ou seja, o ciclo em que ocorre a ruptura, segundo os cálculos propostos no item anterior referentes à relação entre $\text{Log}(n)$ e $1/\sigma$.

Tabela 4.12 - Ciclo relativo para amostras de diferentes níveis de tensão e retenção de rigidez na ruptura

Limite máximo de Tensão e Retenção de rigidez na ruptura	Amostra	n/N (%)	Média (%)	n/N _{Lim} (%)
90% de $f_{R,I}$ $R_r = 85%$	90-CP1	89,4	81,9	90
	90-CP2	89,3		
	90-CP3	67,1		
90% de $f_{R,I}$ $R_r = 80%$	90-CP1	95,7	90,5	90
	90-CP2	92,5		
	90-CP3	83,1		
80% de $f_{R,I}$ $R_r = 70%$	80-CP2	95,3	94,9	95
	80-CP3	94,5		

A partir da Tabela 4.9, com os ciclos calculados para as respectivas retenções de rigidez e os limites de tensão, tem-se, para 90% de $f_{R,I}$, N igual a 1.847 para 80% de retenção de rigidez e N igual a 1.385 para 85% de retenção de rigidez. Considerando-se a média dos resultados obtidos experimentalmente igual a 1.387 ciclos, verifica-se que o limite de 85% se apresenta mais adequado. Ainda que a respectiva média para o ciclo relativo (81,9%) não esteja muito próxima do limite determinado (90%), ela fica adequada por ser conservadora, i.e., a amostra caminharia para a ruptura em um valor de n menor que o que seria determinado pelo próprio limite do CMOD.

Verificando-se o valor da vida à fadiga para 80% de $f_{R,I}$ segundo a Tabela 4.9 e a respectiva retenção de rigidez limite em 70%, tem-se N igual a 651.179. Considerando-se a média de N igual a 767.384 para as amostras ensaiadas que romperam, verifica-se que a retenção de rigidez igual a 70% resulta em um valor de vida à fadiga relativamente próximo dos dados experimentais e mais conservador, o que torna o limite adequado como referência.

A partir das análises e verificações realizadas, indicadas em um fluxograma na Figura 4.25, é possível determinar a vida à fadiga do concreto de ultra-alto desempenho sob fadiga na flexão segundo os critérios de retenção de rigidez e ciclo relativo para os limites de tensão de 90% e 80%. Considerando-se o limite de ruptura segundo a retenção de rigidez (R_r) em 85% para o limite de 90% de $f_{R,I}$ e

em 70% para o limite de 80% de $f_{R,I}$, verifica-se que a ruptura se dá a uma retenção de rigidez menor para uma menor tensão aplicada. No caso do limite de ruptura segundo o ciclo relativo (n/N_{Lim}), igual a 90% para 90% de $f_{R,I}$ e 95% para 80% de $f_{R,I}$, observa-se uma tendência no gráfico em seguir uma porcentagem maior para menores tensões [9, 11].

Com a constatação dessas tendências para o CUAD, seria possível adotar, sob uma perspectiva conservadora, os limites estabelecidos para o nível de tensão igual a 80% para outros níveis de tensão inferiores ao mesmo. Para tensões entre 80% e 90%, se aplicariam os limites relativos a 90% de $f_{R,I}$. A

Tabela 4.13 resume a definição dos limites.

