

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
MULTIFILAMENTOS DE POLIETILENO DE ALTO MÓDULO (*HMPE*)
SUBMETIDOS À FLUÊNCIA E FADIGA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

TALES LUIZ POPIOLEK JÚNIOR

RIO GRANDE, RS

2024

TALES LUIZ POPIOLEK JÚNIOR

**INVESTIGAÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
MULTIFILAMENTOS DE POLIETILENO DE ALTO MÓDULO (*HMPE*)
SUBMETIDOS À FLUÊNCIA E FADIGA**

Dissertação de mestrado apresentada
ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal do Rio Grande – FURG como
requisito para a obtenção do título de
“Mestre em Engenharia Mecânica”.

Área de Concentração: Materiais Sintéticos

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo
Marcos Guilherme

RIO GRANDE, RS

2024

FICHA CATALOGRÁFICA



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPMec



Ata nº 7/2024 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Ao oitavo dia do mês de março de dois mil e vinte e quatro, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às nove horas, online via web conferência, a que se submeteu o mestrando **Tales Luiz Popiolek Júnior**, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de soldagem e materiais, com o seguinte título: **INVESTIGAÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MULTIFILAMENTOS DE POLIETILENO DE ALTO MÓDULO SUBMETIDOS À FLUÊNCIA E FADIGA**. Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Carlos Eduardo Marcos Guilherme, Kleber Eduardo Bianchi e a convidada Amanda Oliveira sob a presidência do Professor Carlos Eduardo Marcos Guilherme. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Carlos Eduardo Marcos Guilherme: Aprovado
2. Kleber Eduardo Bianchi: Aprovado
3. Amanda Oliveira: Aprovado

Foi concedido um prazo de 30 dias para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

1. _____
CPF: 732.846.700-25

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS EDUARDO MARCOS GUILHERME
Data: 12/03/2024 14:13:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

2. _____
CPF: 440.783.230-49

Documento assinado digitalmente
gov.br KLEBER EDUARDO BIANCHI
Data: 12/03/2024 18:28:41-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

3. _____
CPF: 012.372.664-67

Documento assinado digitalmente
gov.br AMANDA DANTAS DE OLIVEIRA
Data: 04/04/2024 08:47:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Tales Luiz Popiolek Júnior: _____

Documento assinado digitalmente
gov.br TALES LUIZ POPIOLEK JUNIOR
Data: 12/03/2024 19:10:37-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

INVESTIGAÇÃO SOBRE O COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MULTIFILAMENTOS DE POLIETILENO DE ALTO MÓDULO (*HMPE*) SUBMETIDOS À FLUÊNCIA E FADIGA

RESUMO

Os cabos de polietileno de alto módulo (*HMPE*) vêm sendo cada vez mais utilizados em amarrações *offshore* devido ao seu menor peso específico, maior resistência à tração e maior rigidez, que proporcionam diversas vantagens técnicas e operacionais quando comparados aos tradicionais cabos de poliéster. Porém, diferentemente do poliéster, o *HMPE* é bastante sensível à fluência, mesmo na temperatura do mar. Ademais, para prever a vida útil dos cabos de amarração de *HMPE*, é essencial que se compreenda não apenas o seu comportamento de fluência, mas também de fadiga. Embora muitos estudos abordem o comportamento de fluência, a literatura ainda carece de estudos que abordem o comportamento de fadiga. A fim de preencher essas lacunas, este trabalho traz à luz resultados de vários ensaios de fluência e de fadiga, ao nível de multifilamento, com diferentes condições de carregamento, analisando-os e comparando-os. Em fluência, observou-se que a deformação até a ruptura mantém certa relação linear com o carregamento. Já em fadiga, observou-se que tanto o aumento de frequência quanto o aumento de amplitude diminuem o tempo de vida do material. Além disso, este trabalho também traz uma breve exploração nas regiões de fratura de rupturas oriundas de ensaios de fluência e de fadiga.

Palavras-chave: Cabos de ancoragem. *HMPE*. Fluência. Fadiga.

INVESTIGATION ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF HMPE YARNS SUBJECTED TO CREEP AND TENSILE FATIGUE

ABSTRACT

HMPE ropes have been increasingly used in offshore moorings due to their lower weight, greater tensile strength and greater stiffness, which provide several technical and operational advantages when compared to traditional polyester ropes. However, unlike polyester, HMPE is quite sensitive to creep, even at sea temperatures. Furthermore, to predict the lifetime of HMPE mooring ropes, it is essential to understand not only their creep behavior, but also their fatigue behavior. Although many studies address creep behavior, the literature still lacks studies that address fatigue behavior. In order to fill those gaps, this work brings to light the results of several creep and tensile fatigue tests, at multifilament level, with different loading conditions, analyzing and comparing them. In creep, it was observed that the deformation until failure maintains a certain linear relationship with the loading. Regarding fatigue, it was observed that both the increase in frequency and the increase in amplitude decrease the lifetime of the material. In addition, this work also provides a brief exploration of the fracture regions of ruptures from creep and tensile fatigue tests.

Keywords: Mooring ropes. HMPE. Creep. Fatigue.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura construtiva de um cabo de ancoragem.....	18
Figura 2: Ensaio de tração de um multifilamento de <i>HMPE</i>	19
Figura 3: Curva de fluência característica do <i>HMPE</i>	20
Figura 4: Curvas de fluência do <i>HMPE</i> Dyneema® SK75 com diferentes níveis de carga.....	21
Figura 5: Curvas de fluência do <i>HMPE</i> Dyneema® SK78 com diferentes temperaturas.....	22
Figura 6: Representação de um cabo entrelaçado com olhal.....	25
Figura 7: Fluxograma experimental.....	27
Figura 8: Bobina de multifilamento de <i>HMPE</i>	28
Figura 9: Corpo de prova com terminais tipo “sanduíche”.....	29
Figura 10: INSTRON E3000.....	30
Figura 11: Representação esquemática do ensaio de ruptura.....	31
Figura 12: Quadro dos conjuntos de ensaios de fluência.....	31
Figura 13: EMiC DL2000.....	32
Figura 14: Representação esquemática do ensaio de fluência.....	33
Figura 15: Quadro dos conjuntos de ensaios de fadiga.....	34
Figura 16: Representação esquemática do ensaio de fadiga.....	35
Figura 17: Microscópio Olympus GX51.....	36
Figura 18: Ensaio de fluência com carga de 90% da carga de ruptura.....	40
Figura 19: Ensaio de fluência com carga de 80% da carga de ruptura.....	41
Figura 20: Ensaio de fluência com carga de 70% da carga de ruptura.....	42
Figura 21: Ensaio de fluência com carga de 60% da carga de ruptura.....	43
Figura 22: Ensaio de fluência com carga de 50% da carga de ruptura.....	44
Figura 23: Tempo de vida em fluência em função da carga.....	45
Figura 24: Deformação em fluência em função da carga.....	46
Figura 25: Inclinação da curva em fluência em função da carga.....	47
Figura 26: Ensaio de fadiga com carga de 90 a 70% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.....	48
Figura 27: Ensaio de fadiga com carga de 90 a 50% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.....	49

Figura 28: Ensaios de fadiga com carga de 90 a 30% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.	50
Figura 29: Ensaios de fadiga com carga de 90 a 10% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.	51
Figura 30: Ensaios de fadiga com carga de 70 a 50% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.	52
Figura 31: Ensaios de fadiga com carga de 70 a 30% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.	53
Figura 32: Ensaios de fadiga com carga de 70 a 10% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.	54
Figura 33: Ensaios de fadiga com carga de 50 a 10% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.	55
Figura 34: Ensaios de fadiga com carga de 90 a 70% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.	56
Figura 35: Ensaios de fadiga com carga de 90 a 50% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.	57
Figura 36: Ensaios de fadiga com carga de 90 a 30% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.	58
Figura 37: Ensaios de fadiga com carga de 90 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.	59
Figura 38: Ensaios de fadiga com carga de 70 a 50% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.	60
Figura 39: Ensaios de fadiga com carga de 70 a 30% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.	61
Figura 40: Ensaios de fadiga com carga de 70 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.	62
Figura 41: Ensaios de fadiga com carga de 50 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.	63
Figura 42: Tempos de vida em fluência e fadiga com carga máxima de 90% da carga de ruptura.	64
Figura 43: Tempos de vida em fluência e fadiga com carga máxima de 70% da carga de ruptura.	64
Figura 44: Tempos de vida em fluência e fadiga com carga máxima de 50% da carga de ruptura.	65

Figura 45: Deformação em fluência e fadiga com carga máxima de 90% da carga de ruptura.....	66
Figura 46: Deformação em fluência e fadiga com carga máxima de 70% da carga de ruptura.....	66
Figura 47: Deformação em fluência e fadiga com carga máxima de 50% da carga de ruptura.....	67
Figura 48: Inclinação da curva em fluência e fadiga com carga máxima de 90% da carga de ruptura.....	68
Figura 49: Inclinação da curva em fluência e fadiga com carga máxima de 70% de carga de ruptura.....	68
Figura 50: Inclinação da curva em fluência e fadiga com carga máxima de 50% da carga de ruptura.....	69
Figura 51: Amostra de material retirado da bobina.	72
Figura 52: Amostra de ruptura por fluência com carga de 50% da carga de ruptura (1).....	73
Figura 53: Amostra de ruptura por fluência com carga de 50% da carga de ruptura (2).....	73
Figura 54: Amostra de ruptura por fadiga com carga de 50 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz (1).	74
Figura 55: Amostra de ruptura por fadiga com carga de 50 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz (2).	74
Figura 56: Distribuição bibliográfica por estrato.	82
Figura 57: Distribuição dos artigos por Qualis.....	83
Figura 58: Distribuição dos artigos por ano.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resultados dos ensaios de ruptura.....	39
Tabela 2: Resultados dos ensaios de fluência com carga de 90% da carga de ruptura.....	40
Tabela 3: Resultados dos ensaios de fluência com carga de 80% da carga de ruptura.....	41
Tabela 4: Resultados dos ensaios de fluência com carga de 70% da carga de ruptura.....	42
Tabela 5: Resultados dos ensaios de fluência com carga de 60% da carga de ruptura.....	43
Tabela 6: Resultados dos ensaios de fluência com carga de 50% da carga de ruptura.....	44
Tabela 7: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 70% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.....	48
Tabela 8: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 50% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.....	49
Tabela 9: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 30% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.....	50
Tabela 10: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 10% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.....	51
Tabela 11: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 70 a 50% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.....	52
Tabela 12: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 70 a 30% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.....	53
Tabela 13: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 70 a 10% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.....	54
Tabela 14: Resultados do ensaio de fadiga parcial com carga de 50 a 30% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.....	54
Tabela 15: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 50 a 10% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.....	55
Tabela 16: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 70% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.....	56

Tabela 17: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 50% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.....	57
Tabela 18: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 30% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.....	58
Tabela 19: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.....	59
Tabela 20: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 70 a 50% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.....	60
Tabela 21: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 70 a 30% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.....	61
Tabela 22: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 70 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.....	62
Tabela 23: Resultados do ensaio de fadiga parcial com carga de 50 a 30% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.....	62
Tabela 24: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 50 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.....	63
Tabela 25: Cargas de fluência equivalentes para obtenção dos resultados de fadiga com carga máxima de 90% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.....	70
Tabela 26: Cargas de fluência equivalentes para obtenção dos resultados de fadiga com carga máxima de 90% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.....	70
Tabela 27: Cargas de fluência equivalentes para obtenção dos resultados de fadiga com carga máxima de 70% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.....	71
Tabela 28: Cargas de fluência equivalentes para obtenção dos resultados de fadiga com carga máxima de 70% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.....	71
Tabela 29: Cargas de fluência equivalentes para obtenção dos resultados de fadiga com carga de 50 a 10% da carga de ruptura.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C_{máx}: carga máxima

C_{mín}: carga mínima

CP: corpo de prova

CR: carga de ruptura

Fad.: fadiga

HDPE: *high density polyethylene*

HMPE: *high modulus polyethylene* (polietileno de alto módulo)

LDPE: *low density polyethylene*

LLDPE: *linear low density polyethylene*

PEAD: polietileno de alta densidade

PEBD: polietileno de baixa densidade

PELBD: polietileno linear de baixa densidade

PEUAPM: polietileno de ultra alto peso molecular

PEUBD: polietileno de ultra baixa densidade

PSA: produto semi-acabado

UHMWPE: *ultra high molecular weight polyethylene*

ULDPE: *ultra low density polyethylene*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivo Geral	15
1.2 Objetivos Específicos	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1 Polímeros	16
2.1.1 Polietileno	16
2.1.1.1 Polietileno de Alto Módulo (<i>HMPE</i>).....	17
2.2 Estrutura Construtiva dos Cabos de Ancoragem	18
2.3 Tração e Deformação	19
2.4 Fluência.....	20
2.5 Fadiga	24
2.6 Mecanismos de Falha Adicionais.....	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Material	28
3.1.1 Corpos de Prova	28
3.2 Métodos	29
3.2.1 Ensaio Mecânicos	29
3.2.1.1 Ensaio de Ruptura	30
3.2.1.2 Ensaio de Fluência	31
3.2.1.3 Ensaio de Fadiga	33
3.2.2 Análise Microscópica	35
3.2.3 Considerações	36
3.2.4 Filtragem dos Ensaio	37
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	39
4.1 Resultados dos Ensaio de Ruptura	39
4.2 Resultados dos Ensaio de Fluência	40
4.3 Resultados dos Ensaio de Fadiga.....	47
4.4 Comparação entre os Resultados de Fluência e Fadiga	63
4.5 Correlação entre os Resultados de Fluência e Fadiga	69
4.6 Resultados da Análise Microscópica.....	71
4.7 Discussões.....	75

5. CONCLUSÃO	77
6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	78
7. REFERÊNCIAS.....	79
7.1 Referências Nominais	79
7.2 Referências por Estrato	82
7.3 Referências dos Artigos por Qualis	83
7.4 Referências dos Artigos por Ano.....	83

1. INTRODUÇÃO

A cada dia, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para permitir a exploração de petróleo e gás em águas cada vez mais profundas. Até a década de 90, cabos e correntes de aço eram tradicionalmente utilizados para a amarração de estruturas *offshore*. Porém, a partir de algumas centenas de metros de profundidade, o peso desses cabos e correntes começa a comprometer a flutuabilidade das estruturas (Sudaia, 2015).

Para avançar em profundidades maiores, sistemas de amarração utilizando cabos produzidos com fibras sintéticas foram desenvolvidos e testados. Assim, o poliéster logo se destacou, pois apresenta boa resistência à fadiga, rigidez e propriedades de longo prazo (Smeets; Jacobs; Mertens, 2001). No entanto, além dos 2000 m de profundidade, a alta deformação dos cabos de poliéster se torna um problema, pois permite maiores deslocamentos horizontais, que podem exceder o limite dos *risers* (Vlasblom *et al.*, 2012).

Com o avanço da ciência dos materiais, iniciou-se a produção de fibras sintéticas de alto desempenho (como o polietileno de alto módulo) que, inicialmente, não foram consideradas nos primeiros estudos da década de 90. Hoje, no entanto, o polietileno de alto módulo é considerado o material mais adequado para construção de cabos de ancoragem em águas profundas, pois possui baixo peso específico, alta resistência e alto módulo. Tudo isso permite produzir cabos mais leves, com menor diâmetro e alta rigidez, proporcionando vantagens técnicas e operacionais em relação às tradicionais linhas de amarração de poliéster (Vlasblom *et al.*, 2012).

Apesar do polietileno de alto módulo ser um material com melhor resistência à tração e menor densidade, diferentemente do poliéster, ele é susceptível à fluência até mesmo na temperatura do mar. Esse fato põe em risco o controle da estabilidade das estruturas *offshore* e a confiabilidade de todo o sistema de amarração, tornando-se uma grande preocupação em longo prazo. (Da Costa Mattos; Chimisso, 2011).

Além disso, para prever a vida útil dos cabos de ancoragem de polietileno de alto módulo, é essencial que se compreenda não apenas o seu comportamento de fluência, mas também de fadiga, garantindo uma operação segura e econômica.

Embora a literatura já conte com um bom número de estudos envolvendo a problemática da fluência do polietileno de alto módulo, estudos que tratam sobre a fadiga ainda são bastante escassos.

Então, a partir da necessidade de maior conhecimento e da lacuna bibliográfica sobre o tema, a construção deste trabalho se alicerça.

1.1 Objetivo Geral

Este trabalho possui o objetivo geral de estudar o comportamento mecânico de multifilamentos de *HMPE*, frente aos fenômenos de fluência e de fadiga, com o intuito de destacar informações importantes sobre o seu comportamento em diferentes condições de carga e contribuir para a construção do conhecimento na área de materiais sintéticos empregados na construção de cabos para amarrações *offshore*.

1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- Analisar o comportamento de fluência do *HMPE* com diferentes cargas;
- Analisar o comportamento de fadiga do *HMPE* com diferentes cargas e diferentes frequências;
- Comparar os resultados de fluência e fadiga;
- Analisar a região de fratura de um corpo de prova rompido em um ensaio de fluência e de um corpo de prova rompido em um ensaio fadiga.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Polímeros

A palavra polímero origina-se do grego *poli* (muitos) e *mero* (unidade de repetição). Assim, um polímero é uma macromolécula composta por muitas (dezenas de milhares) de unidades de repetição denominadas meros, ligadas por ligação covalente. A matéria-prima para a produção de um polímero é o monômero, isto é, uma molécula com uma (mono) unidade de repetição (Canevarolo Jr., 2010, p. 21).

Muitas das propriedades físicas dos polímeros são dependentes do comprimento das moléculas, ou seja, de suas massas molares. Como os polímeros apresentam uma larga faixa de valores para a massa molar, é de se esperar uma grande variação em suas propriedades. Isso se mostra vantajoso, pois permite a produção de vários tipos de polímero para atender às mais variadas necessidades em diferentes aplicações (Canevarolo Jr., 2010).

2.1.1 Polietileno

Polietileno é um polímero parcialmente cristalino, flexível, cujas propriedades são influenciadas pela quantidade relativa das fases amorfa e cristalina. As menores unidades cristalinas, lamelas, são planares e consistem em cadeias perpendiculares ao plano da cadeia principal e dobradas em ziguezague, com pouca frequência de defeitos (Coutinho; Mello; Santa Maria, 2003).

A seguir são apresentadas algumas classificações do polietileno baseadas em Canevarolo Jr. (2010):

- O polietileno é um polímero **sintético**, com estrutura química obtida pela polimerização do etileno. O etileno, por sua vez, é proveniente do processo de *cracking* térmico (pirólise a 800°C) da nafta. E a nafta, inicialmente, é proveniente do processo de destilação fracionada do petróleo.

- Também é um **homopolímero**, ou seja, é um polímero cuja cadeia principal é formada por um único mero.
- Além disso, é um polímero **termoplástico**, com a capacidade de amolecer e fluir quando sujeito a um aumento de temperatura e pressão.

Em condições normais, os polímeros etilênicos não são tóxicos, podendo inclusive ser usados em contato com produtos alimentícios e farmacêuticos (Coutinho; Mello; Santa Maria, 2003).

Dependendo das condições reacionais e do sistema catalítico empregado na polimerização, cinco tipos diferentes de polietileno podem ser produzidos:

- Polietileno de baixa densidade (PEBD ou *LDPE*)
- Polietileno de alta densidade (PEAD ou *HDPE*)
- Polietileno linear de baixa densidade (PELBD ou *LLDPE*)
- Polietileno de ultra alto peso molecular (PEUAPM ou *UHMWPE*)
- Polietileno de ultra baixa densidade (PEUBD ou *ULDPE*)

(Coutinho; Mello; Santa Maria, 2003, p. 2).

2.1.1.1 Polietileno de Alto Módulo (*HMPE*)

O polímero estudado neste trabalho é o polietileno de alto módulo. A partir daqui, ele será tratado por seu acrônimo, *HMPE*, do inglês *High Modulus PolyEthylene*, cuja tradução literal é polietileno de alto módulo.

O *HMPE* é uma fibra polimérica de alto desempenho fabricada por um processo chamado “*gel spinning*”, que usa o PEUAPM como matéria-prima. Nesse processo, o PEUAPM é dissolvido em um solvente e suas moléculas se tornam desembaraçadas. Ainda nesse estado, a solução é girada e resfriada para formar filamentos. Devido ao baixo grau de emaranhamento, o material é estirado em uma extensão muito grande, alcançando um nível muito alto de orientação macromolecular, resultando em uma fibra com tenacidade e módulo muito altos. (Van Dingenen, 2001).

A tenacidade geralmente é utilizada para avaliar a resistência de multifilamentos e cabos, sendo determinada pela divisão da carga de ruptura pela massa por unidade de comprimento (N/tex). 1 tex equivale a 1 g/km. Já o módulo, ao invés de ser expresso por força sobre área de seção transversal (Pa), como é

habitual em outras áreas de engenharia, também costuma ser normalizado em N/tex (Del Vecchio; Carter, 2009).

2.2 Estrutura Construtiva dos Cabos de Ancoragem

De forma geral, os cabos de ancoragem possuem configurações estruturais bastante semelhantes. A parte externa é composta por uma capa protetora. Abaixo dessa capa, é enrolado um filtro que impede a entrada de impurezas no interior do cabo. O núcleo do cabo, por sua vez, é composto por subcabos paralelos. Esses são constituídos por pernas, que podem ser trançadas ou torcidas entre si. Já as pernas podem ser compostas por PSAs (produtos semi-acabados), que são cordões formados por um conjunto de multifilamentos torcidos entre si, ou simplesmente por multifilamentos. Por fim, os PSAs ou os multifilamentos que compõem as pernas também são torcidos entre si.

Dessa forma, enquanto a capa e o filtro são responsáveis pela proteção contra danos físicos externos, o arranjo construtivo dos subcabos é responsável pelas propriedades mecânicas do cabo (Belloni, 2019).

A Figura 1 ilustra a estrutura construtiva tradicional de um cabo de ancoragem com todas as suas partes constituintes.

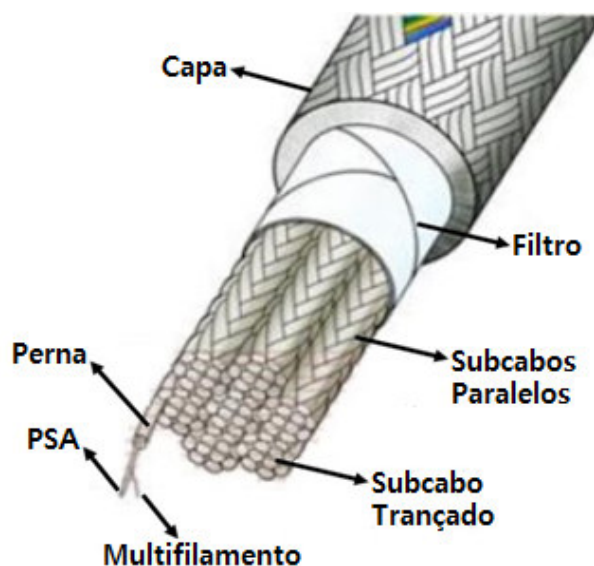


Figura 1: Estrutura construtiva de um cabo de ancoragem.

Fonte: Adaptada de Haach, Poitevin e Bastos (2010).

2.3 Tração e Deformação

Uma das principais funções dos cabos de ancoragem é suportar esforços de tração. E uma das formas mais comuns de caracterizar propriedades mecânicas de materiais é justamente por meio de ensaios de tração. Em geral, os resultados desses ensaios são expressos na forma de gráficos “tensão x deformação”, entretanto, devido à dificuldade de determinar a seção transversal dos multifilamentos de *HMPE*, é comum a utilização da variável “força” ao invés da variável “tensão”.

Dessa forma, a Figura 2 apresenta um gráfico “força x deformação”, resultante de um ensaio de tração de um multifilamento de *HMPE*.

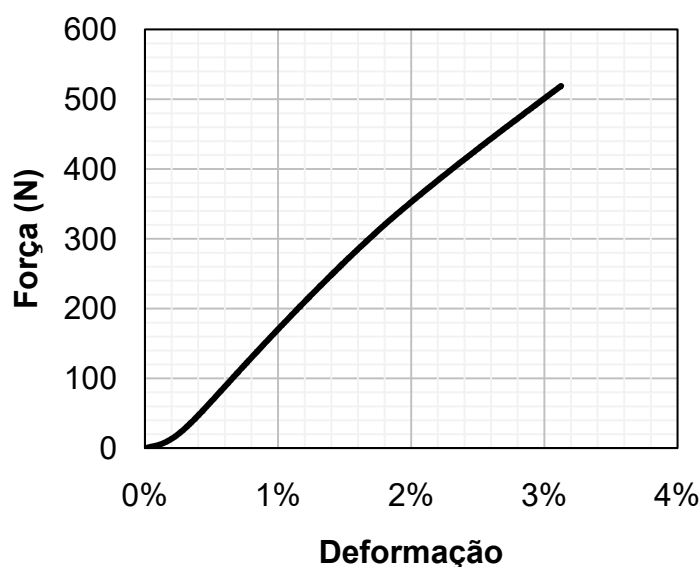


Figura 2: Ensaio de tração de um multifilamento de *HMPE*.

Fonte: Elaboração própria.

Observando apenas o gráfico, durante o ensaio, a força registrada manteve certa proporcionalidade com a deformação, e o *HMPE* apresentou um comportamento de material frágil. Todavia, nem sempre ensaios de curta duração, como o ensaio de tração, são suficientes para a caracterização mecânica de um material para determinada aplicação.

O *HMPE*, como outros polímeros, é um material viscoelástico, ou seja, ele apresenta um comportamento viscoso superposto a um comportamento elástico

(Canevarolo Jr.,2010). Assim, a sua deformação não varia apenas em função da força aplicada, mas também em função do tempo e da temperatura, sendo necessários ensaios de longa duração, como o ensaio de fluência, para uma determinação mais precisa de seu comportamento para aplicações como amarrações *offshore*.

2.4 Fluência

“Fluência é uma deformação lenta e contínua de um material sob tensão constante” (Findley; Lai; Onaran, 1976, p. 3, tradução própria). Essa deformação pode levar o material à ruptura com tensões abaixo da tensão de ruptura e é dependente do tempo, da força e da temperatura.

Segundo Humeau *et al.* (2018), o comportamento de fluência dos multifilamentos de *HMPE* é uma questão bem compreendida e pode ser descrito em três fases (Figura 3):

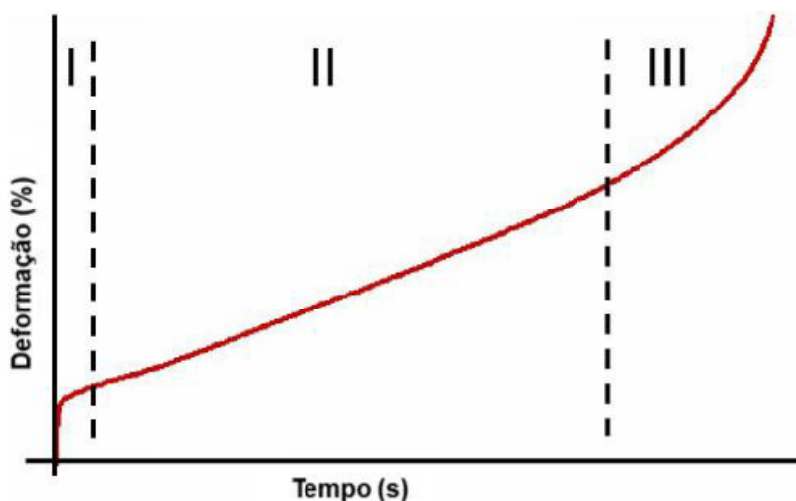


Figura 3: Curva de fluência característica do *HMPE*.

Fonte: Adaptada de Vlasblom e Bosman (2006).

- I. Fase de fluência primária: representa a deformação elástica retardada induzida pelo estiramento de segmentos de cadeia não cristalina. Esse alongamento segue uma lei logarítmica em relação ao tempo, é proporcional

à tensão aplicada e é totalmente reversível se for dado o tempo suficiente para a recuperação.

- II. Fase de fluência secundária: traduz o deslizamento das cadeias moleculares. A tensão é proporcional ao tempo e pode ser representada usando uma lei de potência da tensão (com um valor de potência dependente do grau do *HMPE*: cristalinidade, orientação...).
- III. Fase de fluência terciária: começa quando o primeiro filamento se rompe e pode ser interpretada como um mecanismo de falha autoamplificador, ou seja, as falhas de filamento e tensão se amplificam entre si. Não é modelada devido à alta variabilidade de um espécime para outro e é governada por estatísticas de falha de filamento.

Na Figura 4, a evolução da fluência em multifilamentos de *HMPE* carregados com diferentes percentuais da carga de ruptura pode ser analisada. Assim, nota-se que quanto maior é a carga, maior é a deformação ao longo do tempo, ou seja, maior é a taxa de fluência e a inclinação da curva.

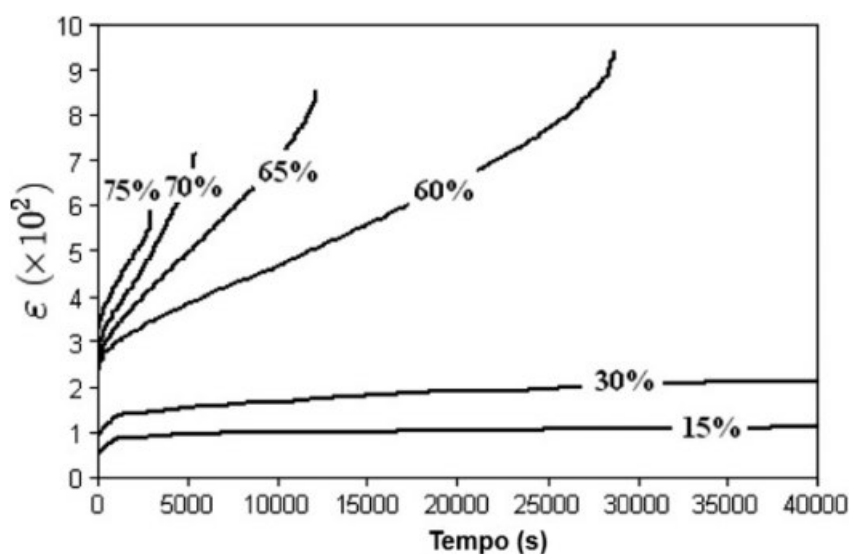


Figura 4: Curvas de fluência do *HMPE* Dyneema® SK75 com diferentes níveis de carga.