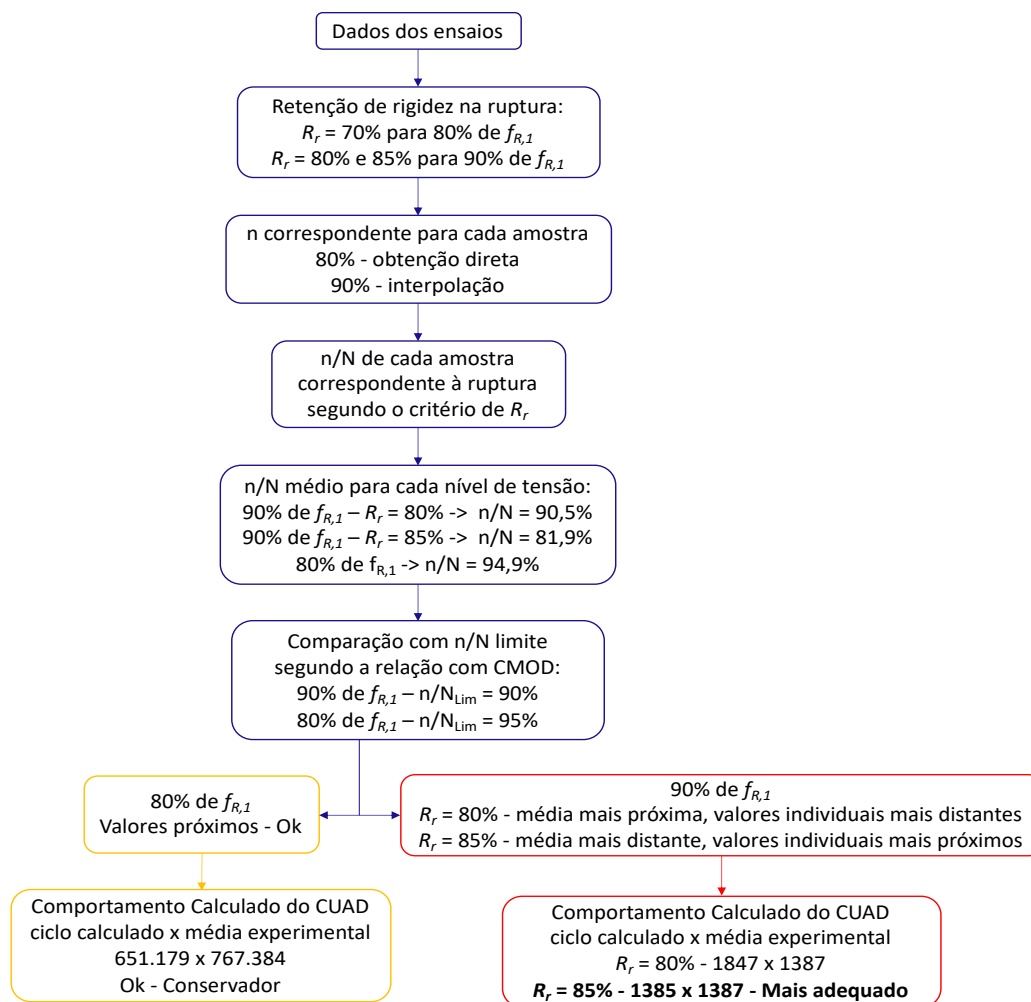


Figura 4.25 - Análise para a determinação dos limites de ruptura segundo a retenção de rigidez e o ciclo relativo

Tabela 4.13 - Limites de ruptura adotados para diferentes níveis de tensão segundo os parâmetros Ciclo relativo e Retenção de rigidez

Limite máximo de Tensão em relação a $f_{R,I}$	CMOD vs. Ciclo Relativo	Retenção de rigidez vs. Ciclo
	Ciclo relativo limite - n/N_{Lim}	Retenção de rigidez na ruptura - R_r
$80\% < \sigma \leq 90\%$	90%	85%
$\sigma \leq 80\%$	95%	70%

Assim, são estabelecidas as equações (4) e (5), para os carregamentos máximos de 90% de $f_{R,I}$ e 80% de $f_{R,I}$, respectivamente. Tais equações determinam a vida à fadiga do concreto de ultra-alto desempenho para diferentes níveis de tensão, considerando-se $1/\sigma$ com duas casas decimais de precisão. Os resultados podem ser conferidos na Tabela 4.14, que apresenta também a média dos resultados experimentais. Dada a elevada dispersão nos resultados devido ao próprio mecanismo de fadiga e às características intrínsecas do concreto, como a orientação e distribuição das fibras ao longo da seção transversal, é possível concluir que os resultados numéricos apresentaram boa aderência aos experimentais, sendo também conservadores.

$$\text{Log}(N) = 6,49198 - 57605,15e^{-8,78582(1/\sigma)} \quad 80\% < \sigma \leq 90\% \quad (4)$$

$$\text{Log}(N) = 6,79301 - 57605,15e^{-8,78582(1/\sigma)} \quad \sigma \leq 80\% \quad (5)$$

Tabela 4.14 - Vida à fadiga calculada e experimental do CUAD

Limite máximo de Tensão em relação a $f_{R,I}$	N calculado	N médio experimental
90%	1385	1387
80%	651179	767384
70%	3904707	-
50%	6189614	-

O limite de fadiga para o CUAD, correspondente à tensão sob a qual a amostra não rompe com 2.000.000 de ciclos, foi calculado a partir da Equação 5, sendo igual a 75,3% de $f_{R,I}$. Esse valor é significativamente superior aos estabelecidos para o concreto de ultra-alto desempenho [16] e alto desempenho [9,

14], em torno de 65%. Comparando-se os parâmetros deste estudo com os apresentados na Tabela 2.2, a carga referência e a frequência foram as mesmas da pesquisa realizada por Carlesso, De la Fuente e Pialarissi-Cavalaro [9], sendo o limite mínimo deste estudo, equivalente a 22,6% de $P_{0,5\text{mm}}$, também próximo ao apresentado pelos autores, igual a 19,8% de $P_{0,5\text{mm}}$.