Fonte: Adaptada de Da Costa Mattos e Chimisso (2011).

Já a dependência da fluência do *HMPE* em relação à temperatura pode ser observada nas curvas da Figura 5. Nela, nota-se que quanto maior é a temperatura, maior é a taxa de fluência.

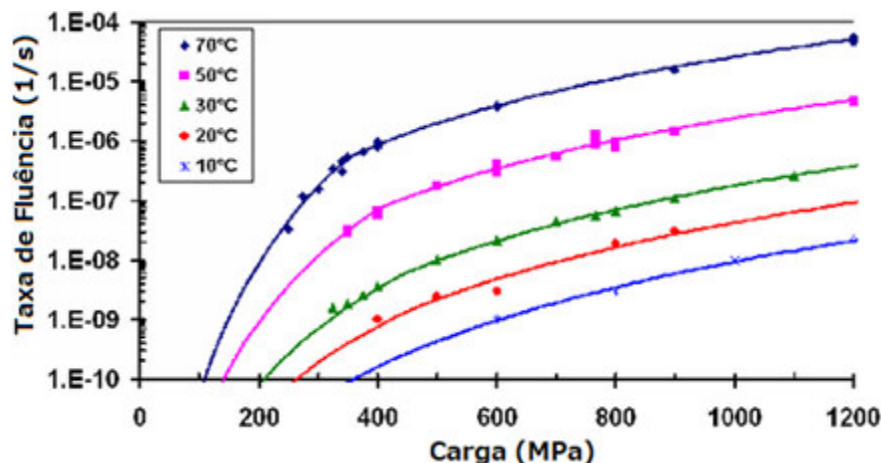


Figura 5: Curvas de fluência do *HMPE* Dyneema® SK78 com diferentes temperaturas.

Fonte: Adaptada de Vlasblom e Bosman (2006).

Tendo em vista a complexidade do mecanismo de fluência do *HMPE*, ao longo dos anos, diversos pesquisadores vêm trabalhando para modelar e prever o seu comportamento (mesmo antes da sua aplicação em amarrações *offshore* e do seu atual estágio de desenvolvimento). Alguns dos trabalhos desses pesquisadores, específicos sobre a fluência do *HMPE*, são apresentados a seguir:

Wilding e Ward (1978) estudaram o comportamento de fluência e recuperação de dois tipos de polietileno linearmente orientado, produzidos com diferentes taxas de estiramento e pesos moleculares. A fluência e a recuperação dos materiais foram modeladas para diferentes níveis de tensão por uma simples representação linear, embora o comportamento viscoelástico seja marcadamente não linear. Isso permitiu uma clara distinção entre a fluência recuperável e irrecuperável, ambas afetadas pela taxa de estiramento e pelo peso molecular. Além disso, os autores sugerem diferentes mecanismos de fluência para polietilenos com baixo e alto peso molecular.

Wilding e Ward (1981; 1984) ainda demonstram que os comportamentos de fluência e relaxamento do polietileno linearmente orientado podem ser satisfatoriamente descritos por um modelo no qual dois processos termicamente ativados atuam em paralelo.

Govaert, Bastiaansen e Leblans (1993) estudaram o comportamento de deformação dependente do tempo do *HMPE* Dyneema® SK66 usando testes mecânicos estáticos e dinâmicos. Um modelo matemático foi proposto, no qual a deformação total da fibra é considerada como a composição de uma componente

elástica linear retardada e uma componente de escoamento plástico não linear. As características termorreológicas da contribuição elástica retardada foram obtidas usando análise térmica dinâmico-mecânica e a componente de escoamento plástico não linear foi caracterizada separadamente usando experimentos de fluência de longo prazo.

Smeets, Jacobs e Mertens (2001) apresentaram um modelo para a fluência do *HMPE* Dyneema® SK75, em nível de multifilamento, e mostraram que é possível a adaptação desse modelo para cabos, independentemente de sua construção. Com a intenção de qualificar o material para operações na indústria *offshore*, foi proposto um critério de descarte para cabos com alongamento permanente superior a 10%, o que assegura que nenhuma perda de resistência ocorra devido à fluência.

Vlasblom e Bosman (2006) apresentaram um modelo para a fluência do *HMPE* Dyneema® SK78 que busca prever a taxa de fluência em várias faixas de temperatura e estimar a sua vida útil. O critério de descarte do material com 10% de alongamento permanente continua a ser sugerido, mas combinado com um tempo máximo de uso sob condições de carregamento específicas.

Da Costa Mattos e Chimisso (2011) trataram da modelagem fenomenológica de testes de fluência em multifilamentos de *HMPE*. Numa abordagem macroscópica, além das variáveis clássicas (tensão e deformação), introduziram uma variável escalar adicional relacionada ao dano induzido pelo processo de fluência e também propuseram uma lei de evolução para essa variável.

Humeau *et al.* (2018), baseados nos estudos de Coleman (1956) e Janssen, Govaert e Meijer (2008), incorporaram ao seu trabalho a hipótese de que a falha por fluência do *HMPE* ocorre quando a deformação plástica atinge um valor crítico, independentemente do carregamento.

Lian *et al.* (2018) desenvolveram um modelo acoplando viscoelasticidade, viscoplasticidade e viscodano, no âmbito da termodinâmica, para descrever o comportamento de fluência de amostras de *HMPE*. No geral, os resultados obtidos se mostraram satisfatórios.

Da Cruz *et al.* (2022) avaliaram o comportamento de fluência de três tipos de *HMPE* (SW85ST, LCYSW75 e JX99) por meio de testes realizados com duas cargas e duas temperaturas distintas. Como destaques, na esfera dos resultados obtidos, o *HMPE* com menor fluência foi o LCYSW75 e a temperatura apenas alterou o tempo até a falha, mas não o alongamento máximo.

Da Cruz *et al.* (2023) também avaliaram o comportamento de fluência de seis tipos de *HMPE*, em diferentes condições de carga e temperatura, sendo que três deles tinham a designação *low creep* (baixa fluência). Os resultados mostraram que, de fato, as fibras *low creep* apresentaram menores taxas de fluência, entretanto, eram mais caras.

Por fim, Da Cruz *et al.* (2024) descreveram a caracterização do *HMPE* J200, determinando título, carga de ruptura, tenacidade, curvas de fluência e resultados de desgaste da interação fio com fio, vislumbrando a utilização de sistemas de amarração *offshore* constituídos exclusivamente por cabos de *HMPE*.

2.5 Fadiga

Fadiga é:

[...] o processo de mudança estrutural localizada, progressiva e permanente que ocorre em um material sujeito a condições que produzem tensões e deformações flutuantes em algum ponto ou pontos e que pode culminar em fissuras ou fratura completa depois de um número suficiente de flutuações (ASTM E 1823-05, 2005, p. 6, tradução própria).

Kanters, Kurokawa e Govaert (2016) destacam dois mecanismos de falha para polímeros:

- Propagação de trincas;
- Deformação plástica.

O mecanismo de propagação de trincas é dependente da tensão e da frequência. Já o mecanismo de deformação plástica é dependente da tensão e independente da frequência.

Nessa linha, Humeau *et al.* (2018) relatam que, no caso dos multifilamentos de *HMPE*, a alta orientação das fibras torna o mecanismo de propagação de trincas pouco provável. Então a falha por fadiga é atribuída ao mecanismo de deformação plástica, visto que ele parece dominar a performance de carregamento de longo prazo. Assim, se a falha é governada pela deformação plástica, ou seja, pela fluência, e nenhum outro mecanismo interferir, o tempo até a falha é independente da frequência e só depende do carregamento.

Porém, em condições reais, desgaste (atrito entre os filamentos) e abrasão (atrito com superfícies externas) são mecanismos de degradação, relacionados à fadiga, que alteram o tempo de vida do material.

Relacionado a isso, Mandell (1987) comparou e analisou dados de fadiga de diversos cabos marinhos de *nylon* e poliéster. Ele afirma que falhas com cargas acima de 30-40% da carga de ruptura nominal para o *nylon* e de 60-70% para o poliéster podem ser previstas por um modelo baseado no comportamento de ruptura por fluência de multifilamentos. Por outro lado, foi verificado que falhas com cargas abaixo de 5% e altos ciclos ocorriam por desgaste ou abrasão, que também podem ser previstas por um modelo de comportamento para essas situações.

Aprofundando-se mais nas falhas por fadiga analisadas por Mandell (1987), salienta-se que, nas cargas mais altas, a maioria das rupturas ocorria próxima à região de entrelaçamento e, nas cargas mais baixas e com altos ciclos, as rupturas usualmente ocorriam na região de contato do olhal. Contudo, quando havia proteção na região do olhal, as rupturas também ocorriam na região de entrelaçamento (Figura 6).

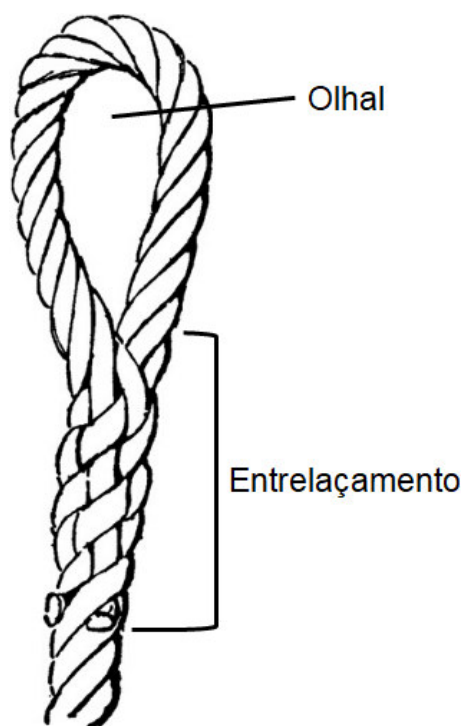


Figura 6: Representação de um cabo entrelaçado com olhal.

Fonte: Adaptada de Ropes Direct (2024).

No entanto, com relação à fadiga em cabos de *HMPE*, poucos estudos são encontrados. Entre eles está o trabalho de Lian *et al.* (2017), no qual um procedimento experimental foi realizado, mostrando o processo de fadiga em cabos *HMPE*. Além disso, foi proposta uma expressão empírica que estabelece a relação entre carga média, amplitude e vida em fadiga para descrever a evolução dos danos sob carregamentos cíclicos de longo prazo.

Humeau *et al.* (2018) também deram a sua contribuição afirmando que o tempo de vida de cabos de *HMPE* sob esforços cíclicos pode ser previsto com sucesso com base no conhecimento adequado do desempenho do multifilamento sob fluência. Para isso, modelos de falha sob condições de carga estática precisariam ser modificados para levar em conta cargas dinâmicas. Isso seria feito com a inclusão de um fator de deslocamento dinâmico, dependente apenas da amplitude da carga e de um parâmetro de material.

2.6 Mecanismos de Falha Adicionais

Humeau *et al.* (2018) destacam mecanismos de falha adicionais que podem interferir nos resultados de ensaios mecânicos de cabos e multifilamentos:

- Abrasão (atrito do corpo de prova contra os dispositivos de fixação);
- Desgaste (atrito entre os filamentos);
- Processos de aquecimento interno.

Em relação à abrasão, é dito que a falha é inteiramente ditada pelo número de ciclos, sem influência da frequência. Já em relação ao aquecimento interno, além do calor gerado pelo atrito, existe a dissipação de energia dos ciclos histeréticos criados pelo comportamento viscoelástico do *HMPE*.

Esses mecanismos de falha adicionais são mais evidentes em ensaios de curto prazo, que normalmente são realizados com altas cargas e frequências.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para atingir os objetivos propostos. O fluxograma da Figura 7 apresenta uma visão geral dos experimentos e análises, e explicações detalhadas são apresentadas nos subcapítulos seguintes.

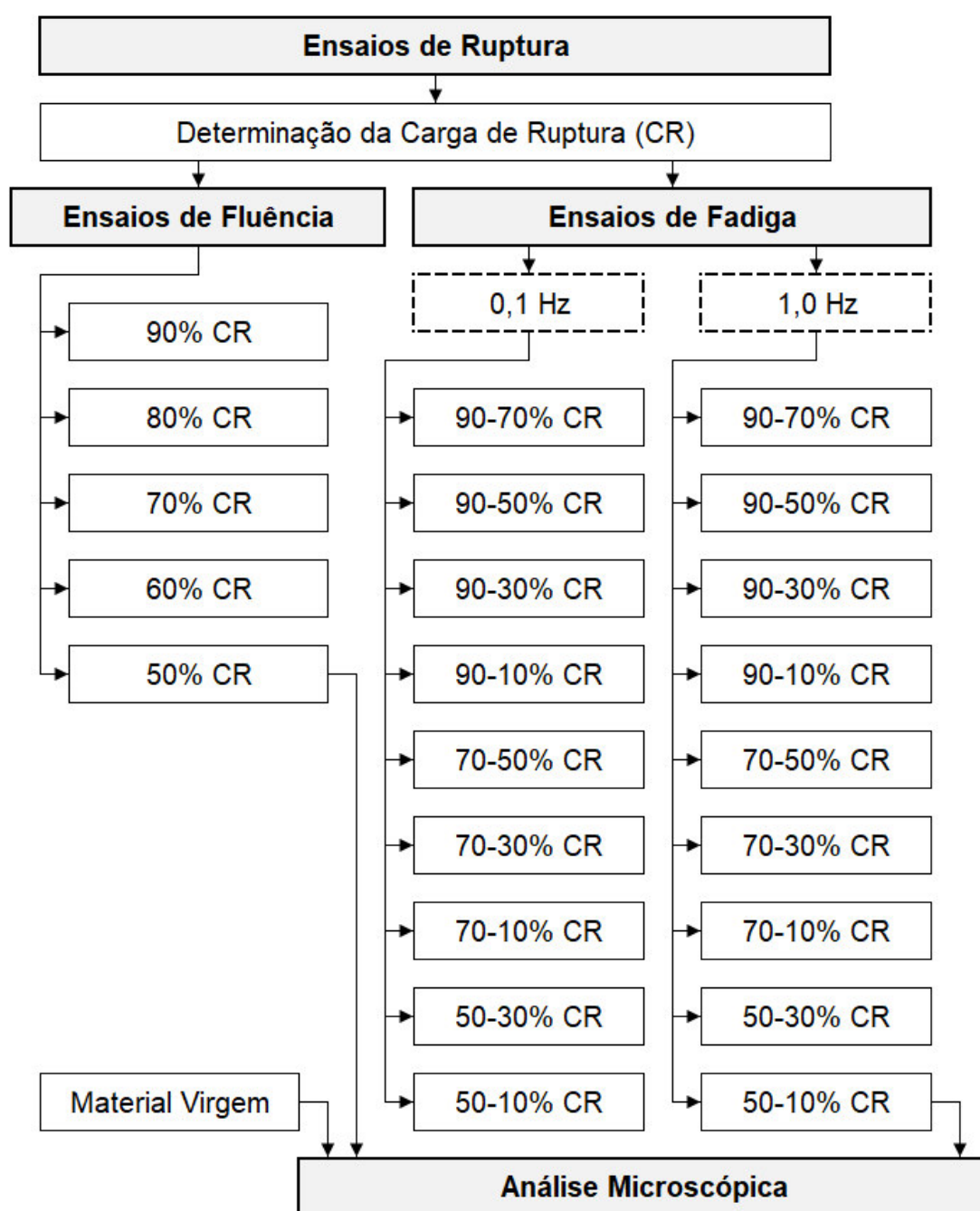


Figura 7: Fluxograma experimental.