A relação estabelecida entre os critérios de ruptura pela retenção de rigidez e pela relação CMOD vs. Ciclo relativo promove algumas possibilidades de análise. Considerando-se que para um determinado limite máximo de tensão tem-se a retenção de rigidez de ruptura (R_r), pode-se determinar o ciclo N correspondente à ruptura. Estabelecendo, de forma conservadora, o limite de ruptura equivalente ao início da Fase III em n/N igual a 80% para a relação CMOD vs. ciclo relativo, seria possível determinar o CMOD correspondente, ou seja, a abertura de fissura na qual se iniciaria a ruptura, sendo uma possibilidade para a realização de manutenções para se evitar o colapso ou servir de alerta para uma ocorrência de ruptura. De forma a tornar esse resultado mais genérico, seria possível utilizar a relação entre o CMOD relativo (CMOD_{rel}) e o ciclo relativo (n/N). Nesse caso, seria obtida uma relação em função do CMOD inicial da amostra, fornecendo o respectivo CMOD correspondente, configurando uma possibilidade de acompanhamento da fissura quando ela é detectada em seu estágio inicial. Por fim, para uma retenção de rigidez e nível de tensão desejados, estaria associado um número de ciclos que causaria a perda de rigidez em questão. A partir dessa quantidade de ciclos seria possível estabelecer uma periodicidade em manutenções para evitar maiores danos à estrutura.

4.2.3. Comportamento Pós-fadiga

As amostras que suportaram 10^6 ciclos sem colapsar foram ensaiadas monotonicamente após o ensaio de fadiga, considerando-se a mesma taxa de abertura de fissura do ensaio monotônico, igual 0,2 mm/min, até se atingir o limite de CMOD igual a 4 mm. Os resultados podem ser observados na Tabela 4.15, que apresenta: carga residual correspondente à abertura de 0,5 mm ($P_{0,5\text{mm}}$) na pré-fissuração e a tensão correspondente ($f_{R,1}$); abertura de fissura inicial (CMOD_i) e final (CMOD_f) do ensaio de fadiga; variação da abertura de fissura (ΔCMOD); rigidez inicial (k_0) e final dos ciclos (k_f); carga máxima (P_{PF}), tensão máxima (f_{PF})

pós-fadiga e a respectiva abertura em que ela ocorre ($CMOD_{PF}$); tensão $f_{R,3}$; e a razão entre $f_{R,3}$ e $f_{R,1}$, a qual classifica a resistência pós pico segundo a EN 14651 [43].

Tabela 4.15 - Parâmetros de resistência à flexão pós-fadiga do CUAD

Amostra	$P_{0,5mm}$ (kN)	$f_{R,1}$ (MPa)	$CMOD_i$ (mm)	$CMOD_f$ (mm)	$\Delta CMOD$ (mm)	k_0 (kN/mm ²)	k_f (kN/mm ²)	P_{PF} (kN)	f_{PF} (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$\frac{f_{R,3}}{f_{R,1}}$ -
80-CP1	22,75	16,53	0,3692	0,5472	0,1780	197,9	129,3	22,96	16,68	11,60	0,70
70-CP1	13,24	10,05	0,3753	0,4022	0,0269	129,1	101,1	13,35	10,13	7,11	0,74
70-CP2	15,33	11,14	0,3945	0,4206	0,0261	177,7	152,6	15,67	11,38	7,30	0,66
70-CP3	12,18	8,94	0,3474	0,3728	0,0254	101,2	94,3	13,40	9,83	5,61	0,63
50-CP1	22,67	17,04	0,3476	0,3602	0,0126	220,1	213,1	25,04	18,82	14,36	0,84
50-CP2	15,49	11,79	0,3388	0,3571	0,0183	135,5	129,4	16,73	12,73	9,29	0,79
50-CP3	15,85	11,63	0,3902	0,3974	0,0072	191,1	183,3	15,93	11,69	6,14	0,53

As Figuras 4.26, 4.27, 4.28 e 4.29 apresentam o comportamento médio do ensaio de flexão monotônico e os resultados da pré-fissuração, primeiro e último ciclos e flexão pós-fadiga para as amostras que apresentaram $f_{R,1}$ semelhante: 80-CP1 e 50-CP1, 50-CP2 e 70-CP2. As siglas PF, CI, CF e FL indicam pré-fissuração, ciclo inicial, ciclo final e flexão pós fadiga, respectivamente. Como observado na Tabela 4.15, há um aumento da abertura de fissura após o ensaio de fadiga, o que indica um aumento do dano nas amostras, sendo maior quanto maior o percentual de carga. A semelhança entre as curvas do ensaio pós-fadiga e do ensaio estático de caracterização indicam um comportamento próximo do material nas duas condições, permitindo inferir que o ensaio de fadiga não comprometeu a capacidade de resistência das amostras. Além disso, verificou-se que a carga máxima pós fadiga P_{PF} superou a carga residual $P_{0,5mm}$, como observado também por outros autores [9, 14, 16, 18, 44]. Segundo estes, quando o CRF é submetido a fadiga abaixo de seu limite de proporcionalidade, ocorre um aumento na resistência potencial à flexão.

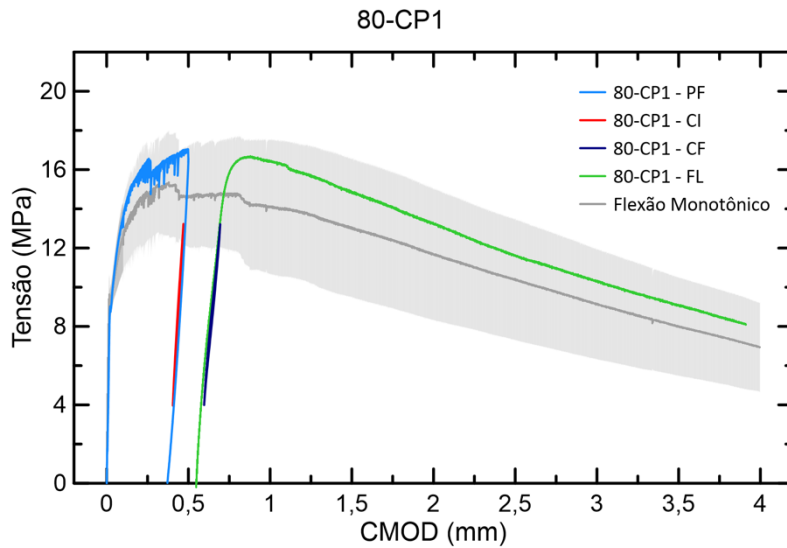


Figura 4.26 - Resposta no ensaio de fadiga na flexão e pós fadiga - Amostra 80-CP1

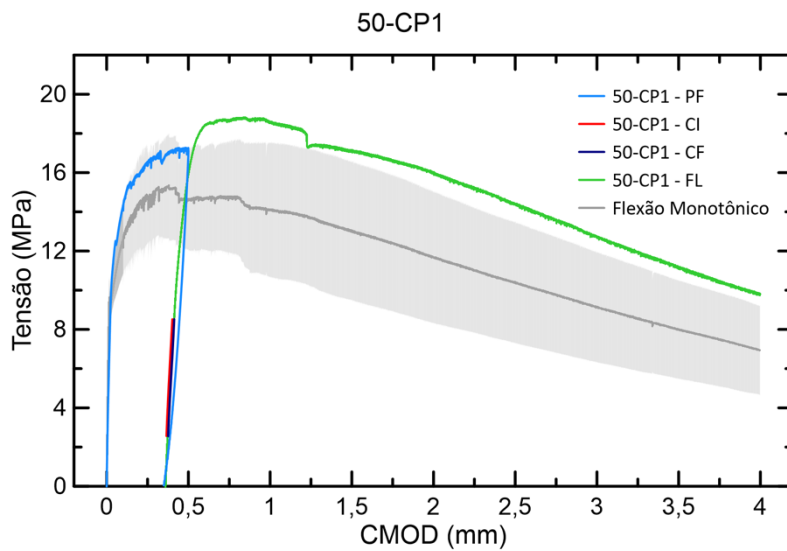


Figura 4.27 - Resposta no ensaio de fadiga na flexão e pós fadiga - Amostra 50-CP1

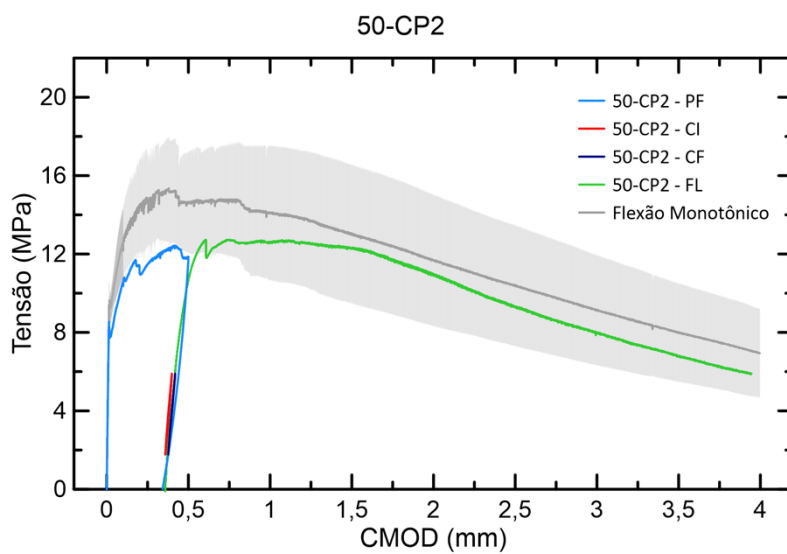


Figura 4.28 - Resposta no ensaio de fadiga na flexão e pós fadiga - Amostra 50-CP2