Fonte: Elaboração própria.

3.1 Material

O material estudado neste trabalho consiste em um multifilamento de *HMPE*, que vem de fábrica enrolado sob a forma de bobina (Figura 8). O fabricante é omitido, pois a intenção não é avaliar o produto, mas estudar o comportamento do material de forma genérica.



Figura 8: Bobina de multifilamento de *HMPE*.

Fonte: Autoria própria.

Ressalva-se que esse é o mesmo material utilizado como matéria-prima na fabricação de diversos cabos de ancoragem.

3.1.1 Corpos de Prova

Os corpos de prova foram confeccionados com o comprimento útil de 350 mm entre terminais tipo “sanduíche” (Figura 9). Além disso, foram aplicadas 60 torções por metro, conforme a recomendação da norma ISO 2062:2009, de forma a manter certa congruência com os cabos de ancoragem que possuem vários elementos torcidos ou trançados.

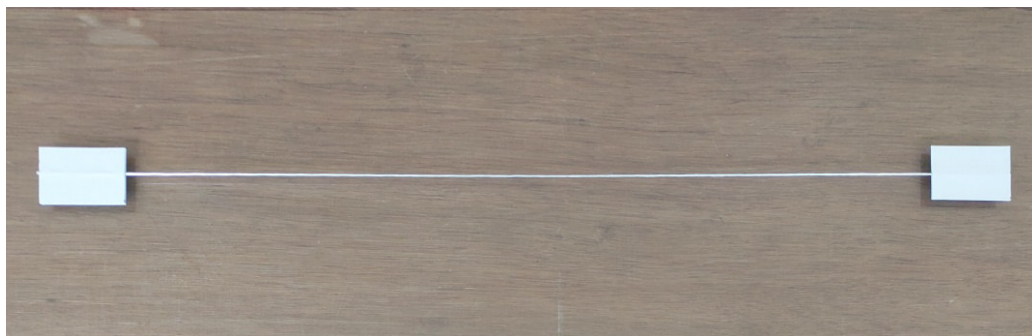


Figura 9: Corpo de prova com terminais tipo “sanduíche”.

Fonte: Autoria própria.

A utilização de terminais tipo “sanduíche” pode ser vista em outros estudos, como naquele realizado por Bain *et al.* (2020). Neste trabalho, eles consistem em dois pares de retângulos de papel *couché*, com gramatura de 300 g/m² e dimensões de 25 mm x 35 mm, colados com cola instantânea nas extremidades do corpo de prova. Sua finalidade é fornecer uma superfície adequada para fixação do corpo de prova, considerando os dispositivos de fixação disponíveis, uma vez que a fixação do *HMPE* costuma ser um desafio devido ao baixo coeficiente de atrito, que pode ocasionar deslizamentos.

3.2 Métodos

Os métodos utilizados na execução deste trabalho são descritos a seguir.

3.2.1 Ensaios Mecânicos

Os ensaios mecânicos de ruptura, fadiga e fluência foram realizados no Laboratório POLICAB, integrante da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande – FURG.

Durante a realização dos ensaios, manteve-se a atmosfera padrão, com temperatura de 20 ±2°C e umidade relativa de 65 ±4%, conforme a Norma ISO 139:2014.

3.2.1.1 Ensaios de Ruptura

Foram realizados 20 ensaios de ruptura com uma máquina universal de ensaios INSTRON E3000, equipada com uma célula de carga de 3 kN (Figura 10).



Figura 10: INSTRON E3000.

Fonte: Autoria própria.

Nos ensaios, com base na Norma ISO 2062:2009, os corpos de prova foram tracionados até a ruptura com uma taxa de extensão de 250 mm/min, registrando a força (Figura 11).

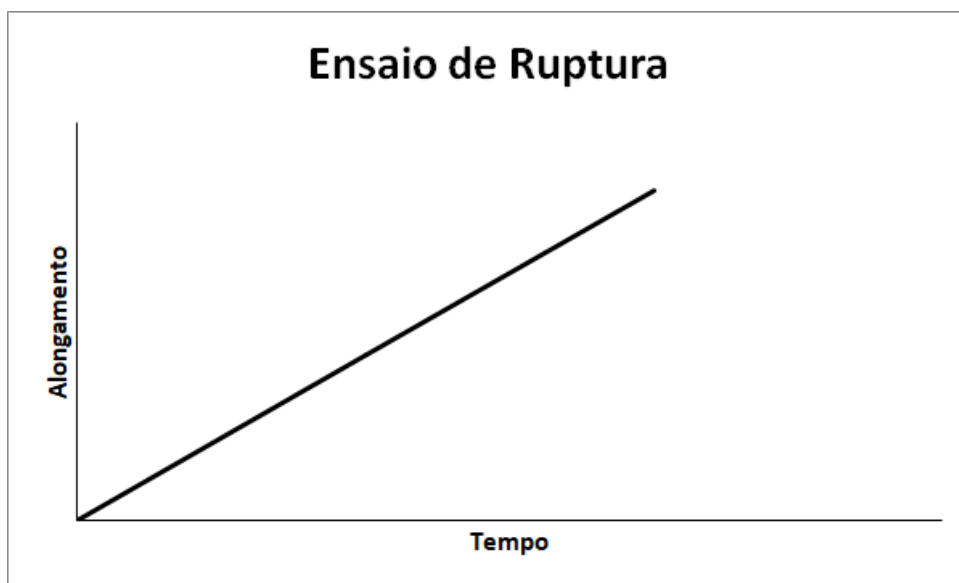


Figura 11: Representação esquemática do ensaio de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

A partir da média das forças máximas obtidas, foi determinada a carga de ruptura (CR) do material.

3.2.1.2 Ensaio de Fluência

Foram estabelecidos cinco conjuntos de ensaios de fluência, com cargas de 50, 60, 70, 80 e 90% da CR, contendo três ensaios cada, totalizando 15 ensaios, conforme o quadro da Figura 12.

Ensaio de Fluência					
Carga (CR)	90%	80%	70%	60%	50%
Quantidade	3	3	3	3	3

Figura 12: Quadro dos conjuntos de ensaios de fluência.

Fonte: Elaboração própria.

Para a realização dos ensaios, foi utilizada uma máquina universal de ensaios EMiC DL2000, equipada com uma célula de carga de 1 kN (Figura 13).



Figura 13: EMiC DL2000.

Fonte: Autoria própria.

Nos ensaios, os corpos de prova foram carregados até as respectivas cargas de fluência por meio de uma rampa com taxa de 200% da CR por minuto. Logo após, a força foi mantida e a deformação até a ruptura foi registrada (Figura 14).

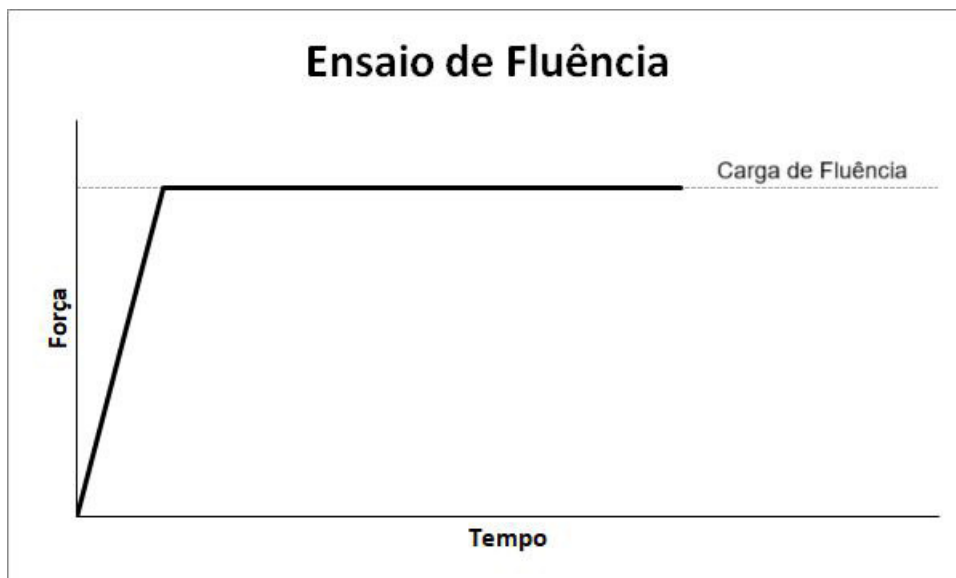


Figura 14: Representação esquemática do ensaio de fluência.

Fonte: Elaboração própria.

Por meio dos resultados obtidos, foram calculadas as médias dos tempos de vida, das deformações e das inclinações das curvas (taxas) para as cargas de 50, 60, 70, 80 e 90% da CR. Com essas médias, foi construído um gráfico para cada uma dessas três variáveis em função da CR. Em cada um desses gráficos, uma linha de tendência foi adicionada a fim de representar o comportamento do material. As linhas de tendência foram expressas por funções e ressalvas foram feitas para cada caso. Por fim, com essas funções, foram realizadas comparações com os resultados obtidos em fadiga.

3.2.1.3 Ensaio de Fadiga

Foram estabelecidos dezoito conjuntos de ensaios de fadiga, com as frequências de 0,1 e 1,0 Hz, cargas máximas de 90, 70 e 50% da CR e cargas mínimas de 70, 50, 30 e 10% da CR, conforme o quadro da Figura 15.

Ensaio de Fadiga			
Frequência (Hz)	Carga Máxima (CR)	Carga Mínima (CR)	Quantidade
0,1	90	70	10
		50	10
		30	10
		10	10
	70	50	5
		30	5
		10	5
	50	30	1
		10	3
1	90	70	10
		50	10
		30	10
		10	10
	70	50	5
		30	5
		10	5
	50	30	1
		10	3

Figura 15: Quadro dos conjuntos de ensaios de fadiga.

Fonte: Elaboração própria.

A frequência de 0,1 Hz foi escolhida por ser um parâmetro realístico, que se aproxima do período das ondas do mar (Humeau *et al.*, 2018). Já a escolha da frequência de 1,0 Hz teve a intenção de submeter o material a uma condição mais severa, a fim de produzir diferenças nos resultados.

Para a realização dos ensaios, foi utilizada a máquina universal de ensaios INSTRON E3000, equipada com a célula de carga de 3 kN, já mostrada na Figura 10.

Nos ensaios, os corpos de prova foram levados à carga máxima por meio de uma rampa com taxa de 200% da CR por minuto. Logo após, a força assumia a forma de uma onda senoidal, iniciando pelo segundo quadrante, variando entre os valores de carga máxima ($C_{máx}$) e carga mínima ($C_{mín}$) até a ruptura ou pelo tempo aproximado de 14 dias devido às limitações de tempo para a realização deste trabalho (Figura 16).

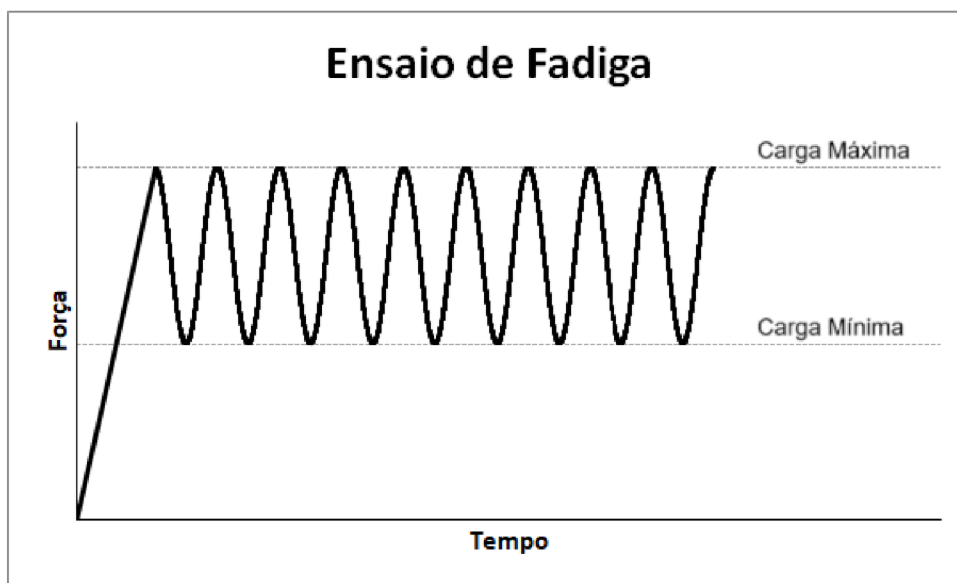


Figura 16: Representação esquemática do ensaio de fadiga.

Fonte: Elaboração própria.

Por meio dos dados obtidos, foram construídos gráficos comparativos das variáveis tempo de vida, deformação e inclinação da curva (taxa), em função da carga, agrupando os conjuntos com a mesma $C_{m\acute{a}x}$, incluindo também resultados de fluência, a fim de avaliar as variações provocadas pelo aumento da $C_{m\acute{i}n}$ (diminuição da amplitude).

3.2.2 Análise Microscópica

A análise microscópica foi realizada no Laboratório de Metalografia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande – FURG. Para isso, foi utilizado um microscópio ótico de luz refletida com sistema de análise de imagens (Figura 17).

Foram analisadas três amostras: uma de material retirado da bobina, uma de material retirado da ruptura de um ensaio de fluência com carga de 50% da CR e outra de material retirado da ruptura de um ensaio de fadiga com carga de 50 a 10% da CR na frequência de 1,0 Hz.

Para facilitar a observação, as amostras foram postas entre duas lâminas de vidro de 1 mm de espessura.



Figura 17: Microscópio Olympus GX51.

Fonte: Autoria própria.

3.2.3 Considerações

A seguir, são detalhados alguns termos importantes e considerações feitas para o desenvolvimento deste trabalho:

- **Deformação:** Nos ensaios de fluência e fadiga, é o percentual da variação total do comprimento do corpo de prova em relação ao comprimento inicial, incluindo a deformação na rampa.
- **Tempo:** Também chamado de tempo de vida, é o tempo total do ensaio até a ruptura, tanto para os ensaios de fluência quanto para os ensaios de fadiga, incluindo o tempo de rampa.
- **Taxa:** É o menor valor da razão entre a deformação percentual pelo tempo em horas, de um intervalo que consiste em 65% da duração total do ensaio, analisada de forma discreta a cada ponto percentual, tanto para os ensaios de fluência quanto para os ensaios de fadiga. Em outras palavras, verificou-se a deformação percentual do intervalo de 0 a 65% da duração do ensaio,

dividiu-se essa deformação por esse tempo em horas e registrou-se o resultado. O mesmo foi feito para o intervalo de 1 a 66%, de 2 a 67% e assim sucessivamente até chegar ao intervalo de 35 a 100%. Feito isso, o menor resultado registrado foi tomado como taxa. A escolha do menor resultado se deve ao fato de que ele representa melhor a fase de fluência secundária, descrita por Humeau *et al.* (2018), visto que a fase primária é marcada pela redução da taxa de deformação e a fase terciária é marcada pelo seu aumento. Ainda, para o *HMPE*, resultados de ensaios com grandes cargas têm fase primária bastante evidente e fase terciária praticamente inexistente. Porém, quanto menor é a carga, maior é o destaque da fase terciária. Esse fato dificulta a determinação da taxa. Por isso, um intervalo móvel de 65% foi escolhido por representar um percentual bastante razoável da duração total do ensaio e por permitir descartar os valores das partes extremas da linha do tempo quando não são representativas do todo. De forma simples, a taxa representa a conjugação das variáveis tempo e deformação e dá uma medida da velocidade média de deformação que ocorre em 65% do tempo de vida do material.

- **Inclinação:** É o ângulo, em graus, cuja tangente é a taxa. Essa forma de expressão foi escolhida por facilitar a comparação dos dados entre si e por fornecer referências. Dessa forma, uma inclinação de 0° representaria a ausência de fluência, uma inclinação de 45° representaria 1% de deformação em 1 hora e uma inclinação próxima a 90° representaria a iminência da ruptura.

3.2.4 Filtragem dos Ensaios

A fim de diminuir o desvio dos resultados e facilitar a análise, foram aplicadas condições para a filtragem dos ensaios de fluência e de fadiga dentro de seus respectivos conjuntos de ensaios.

Para filtrar os ensaios de fluência, foi aplicada apenas uma condição:

Condição Única: No conjunto de ensaios analisado, o ensaio com menor duração não deve ter duração inferior a 80% do tempo do ensaio de maior duração.

Sempre que essa condição não era atendida, um novo ensaio era realizado e adicionado ao conjunto. Então aquele ensaio cuja duração ficou mais distante da média da duração dos quatro ensaios era eliminado e a condição era novamente avaliada.

Para filtrar os ensaios de fadiga, foram aplicadas duas condições:

Condição 1: O número de ciclos de um ensaio não deve ser inferior a 50% da média dos números de ciclos dos ensaios do conjunto analisado.

Condição 2: A taxa de um ensaio não deve ser superior a 130% da média das taxas dos ensaios do conjunto analisado.

Primeiramente era avaliada a Condição 1. Quando um ensaio não atendia a essa condição, um novo ensaio era realizado e adicionado ao conjunto em seu lugar. Então o valor da média era recalculado e a condição era novamente avaliada.

Depois de satisfeita a Condição 1, a Condição 2 era avaliada de forma semelhante. Porém, quando havia falha em satisfazer a Condição 2, a Condição 1 era novamente avaliada.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as análises e discussões dos resultados.

4.1 Resultados dos Ensaios de Ruptura

Os resultados dos ensaios de ruptura se encontram dentro da faixa de valores esperados para o material e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados dos ensaios de ruptura.

CP	Força (N)	Deformação (%)
1	506,49	3,01
2	499,93	2,92
3	507,54	3,04
4	517,16	2,99
5	504,98	3,01
6	528,18	3,15
7	497,81	2,99
8	490,92	3,01
9	529,99	3,08
10	502,80	2,97
11	526,64	3,08
12	519,02	3,13
13	515,20	3,03
14	501,01	3,06
15	523,42	3,19
16	509,59	3,03
17	521,38	3,17
18	490,36	3,07
19	521,23	3,09
20	532,93	3,10
Média	512,33	3,06
Desvio Padrão	12,97	0,0685

Fonte: Elaboração própria.

Por meio da média das forças máximas registradas, foi determinada a carga de ruptura (CR) do material: 512,33 N.

4.2 Resultados dos Ensaio de Fluência

Os resultados dos ensaios de fluência são apresentados nas Tabelas 2, 3, 4, 5 e 6. Já os gráficos das Figuras 18, 19, 20, 21 e 22 mostram a deformação do material em função do tempo nos ensaios.

Tabela 2: Resultados dos ensaios de fluência com carga de 90% da carga de ruptura.

CP	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	132	3,45	11,60	85,07
2	162	3,45	9,41	83,93
3	145	3,44	10,99	84,80
Média	146	3,44	10,67	84,64
Desvio Padrão	14,9	0,00558	1,13	-

Fonte: Elaboração própria.

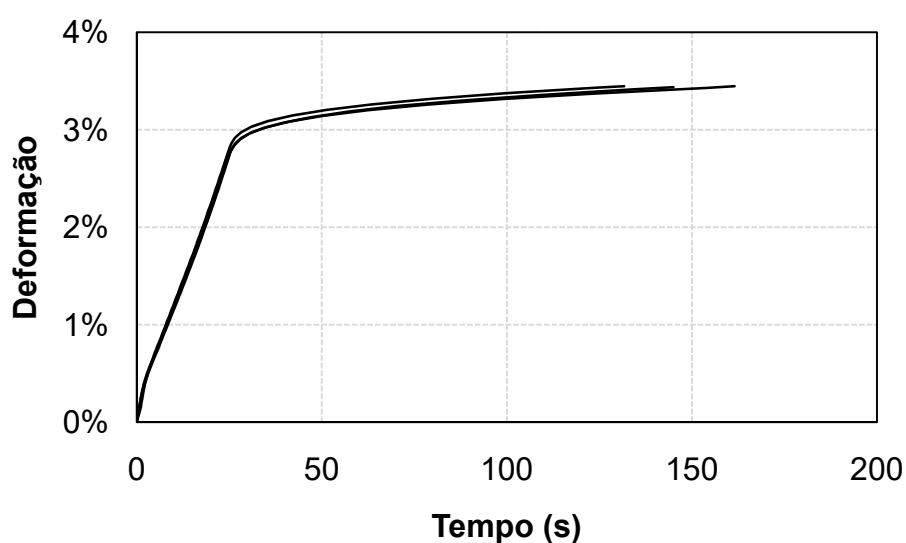


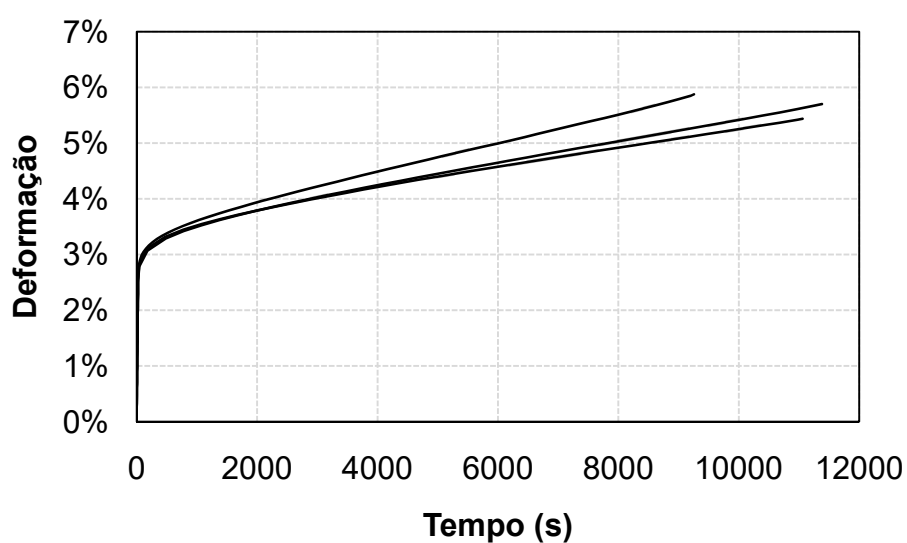
Figura 18: Ensaio de fluência com carga de 90% da carga de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 3: Resultados dos ensaios de fluência com carga de 80% da carga de ruptura.

CP	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	11060	5,44	0,626	32,03
2	11381	5,70	0,709	35,35
3	9258	5,88	0,937	43,14
Média	10566	5,67	0,757	37,14
Desvio Padrão	1145	0,221	0,161	-

Fonte: Elaboração própria.

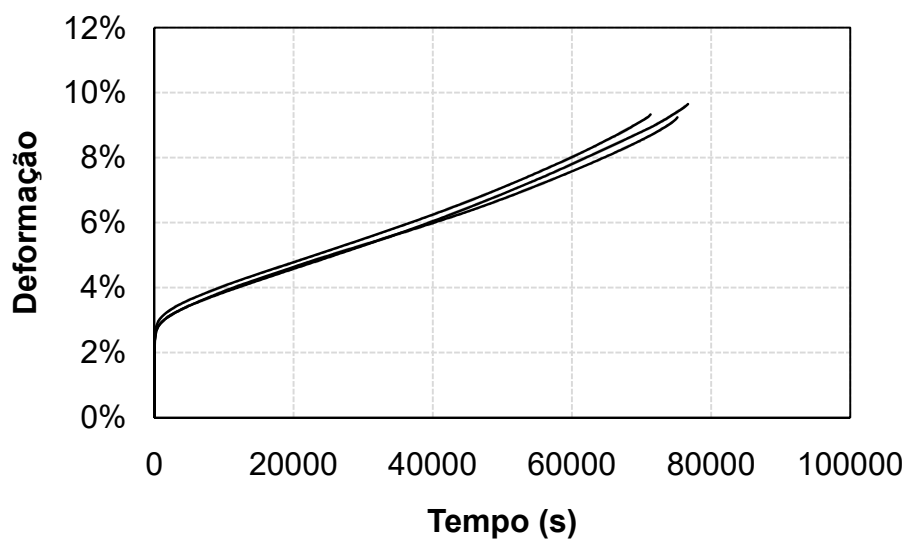
**Figura 19:** Ensaios de fluência com carga de 80% da carga de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4: Resultados dos ensaios de fluência com carga de 70% da carga de ruptura.

CP	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	76665	9,65	0,280	15,63
2	71297	9,32	0,278	15,52
3	75167	9,24	0,264	14,78
Média	74376	9,40	0,274	15,31
Desvio Padrão	2770	0,216	0,00867	-

Fonte: Elaboração própria.

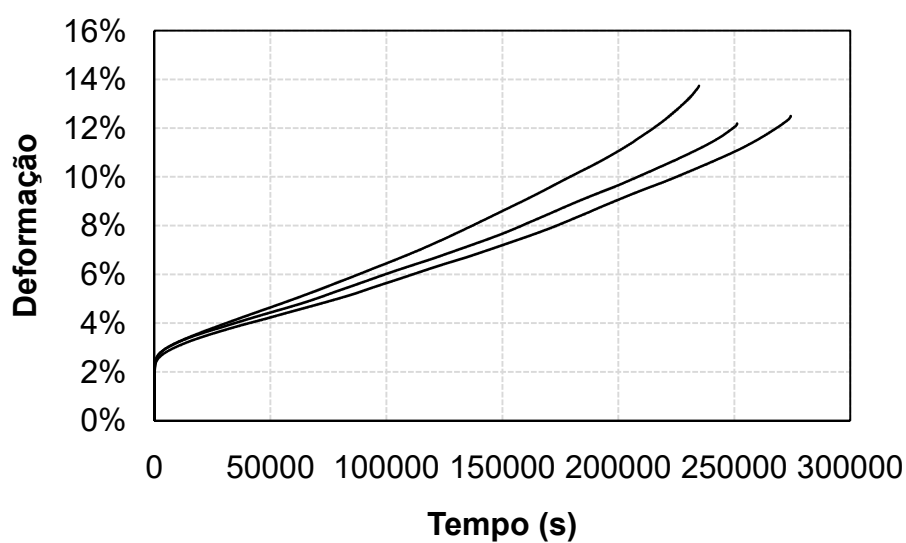
**Figura 20:** Ensaios de fluência com carga de 70% da carga de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5: Resultados dos ensaios de fluência com carga de 60% da carga de ruptura.

CP	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	274328	12,50	0,112	6,39
2	251188	12,19	0,119	6,80
3	234768	13,73	0,141	8,01
Média	253428	12,81	0,124	7,07
Desvio Padrão	19875	0,819	0,0150	-

Fonte: Elaboração própria.

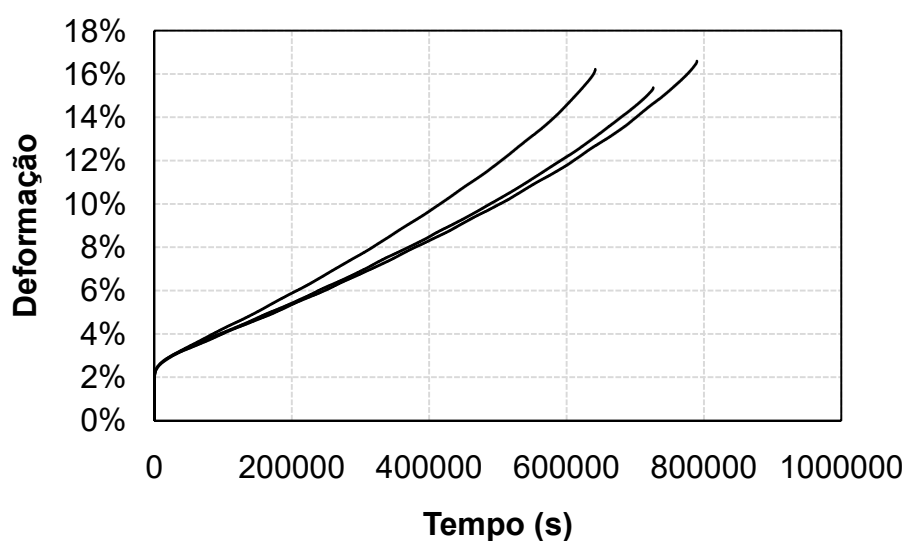
**Figura 21:** Ensaio de fluência com carga de 60% da carga de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6: Resultados dos ensaios de fluência com carga de 50% da carga de ruptura.

CP	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	726098	15,37	0,0546	3,13
2	641718	16,22	0,0653	3,74
3	789668	16,60	0,0539	3,09
Média	719161	16,06	0,0580	3,32
Desvio Padrão	74219	0,628	0,00638	-

Fonte: Elaboração própria.

**Figura 22:** Ensaios de fluência com carga de 50% da carga de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

Com esses resultados, construíram-se gráficos representativos do comportamento do material em relação ao tempo de vida (Figura 23), deformação (Figura 24) e inclinação da curva (taxa) (Figura 25), todos em função de percentuais da CR. Em cada um desses gráficos, os pontos são as médias dos resultados e a curva/reta é a tendência desses pontos, conforme a descrição.