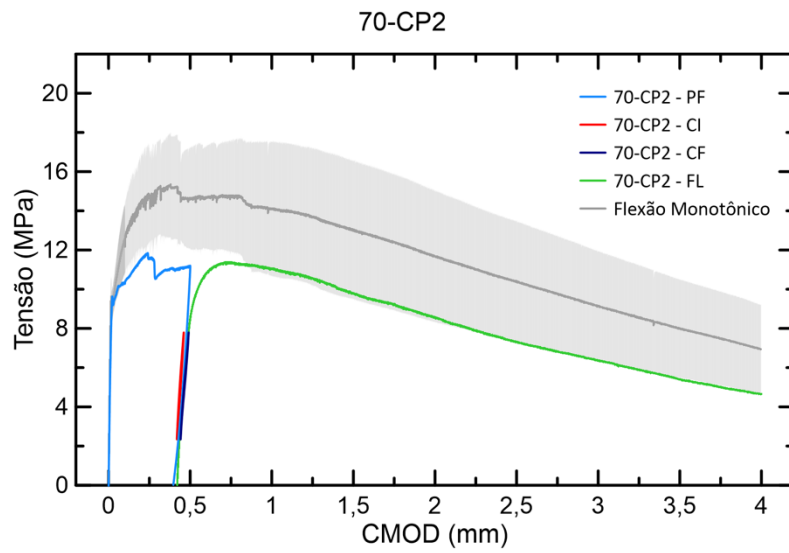


Figura 4.29 - Resposta no ensaio de fadiga na flexão e pós fadiga - Amostra 70-CP2

5. Conclusão

5.1. Conclusão

Na primeira parte deste trabalho realizou-se uma revisão da literatura sobre o concreto de ultra-alto desempenho, abordando sua definição, suas principais características e aplicações e seu comportamento sob fadiga na flexão. Pelo fato de o material não ter sido amplamente estudado nessas condições, incluiu-se na revisão para o uso de concretos reforçados com fibras e de alto desempenho sob fadiga na flexão. Optou-se por apresentar primeiramente esses materiais a fim de promover uma visão mais generalizada seguida de uma mais específica, envolvendo o CUAD.

Foram então executados ensaios de caracterização do material. Para o estado fresco, realizou-se o ensaio de espalhamento, que indicou ótima trabalhabilidade, contando com boa distribuição das fibras e ausência de segregação ou exsudação. Em relação ao estado endurecido, foram executados ensaios de compressão axial, aferindo a resistência à compressão média (132,3 MPa) e o módulo de elasticidade médio (49,5 GPa) do material, bem como ensaios à flexão de três pontos, sendo constatado um comportamento de *deflection hardening*, resistência média de 15,6 MPa e uma ruptura predominantemente por arrancamento das fibras. Houve uma certa variabilidade entre as amostras, característica de concretos reforçados com fibras devido à distribuição e orientação aleatória das fibras na seção transversal. Algumas discrepâncias entre os resultados obtidos e os estudados anteriormente por Lima [50] para o mesmo traço de concreto foram observadas, podendo ser atribuídas a diferenças entre os fabricantes dos materiais, procedimentos e equipamentos de mistura, e à sensibilidade do concreto aos efeitos de temperatura e umidade no caso do espalhamento.

Em relação aos ensaios de fadiga na flexão, houve ruptura de amostras apenas para os percentuais de carga de 80% e 90%, enquanto para 50% e 70% de $f_{R,I}$ não houve ruptura ou grandes variações na abertura da fissura ao longo de 1.000.000 de ciclos. A amostra 80-CP3 não chegou a romper, mas apresentou evolução considerável de CMOD, dando indícios de aproximação da ruptura. Foi observado que quanto maior o limite de carga, menor o número de ciclos para a

ruptura e maior a evolução de CMOD no caso das amostras que não romperam. Assim como no ensaio de flexão monotônico, foi observada uma variabilidade nos resultados da tensão residual obtida na etapa de pré-fissuração das amostras. Logo, quanto maior a quantidade de fibras na seção transversal, maior o valor da resistência residual e da rigidez inicial, sendo maior também a recuperação da deformação sofrida após o ensaio de pré-fissuração no momento que antecede o ensaio de fadiga.

Para o comportamento da abertura de fissura ao longo dos ciclos, segundo a curva de fluência cíclica, foram observadas as fases II e III, que caracterizam um aumento constante de CMOD seguido de uma evolução mais intensa rumo à ruptura, demarcada em 80% da vida à fadiga da amostra (denotada pelo ciclo N). Identificou-se também um aumento súbito de CMOD no ciclo relativo em torno de 90% para o nível de tensão de 90% e 95% para o nível de tensão de 80% de $f_{R,I}$. Para as amostras que não romperam apenas a fase II foi identificada.

Avaliando-se a degradação mecânica do concreto de ultra-alto desempenho ao longo do ensaio de fadiga em termos da retenção de rigidez, equivalente à razão entre a rigidez de cada ciclo e a rigidez inicial, foi observado um comportamento inicialmente linear, seguido de uma redução mais intensa e súbita até a ruptura. Adotou-se o comportamento linear como uma aproximação para se estimar a ruptura do CUAD, segundo os limites de retenção de rigidez iguais a 85%, para amostras submetidas ao limite máximo de 90% de $f_{R,I}$, e 70%, para o limite de 80% de $f_{R,I}$. O comportamento médio das amostras para cada faixa de tensão foi tomado como referência. Em seguida, a partir dessas relações, foram associados o limite de tensão aplicado (σ), o número de ciclos e a retenção de rigidez (R), delineando-se equações para a determinação da vida à fadiga do CUAD.