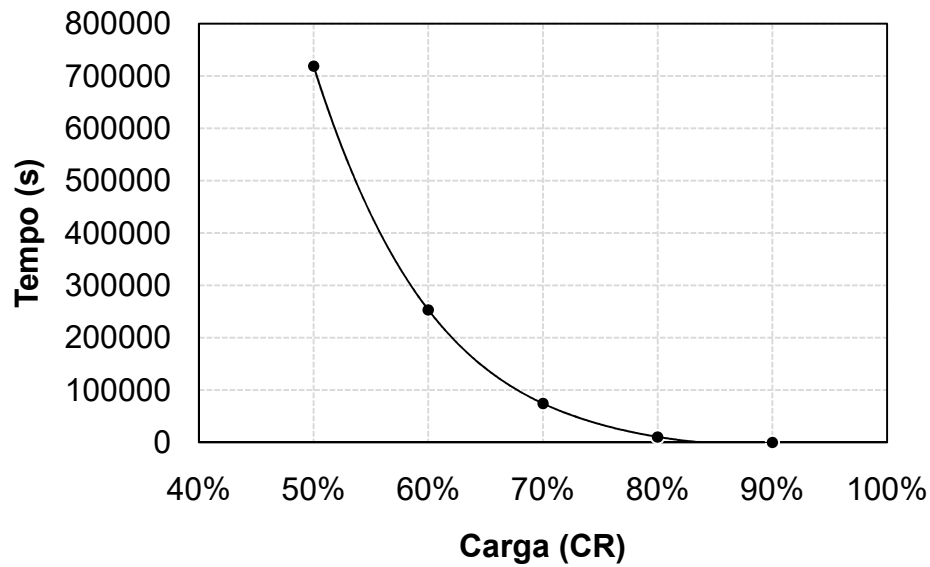


Figura 23: Tempo de vida em fluência em função da carga.

Fonte: Elaboração própria.

A linha de tendência dos pontos do gráfico da Figura 23 consiste em uma função polinomial de quarto grau (Equação 1), que representa satisfatoriamente o contínuo de valores esperados para o tempo em fluência do material até a ruptura com cargas que se encontram no intervalo de 50 a 80% da CR.

No intervalo de 80 a 90% da CR, entretanto, existe um ponto de mínimo local e a função também assume valores negativos. Por esse motivo, ela não é adequada para representar o tempo de fluência nesse intervalo. Para contornar esse problema, uma função linear (Equação 2) foi gerada a partir dos pontos de 80 e 90% da CR.

Por meio da interseção entre o polinômio e a reta foi definido o ponto de transição entre as duas funções para melhor descrever o comportamento do material ($x = 79,91\%$).

$$f(50,00\% \leq x \leq 79,91\%) =$$

$$45661900x^4 - 147294000x^3 + 180377000x^2 - 99673900x + 21019600$$

Equação 1

$$f(79,91\% < x \leq 90,00\%) = -104202x + 93927,5$$

Equação 2

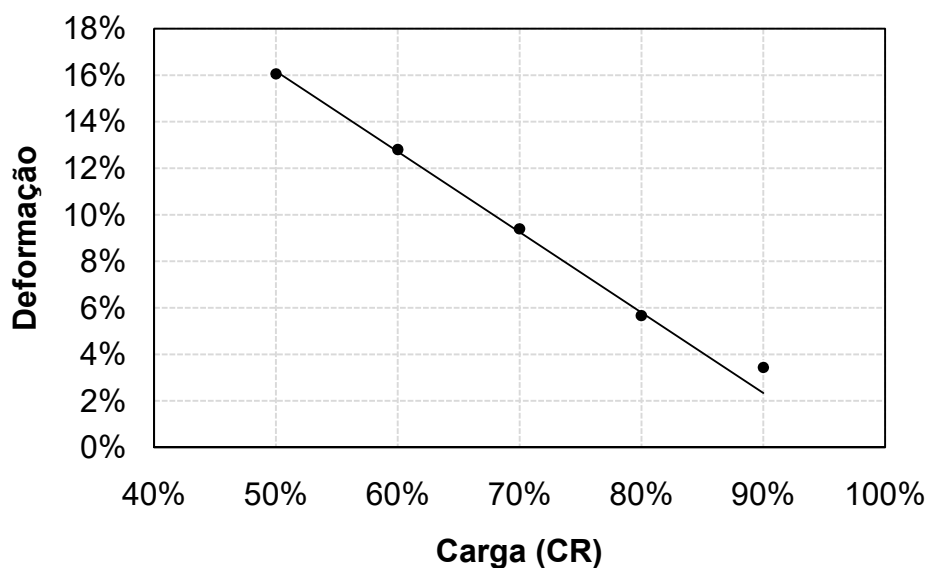


Figura 24: Deformação em fluência em função da carga.

Fonte: Elaboração própria.

No gráfico da Figura 24, é possível notar que a deformação assume uma relação praticamente linear com a carga de fluência no intervalo que parte de 50 a 80% da CR. Por essa razão, a linha de tendência compreendeu apenas os pontos dessa região, sendo definida por uma reta cuja função é descrita na Equação 3.

Para estimar a deformação no intervalo de 80 a 90% da CR, por considerar o afastamento do ponto de 90% da CR da linha de tendência, optou-se por definir uma nova função linear entre esses dois pontos (Equação 4).

De forma semelhante ao caso anterior, foi calculado o ponto de interseção entre as duas retas para determinar o ponto de transição entre as duas funções ($x = 81,04\%$).

$$f(50,00\% \leq x < 81,04\%) = -0,345682x + 0,334552 \quad \text{Equação 3}$$

$$f(81,04\% \leq x \leq 90,00\%) = -0,222991x + 0,235125 \quad \text{Equação 4}$$

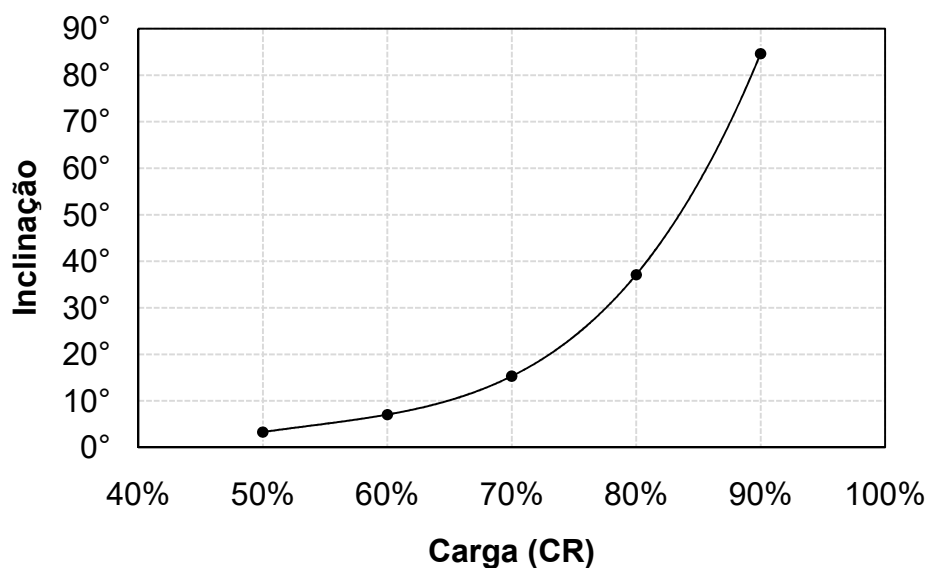


Figura 25: Inclinação da curva em fluência em função da carga.

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, foi definida a linha de tendência da inclinação (ângulo) da taxa de fluência para o intervalo de 50 a 90% da CR (Figura 25). Novamente a função consiste em um polinômio de quarto grau (Equação 5), que representa muito bem o comportamento do material.

$$f(50,00\% \leq x \leq 90,00\%) =$$

$$1247,08x^4 - 1727,25x^3 + 627,629x^2 + 82,1025x - 56,678$$

Equação 5

Dessa forma, tem-se bem definido o comportamento de fluência do material com cargas de 50 a 90% da CR. Para obter o comportamento do material com cargas ligeiramente superiores ou inferiores, é possível extrapolar as retas e curvas.

4.3 Resultados dos Ensaios de Fadiga

Os resultados dos ensaios de fadiga são apresentados nas Tabelas 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 e 24. Já as Figuras 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40 e 41 apresentam as curvas de

deformação em função do tempo obtidas nos ensaios, geradas a partir das rampas e dos pontos máximos dos ciclos.

Tabela 7: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 70% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	267	2688	4,66	1,63	58,40
2	338	3406	4,99	1,51	56,51
3	473	4756	5,41	1,36	53,74
4	622	6246	5,84	1,31	52,64
5	460	4617	5,61	1,45	55,41
6	289	2907	4,78	1,61	58,09
7	213	2155	4,36	1,73	59,98
8	607	6087	5,84	1,35	53,42
9	213	2156	4,64	1,95	62,80
10	562	5637	5,82	1,46	55,63
Média	404	4066	5,19	1,54	56,92
Desvio Padrão	160	1601	0,571	0,197	-

Fonte: Elaboração própria.

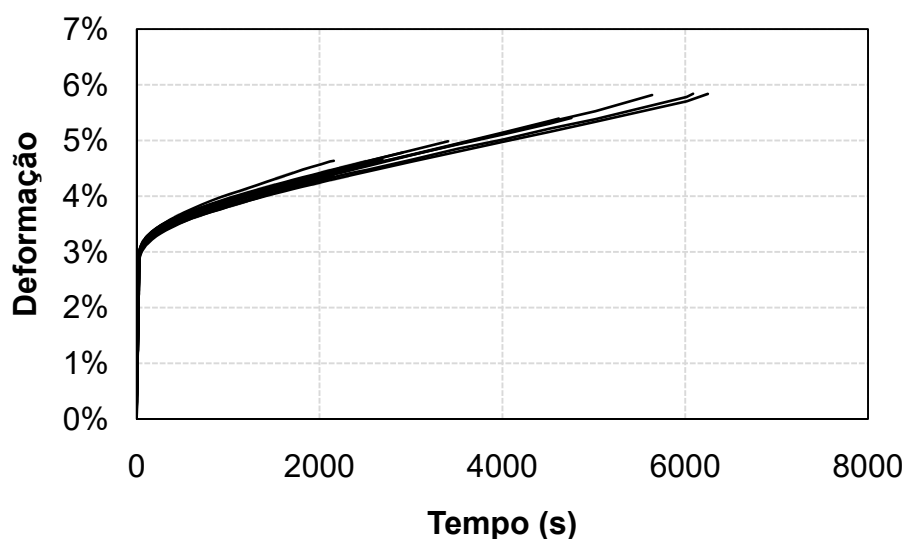


Figura 26: Ensaios de fadiga com carga de 90 a 70% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 8: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 50% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	354	3557	4,87	1,47	55,72
2	660	6626	6,34	1,50	56,23
3	805	8075	6,54	1,25	51,33
4	383	3857	5,30	1,75	60,26
5	417	4187	5,48	1,67	59,06
6	699	7016	6,06	1,26	51,48
7	453	4547	5,74	1,77	60,53
8	524	5257	6,22	1,81	61,04
9	437	4387	5,53	1,70	59,53
10	531	5336	6,15	1,79	60,86
Média	526	5285	5,82	1,60	57,93
Desvio Padrão	149	1497	0,526	0,215	-

Fonte: Elaboração própria.

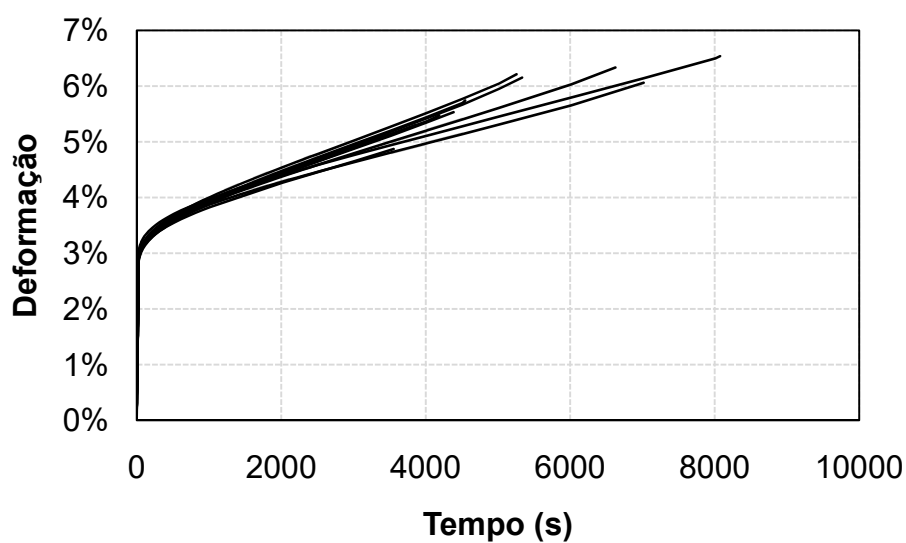


Figura 27: Ensaios de fadiga com carga de 90 a 50% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 9: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 30% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	407	4087	5,57	1,88	62,03
2	356	3577	5,33	1,85	61,65
3	712	7146	6,80	1,66	58,87
4	380	3826	5,51	1,89	62,13
5	365	3667	5,24	1,72	59,81
6	708	7106	6,84	1,67	59,16
7	273	2747	5,05	2,24	65,94
8	559	5607	6,33	1,74	60,13
9	403	4047	5,96	2,17	65,24
10	273	2756	5,17	2,26	66,14
Média	444	4457	5,78	1,91	62,35
Desvio Padrão	161	1616	0,669	0,233	-

Fonte: Elaboração própria.

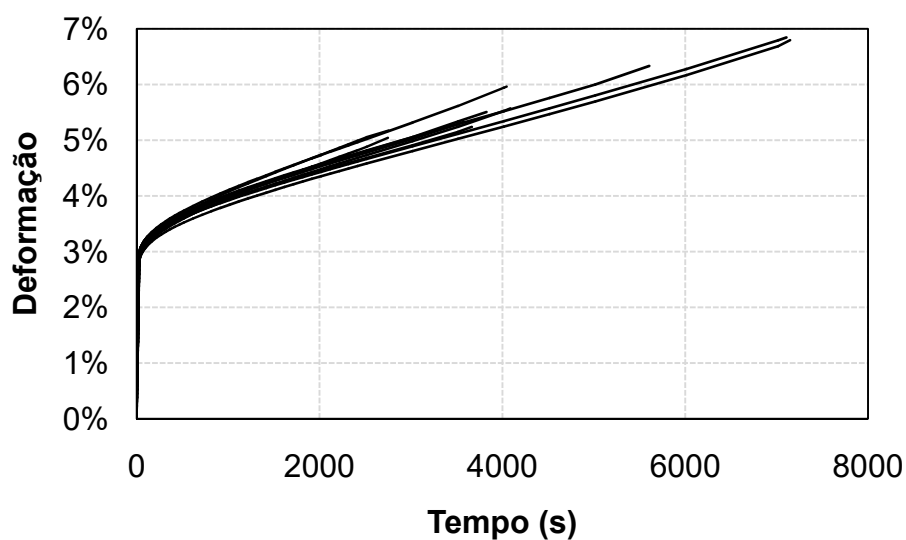


Figura 28: Ensaios de fadiga com carga de 90 a 30% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 10: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 10% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	201	2027	4,41	2,10	64,53
2	206	2077	4,79	2,51	68,25
3	398	3997	5,41	1,84	61,45
4	356	3577	5,09	1,76	60,33
5	387	3896	5,36	1,75	60,30
6	234	2358	5,02	2,62	69,10
7	374	3757	5,22	1,82	61,17
8	303	3047	5,31	2,38	67,22
9	491	4936	5,92	1,77	60,51
10	347	3487	5,36	2,03	63,77
Média	330	3316	5,19	2,06	64,07
Desvio Padrão	93,5	937	0,402	0,333	-

Fonte: Elaboração própria.

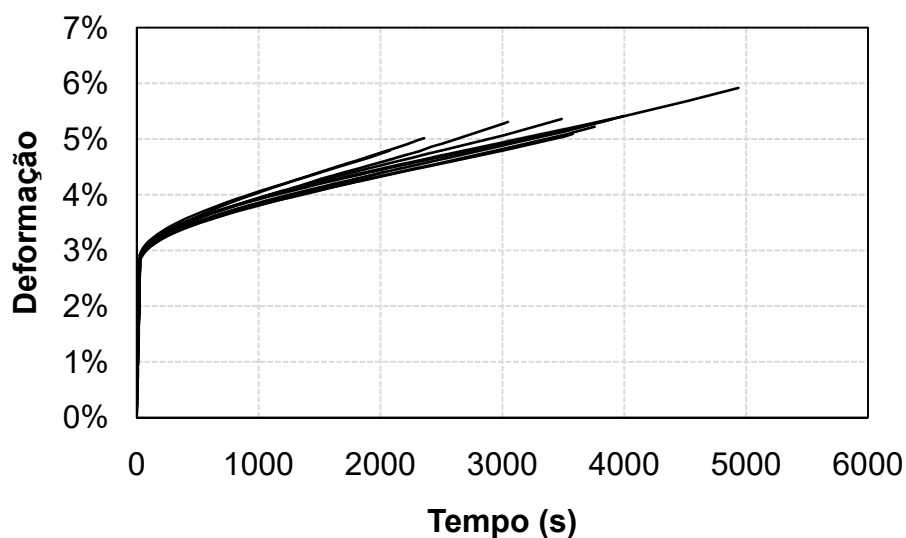


Figura 29: Ensaios de fadiga com carga de 90 a 10% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Nos conjuntos de fadiga com $C_{máx}$ de 90% da CR, optou-se por eliminar o ensaio com o maior número de ciclos devido à maior dispersão dos resultados e à filtragem focada no descarte dos resultados inferiores.

Tabela 11: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 70 a 50% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	10175	101756	12,54	0,292	16,27
2	10193	101945	11,77	0,276	15,44
3	7520	75207	11,28	0,347	19,13
4	10728	107285	11,90	0,266	14,92
5	9478	94786	12,10	0,302	16,79
Média	9619	96196	11,92	0,297	16,52
Desvio Padrão	1254	12544	0,461	0,0312	-

Fonte: Elaboração própria.

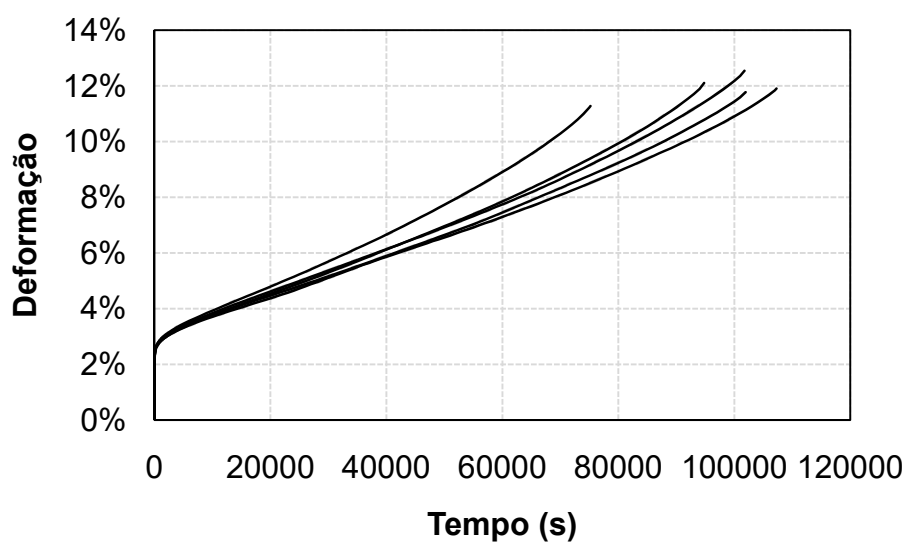


Figura 30: Ensaios de fadiga com carga de 70 a 50% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 12: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 70 a 30% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	8441	84416	10,89	0,298	16,61
2	9339	93406	10,87	0,279	15,59
3	7311	73127	9,80	0,319	17,69
4	10945	109455	10,97	0,237	13,35
5	9453	94536	13,17	0,357	19,67
Média	9098	90988	11,14	0,298	16,60
Desvio Padrão	1344	13432	1,23	0,0447	-

Fonte: Elaboração própria.

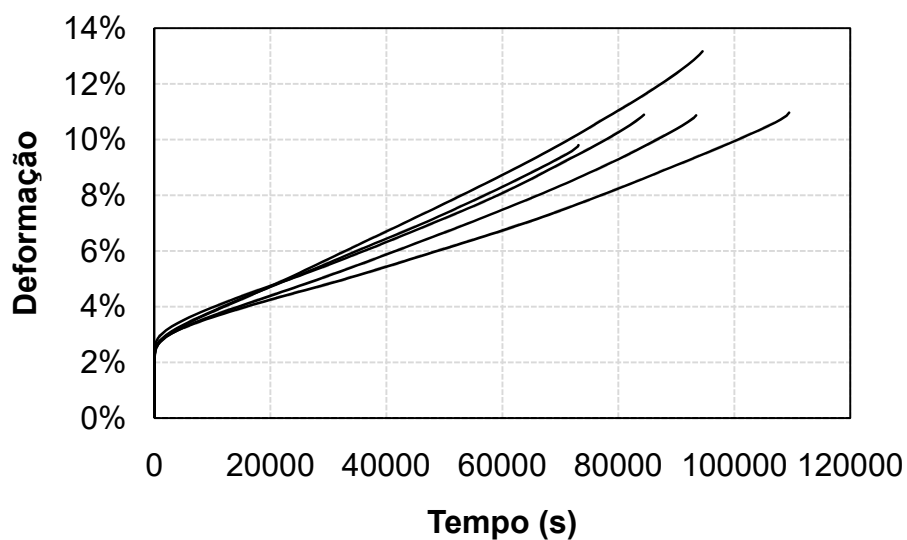


Figura 31: Ensaios de fadiga com carga de 70 a 30% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 13: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 70 a 10% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	9093	90936	11,98	0,329	18,20
2	6299	63007	9,76	0,367	20,17
3	8190	81907	11,34	0,348	19,18
4	5517	55188	9,17	0,383	20,97
5	7960	79616	9,82	0,291	16,23
Média	7412	74131	10,41	0,344	18,97
Desvio Padrão	1463	14625	1,19	0,0358	-

Fonte: Elaboração própria.

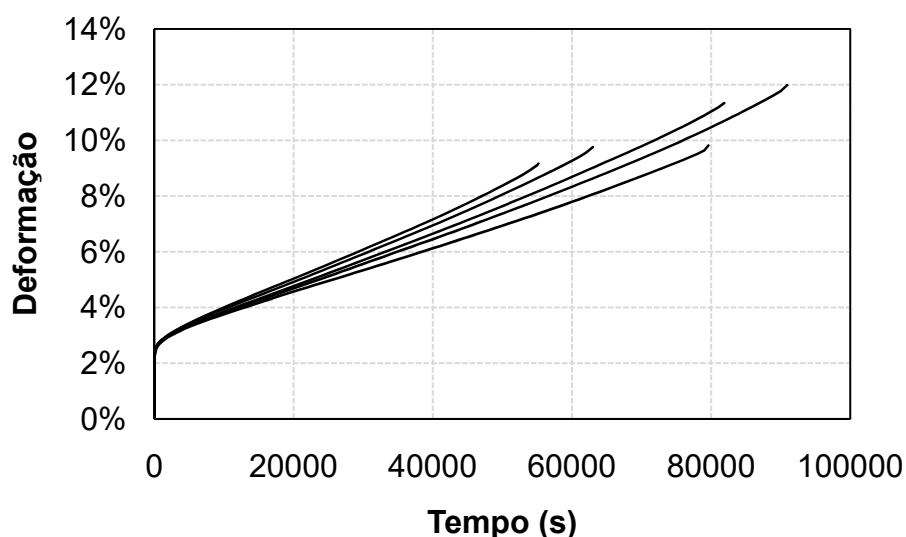


Figura 32: Ensaios de fadiga com carga de 70 a 10% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 14: Resultados do ensaio de fadiga parcial com carga de 50 a 30% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	116972	1169662	18,63	0,0423	2,42

Fonte: Elaboração própria.

O ensaio de fadiga com carga cíclica de 50 a 30% da CR na frequência de 0,1 Hz foi interrompido antes da ruptura devido ao seu alto tempo de duração. Por essa razão, não foram realizados três ensaios.

Além disso, em virtude das altas deformações atingidas nessa condição, esse CP foi excepcionalmente fabricado com o comprimento útil de 320 mm para não atingir o limite de deslocamento da máquina de ensaios dentro do limite de tempo proposto.

Tabela 15: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 50 a 10% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	88610	886067	14,36	0,0422	2,42
2	73088	730846	11,43	0,0405	2,32
3	121518	1215128	13,58	0,0295	1,69
Média	94405	944014	13,12	0,0374	2,14
Desvio Padrão	24730	247287	1,52	0,00691	-

Fonte: Elaboração própria.

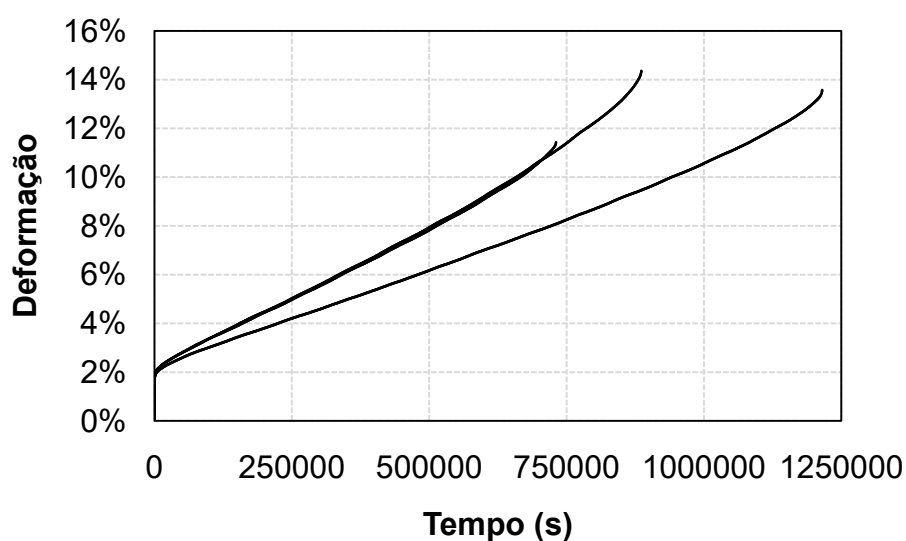


Figura 33: Ensaios de fadiga com carga de 50 a 10% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 16: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 70% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	3569	3595	5,05	1,49	56,12
2	4049	4075	5,07	1,36	53,66
3	1581	1607	4,33	2,05	63,97
4	2340	2366	4,50	1,59	57,83
5	3418	3444	4,86	1,46	55,55
6	4233	4233	5,15	1,41	54,70
7	3313	3339	5,34	2,04	63,85
8	1547	1573	4,39	2,18	65,35
9	2069	2095	4,74	2,13	64,84
10	1623	1649	4,37	2,25	66,01
Média	2774	2798	4,78	1,79	60,88
Desvio Padrão	1056	1052	0,368	0,361	-

Fonte: Elaboração própria.

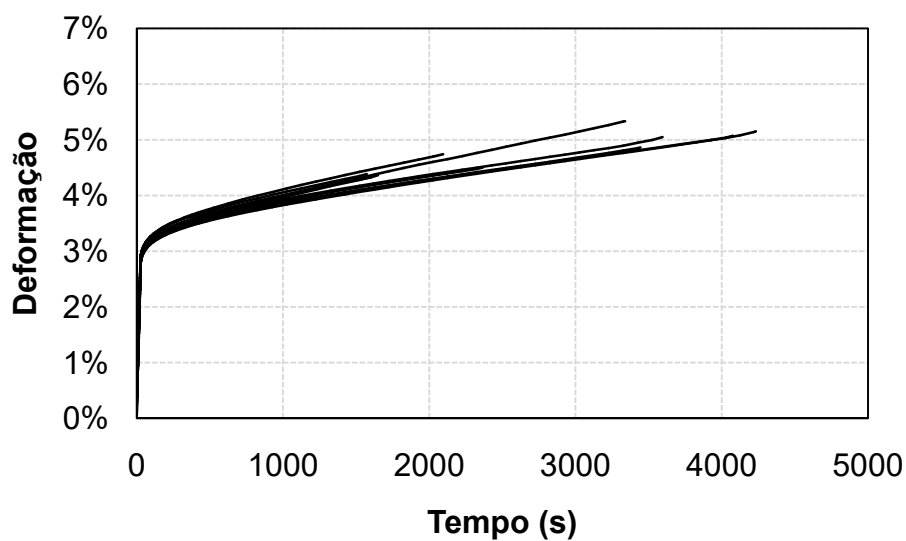


Figura 34: Ensaios de fadiga com carga de 90 a 70% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 17: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 50% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	1995	2021	4,54	2,09	64,39
2	1472	1498	4,45	2,40	67,41
3	1515	1541	4,67	2,87	70,77
4	1834	1860	4,81	2,57	68,73
5	2110	2136	5,08	2,87	70,79
6	2565	2591	5,31	2,68	69,56
7	2002	2029	5,06	2,74	69,98
8	3134	3160	5,55	2,40	67,38
9	1933	1959	5,06	3,08	72,04
10	1848	1874	5,10	3,27	73,02
Média	2041	2067	4,96	2,70	69,66
Desvio Padrão	491	491	0,346	0,351	-

Fonte: Elaboração própria.