Considerando-se os limites de retenção de rigidez estabelecidos para a vida à fadiga segundo o carregamento máximo aplicado no ensaio cíclico, tem-se que a ruptura se dá em limites menores para cargas menores, de modo que o limite de retenção de rigidez para níveis superiores possa ser utilizado como referência para prever a ruptura de amostras submetidas a limites inferiores. Logo, a equação característica para 80% de $f_{R,I}$ pôde ser utilizada para se determinar a vida à fadiga do concreto sob tensões de 70% e 50%, sendo uma referência também para outras tensões menores. Da mesma forma, a equação de 90% foi utilizada para se determinar a vida à fadiga para tensões entre 80% e 90%. O limite de fadiga obtido

para o concreto de ultra-alto desempenho foi igual a 75,3% de $f_{R,I}$, significativamente superior aos estabelecidos para outros concretos na literatura, com valores em torno de 65%. Para os ensaios de flexão pós-fadiga das amostras que não sofreram ruptura, verificou-se um comportamento semelhante ao da flexão monotônico e ainda uma superioridade da resistência pós-fadiga em relação à resistência residual na pré-fissuração, o que indica que o processo não gerou danos suficientes ao material para comprometer sua capacidade de resistência.

Os resultados analíticos obtidos para a vida à fadiga do concreto de ultra-alto desempenho apresentaram boa aderência aos resultados médios experimentais, validando assim o modelo proposto. Ressalta-se que estudos mais aprofundados devem ser realizados para contabilização da elevada dispersão característica dos ensaios de fadiga e do próprio material, como a orientação e distribuição das fibras ao longo da seção transversal, e garantia de um modelo capaz de representar a fadiga no concreto com segurança e confiabilidade adequados. Em relação ao comportamento pós fadiga, o desempenho das amostras reafirma a ideia de que o uso de carregamentos abaixo do limite de fadiga não gera danos ao material, de modo que sua ruptura não irá ocorrer sob o mecanismo.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Realizar ensaios de fadiga incluindo mais amostras e níveis intermediários de carregamento para determinar as curvas S-N.
- Investigar a influência da amplitude nos resultados dos ensaios de fadiga, adotando-se diferentes limites mínimos.
- Incorporar análises estatísticas ao modelo para melhorar a precisão dos resultados, encontrando meios de contabilizar a variabilidade dos resultados.
- Realizar estudo semelhante envolvendo diferentes concretos/materiais buscando a aplicabilidade de um modelo generalizado.

6. Referências Bibliográficas

- [1] SCHMIDT, M.; FEHLING, E. Ultra-high-performance concrete: Research, development and application in Europe. **Seventh International Symposium Ultra High Strength/High-Performance Concrete**. pp. 51–78, 2005.
- [2] SHI C.; WU Z.; XIAO J; WANG, D.; HUANG, Z.; FANG, Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. **Construction and Building Materials** vol. 101, pp. 741–751, 2015.
- [3] AZMEE, N. M.; SHAFIQ, N. Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. **Case Studies in Construction Materials**, vol 9, 2018.
- [4] VOO, Y. L.; FOSTER, S.; PEK, L. G. Ultra-high performance concrete - Technology for present and future. **ACI Singapore**, Build. Constr. Auth. Jt. Semin. Concr. Sustain. Product. Futur. 2017.
- [5] WANG, D.; SHI, C.; WU, Z.; XIAO, J.; HUANG, Z.; FANG, Z. A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties. **Construction and Building Materials**, vol. 96, pp. 368–377, 2015.
- [6] GU, C. P.; YE, G.; SUN, W. Ultra-high performance concrete-properties, applications and perspectives. **Science China Technological Sciences**, vol. 58, pp. 587–599, 2015.
- [7] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading**. United States, 1997.
- [8] GERMANO, F.; TIBERTI, G.; PLIZZARI, G. Post-peak fatigue performance of steel fiber reinforced concrete under flexure. **Materials and Structures**, vol. 49, pp. 4229–4245, 2016.
- [9] CARLESSO D. M.; DE LA FUENTE, A.; CAVALARO, S. H. P. Fatigue of cracked high performance fiber reinforced concrete subjected to bending. **Construction and Building Materials**, vol. 220, pp. 444–455, 2019.
- [10] STEPHEN S. J.; GETTU, R. Fatigue fracture of fibre reinforced concrete in flexure. **Materials and Structures**, vol. 53, 2020.
- [11] NIU, Y.; HUANG, H.; WEI, J.; JIAO, C.; MIAO, Q. Investigation of fatigue crack propagation behavior in steel fiber-reinforced ultra-high-performance concrete (UHPC) under cyclic flexural loading. **Composite Structures**, vol. 282, pp. 115–126, 2022.

- [12] KRAHL P. A.; CARRAZEDO, R.; EL DEBS, M. K. Mechanical damage evolution in UHPFRC: Experimental and numerical investigation. **Engineering Structures**, vol. 170, pp. 63–77, 2018.
- [13] GONZÁLEZ, D. C.; MORADILLO, R.; MÍNGUEZ, J.; MARTÍNEZ, J. A.; VICENTE, M. A. Postcracking residual strengths of fiber-reinforced high-performance concrete after cyclic loading. **Structural Concrete**, vol. 19, pp. 340–351, 2018.
- [14] NAAMAN, A. E.; HAMMOUD, H. Fatigue characteristics of high performance fiber-reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, vol. 20, pp. 353–363, 1998.
- [15] LAPPA, E. S.; BRAAM, R. C.; WALRAVEN, J. C. Flexural Fatigue of High and Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete. Interntional RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications, **RILEM Publications SARL**, pp. 509–518, 2006.
- [16] PARANT, E.; ROSSI, P.; BOULAY, C. Fatigue behavior of a multi-scale cement composite. **Cement and Concrete Research**, vol. 37, pp. 264–269, 2007.
- [17] BOULEKBACHE, B.; HAMRAT, M.; CHEMROUK, M.; AMZIANE, S. Flexural behaviour of steel fibre-reinforced concrete under cyclic loading. **Construction and Building Materials**, vol. 126, pp. 253–262, 2016.
- [18] RAMAKRISHNAN, V.; WU, G. Y.; HOSALLI, G. Flexural fatigue strength, endurance limit, and impact strength of fiber reinforced concretes. **Transportation Research Record**, vol. 1226, pp. 17–24, 1989.
- [19] NANNI, A. Fatigue behaviour of steel fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, vol. 13, pp. 239–245, 1991.
- [20] BANJARA, N. K.; RAMANJANEYULU, K. Experimental Investigations and Numerical Simulations on the Flexural Fatigue Behavior of Plain and Fiber-Reinforced Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 30 (8): 04018151, 2018.
- [21] OH, B. H. Fatigue Analysis of Plain Concrete in Flexure. **Journal of Structural Engineering**, vol. 112, pp. 273–288, 1986.
- [22] TARIFA, M.; RUIZ, G.; POVEDA, E.; ZHANG, X.; VICENTE, M. A.; GONZÁLEZ, D. C. Effect of uncertainty on load position in the fatigue life of steel-fiber reinforced concrete under compression. **Materials and Structures**, vol. 51, p. 31, 2018.
- [23] CAVALARO, S. H. P.; AGUADO, A. Intrinsic scatter of FRC: an alternative philosophy to estimate characteristic values. **Materials and Structures**, vol.

- 48, pp. 3537–3555, 2015.
- [24] ZHOU, M.; LU, W.; SONG, J.; LEE, G. C. Application of Ultra-High Performance Concrete in bridge engineering. **Construction and Building Materials**, vol. 186, pp. 1256–1267, 2018.
- [25] SRITHARAN, S. Design of UHPC structural members: Lessons learned and ASTM test requirements. **Advanced Civil Engineering Materials**, vol. 4, pp. 113–131, 2015.
- [26] ASSOCIATION FRANCAISE DE GÉNIE CIVIL. **French Interim Recommendations of Ultra-high Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)**, 2002.
- [27] Sritharan, S.; Schmitz, G. M. Design of Tall Wind Turbine Towers Utilizing UHPC. **RILEM-fib-AFGC International Symposium of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete**, pp. 433–442, 2013.
- [28] RESEARCHGATE. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Vic_Perry/publication/340065779/figure/fig1/AS:871243876143105@1584732135926/Sherbrooke-Pedestrian-Bridge.jpg>. Acesso em: 7 Mar. 2022.
- [29] TEMPODACQUA. Disponível em: <<https://tempodacqua.com/il-ponte-di-seonyudo-the-footbrigde-of-peace/>>. Acesso em: 7 Mar. 2022.
- [30] DLEGEND. Disponível em: <<http://www.dlegend.com.br/blog/fundacaolouis-vuitton-em-paris-um-local-dedicado-a-arte/>>. Acesso em: 7 Mar. 2022.
- [31] MIKES TRAVEL GUIDE. Disponível em: <<http://mikestravelguide.com/things-to-do-in-marseille-visit-mucem-andfort-saint-jean/>>. Acesso em: 7 Mar. 2022.
- [32] STADIUM DB. Disponível em: <http://stadiumdb.com/designs/fra/stade_jean_bouin>. Acesso em: 7 Mar. 2022.
- [33] SHAFIEIFAR, M.; FARZAD, M.; AZIZINAMINI, A. Experimental and numerical study on mechanical properties of Ultra High Performance Concrete (UHPC). **Construction and Building Materials**, vol. 156, pp. 402–411, 2017.
- [34] HUNG, C. C.; CHEN, Y. T.; YEN, C. H.; Workability, fiber distribution, and mechanical properties of UHPC with hooked end steel macro-fibers. **Construction and Building Materials**, vol. 260, 119944, 2020.
- [35] MENG, W.; KHAYAT, K. H. Effect of Hybrid Fibers on Fresh Properties, Mechanical Properties, and Autogenous Shrinkage of Cost-Effective UHPC. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 30, 04018030, 2018.
- [36] YOO, D. Y.; SHIN, H. O.; YANG, J. M.; YOON, Y. S. Material and bond

- properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers. **Composites: Part B**, vol 58, pp. 122–133, 2014.
- [37] AHMAD, S.; HAKEEM, I.; AZAD, A. K. Effect of curing, fibre content and exposures on compressive strength and elasticity of UHPC. **Advances in Cement Research**, vol. 27, pp. 233–239, 2015.
- [38] LE HOANG, A.; FEHLING, E. Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 153, pp. 790–806, 2017.
- [39] ROBERTI, F.; CESARI, V. F.; DE MATOS, P. R.; PELISSER, F.; PILAR, R. High- and ultra-high-performance concrete produced with sulfate-resisting cement and steel microfiber: Autogenous shrinkage, fresh-state, mechanical properties and microstructure characterization. **Construction and Building Materials**, vol. 268, 121092, 2021.
- [40] GESOGLU, M.; GÜNEYISI, E.; MUHYADDIN, G. F.; ASAAD, D. S. Strain hardening ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites: Effect of fiber type and concentration. **Composites: Part B**, vol. 103, pp. 74–83, 2016.
- [41] HUANG, H.; GAO, X.; LI, L.; WANG, H. Improvement effect of steel fiber orientation control on mechanical performance of UHPC. **Construction and Building Materials**, vol. 188, pp. 709–721, 2018.
- [42] WU, Z.; SHI, C.; HE, W.; WU, L. Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete. **Construction and Building Materials**, vol. 103:8–14, 2016.
- [43] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 14651** - Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual). Brussels, 2005.
- [44] CHANVILLARD, G.; PIMIENTA, P.; PINEAUD, A.; RIVILLON, P. Fatigue flexural behaviour of pre-cracked specimens of Ductal(R) UHPFRC. **6th International RILEM Symposium of Fiber-reinforced Concrete**, 2004.
- [45] LÖFGREN, I. **Fibre-reinforced concrete for industrial construction - A fracture mechanics approach to material testing and structural analysis**. Göteborg, Sweden, 2005. Thesis - Department of Civil and Environmental Engineering, Structural Engineering, Chalmers University of Technology.
- [46] LEE, M. K.; BARR, B. I. G. An overview of the fatigue behaviour of plain and fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, vol. 26, pp. 299–305, 2004.

- [47] ISOJEH, B. **Fatigue Damage Analysis of Reinforced Concrete Structural Elements**. Toronto, Canada, 2017. Thesis - Department of Civil Engineering, University of Toronto.
- [48] BENTUR, A.; MINDESS, S. **Fibre Reinforced Cementitious Composites**. Second Edition, Taylor & Francis, London and New York, 2007.
- [49] AL-AZZAWI, B. S.; KARIHALOO, B. L. Flexural Fatigue Behavior of a Self-Compacting Ultrahigh Performance Fiber-Reinforced Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, vol. 29, 04017210, 2017.
- [50] LIMA, P. B. **Comportamento mecânico de vigas de concreto de ultra-alto desempenho**. Rio de Janeiro, 2021. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica.
- [51] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697 - Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.
- [52] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248 - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- [53] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653 - Materiais pozolânicos – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.
- [54] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1 - Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019.
- [55] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1 - Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco**. Rio de Janeiro, 2017.
- [56] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2 - Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual - Método do cone de Abrams**. Rio de Janeiro, 2017.
- [57] CASTOLDI, R. DE S. **Propriedades mecânicas e durabilidade de concretos reforçados com fibras de polipropileno e sisal**. Rio de Janeiro, 2018. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica.
- [58] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.
- [59] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522 - Determinação dos módulos de estáticos de elasticidade e de deformação à**

- compressão. Rio de Janeiro, 2017.
- [60] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16940** - Concreto reforçado com fibras - Determinação das resistências à tração na flexão (limite de proporcionalidade e resistências residuais) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2021.
- [61] INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE. **CEB-FIB**, 2010.
- [62] PAJAŁ, M.; PONIKIEWSKI, T. Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. **Construction and Building Materials**, vol. 47, pp. 397–408, 2013.
- [63] Mobasher, B. **Mechanics of fiber and textile reinforced cement composites**. Taylor & Francis, Ney York, 2012.
- [64] ORIGINLAB. **OriginPro**. Versão 2019b, 2019.