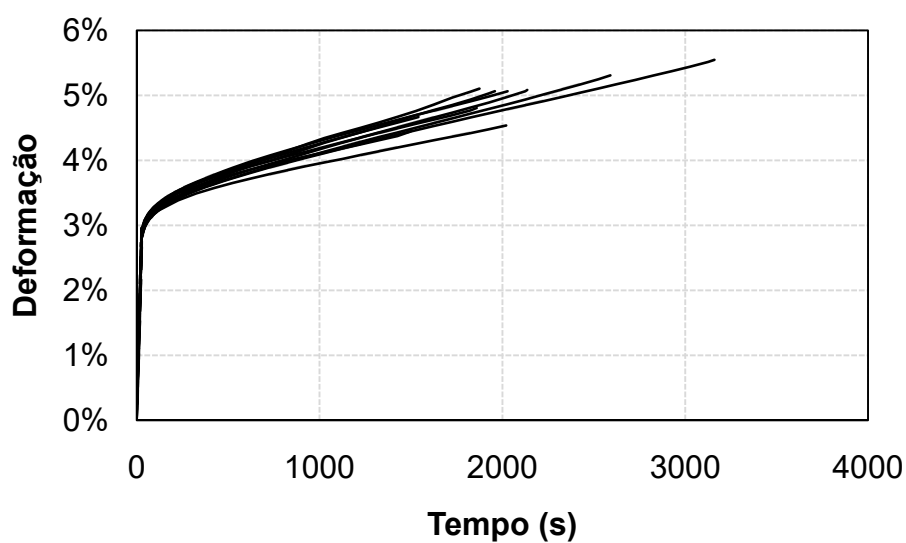


Figura 35: Ensaios de fadiga com carga de 90 a 50% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 18: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 30% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	1317	1343	4,90	4,23	76,70
2	1115	1141	4,93	5,08	78,86
3	1600	1626	5,15	4,07	76,21
4	1182	1208	4,71	4,01	76,00
5	2391	2417	5,66	3,37	73,46
6	2496	2522	5,88	3,63	74,59
7	2524	2550	6,32	4,23	76,70
8	1336	1362	4,99	4,39	77,17
9	2288	2314	5,59	3,48	73,95
10	1469	1495	5,32	4,57	77,65
Média	1772	1798	5,34	4,11	76,31
Desvio Padrão	581	581	0,510	0,522	-

Fonte: Elaboração própria.

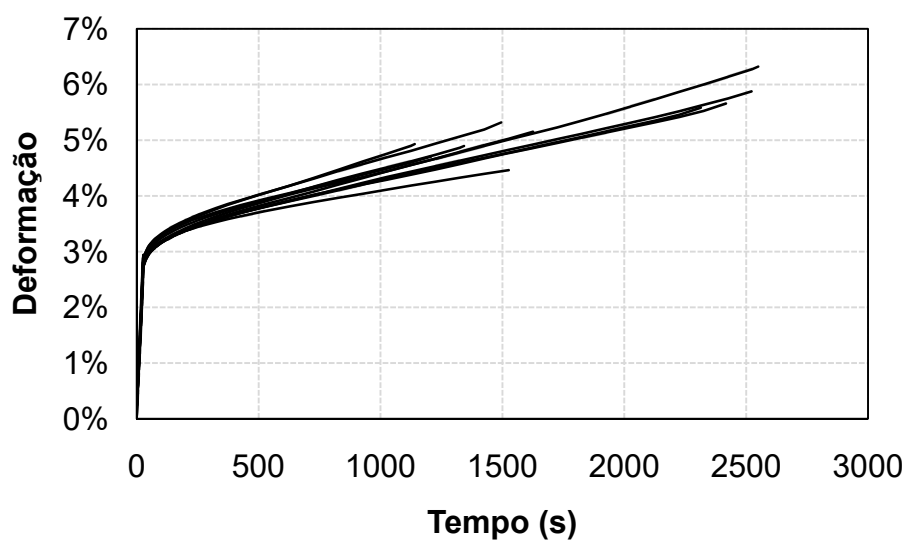


Figura 36: Ensaios de fadiga com carga de 90 a 30% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 19: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 90 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	799	825	4,90	7,37	82,28
2	442	468	4,26	8,96	83,63
3	1038	1064	5,14	6,37	81,07
4	477	503	4,62	10,06	84,32
5	435	461	4,37	10,21	84,41
6	345	371	4,11	8,85	83,55
7	445	471	4,30	9,03	83,68
8	1034	1060	5,28	6,73	81,55
9	633	659	4,88	8,94	83,62
10	810	836	5,20	8,49	83,28
Média	646	672	4,71	8,50	83,29
Desvio Padrão	258	258	0,430	1,30	-

Fonte: Elaboração própria.

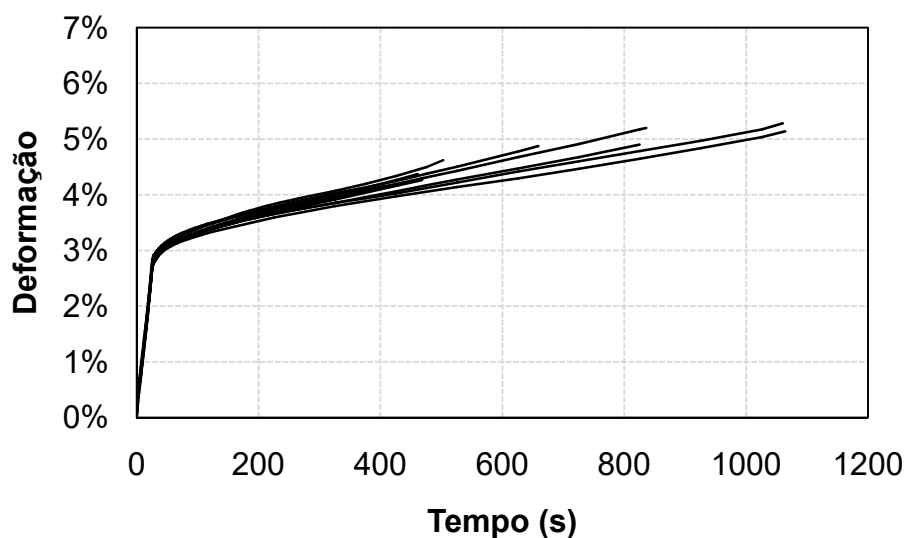


Figura 37: Ensaios de fadiga com carga de 90 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Nos conjuntos de fadiga com $C_{m\acute{a}x}$ de 90% da CR, optou-se por eliminar o ensaio com o maior número de ciclos devido à maior dispersão dos resultados e à filtragem focada no descarte dos resultados inferiores.

Tabela 20: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 70 a 50% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	88656	88675	10,90	0,282	15,76
2	77811	77830	8,65	0,242	13,61
3	98140	98159	11,37	0,271	15,17
4	62960	62979	8,96	0,309	17,15
5	85687	85706	10,55	0,284	15,84
Média	82651	82670	10,09	0,278	15,51
Desvio Padrão	13194	13194	1,21	0,0241	-

Fonte: Elaboração própria.

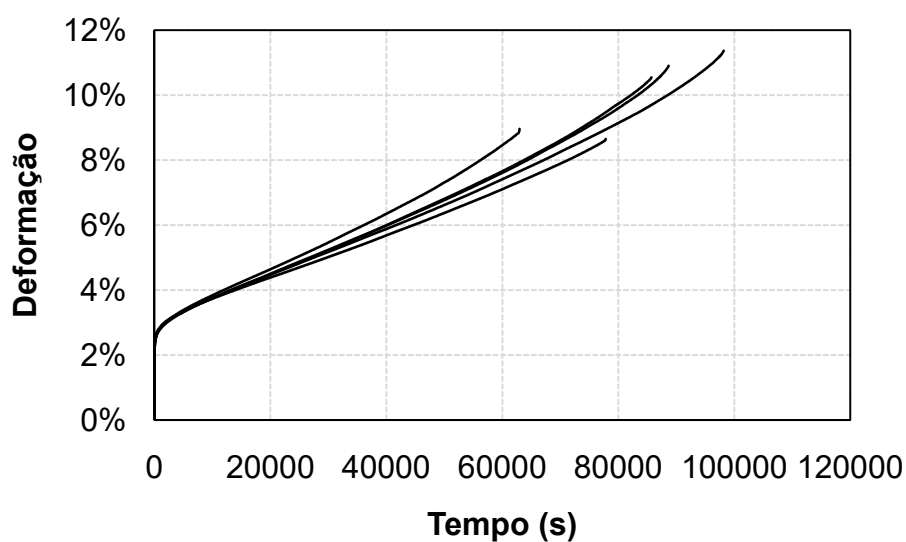


Figura 38: Ensaios de fadiga com carga de 70 a 50% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 21: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 70 a 30% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	56395	56414	7,99	0,29	16,15
2	55861	55880	8,01	0,31	16,98
3	63252	63271	7,54	0,24	13,73
4	30671	30691	5,58	0,29	16,42
5	76408	76427	9,15	0,27	15,37
Média	56517	56537	7,66	0,282	15,73
Desvio Padrão	16654	16654	1,30	0,0236	-

Fonte: Elaboração própria.

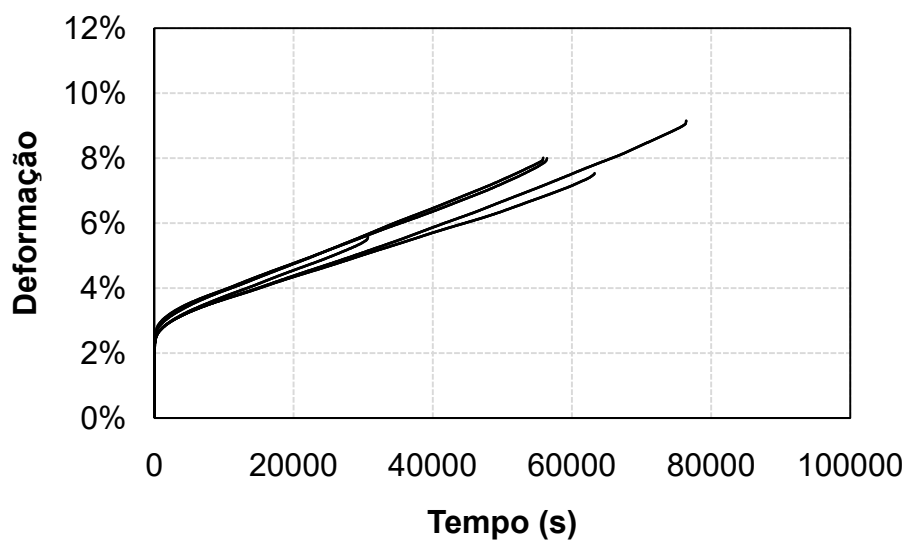


Figura 39: Ensaios de fadiga com carga de 70 a 30% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 22: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 70 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	26960	26980	6,83	0,51	26,80
2	31903	31923	7,87	0,56	29,13
3	14807	14827	5,76	0,70	35,11
4	16583	16603	5,87	0,61	31,36
5	32692	32712	8,18	0,56	29,39
Média	24589	24609	6,90	0,588	30,44
Desvio Padrão	8434	8434	1,11	0,0744	-

Fonte: Elaboração própria.

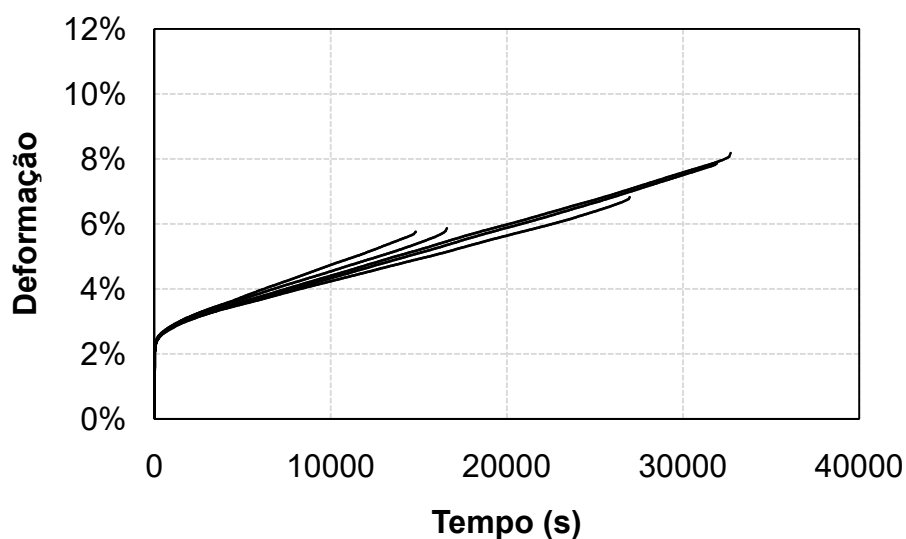


Figura 40: Ensaios de fadiga com carga de 70 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 23: Resultados do ensaio de fadiga parcial com carga de 50 a 30% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	1164269	1164277	15,47	0,0368	2,11

Fonte: Elaboração própria.

O ensaio de fadiga com carga cíclica de 50 a 30% da CR na frequência de 1,0 Hz foi interrompido antes da ruptura devido ao seu alto tempo de duração. Por essa razão, não foram realizados três ensaios.

Tabela 24: Resultados dos ensaios de fadiga com carga de 50 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

CP	Nº de Ciclos	Tempo (s)	Deformação (%)	Taxa (%/h)	Inclinação (°)
1	311244	311256	5,62	0,0322	1,85
2	455040	455051	7,55	0,0329	1,89
3	449396	449406	6,13	0,0271	1,55
Média	405227	405238	6,43	0,0308	1,76
Desvio Padrão	81440	81440	1,00	0,00318	-

Fonte: Elaboração própria.

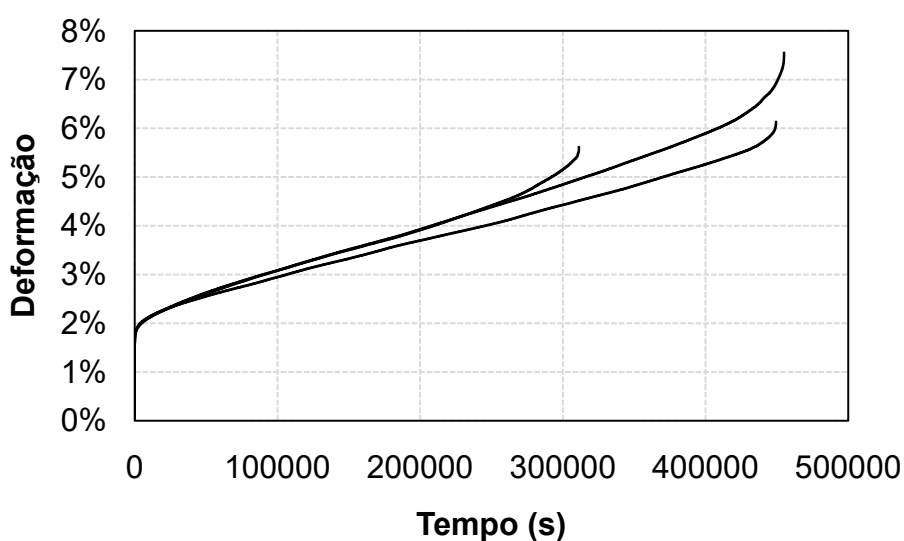


Figura 41: Ensaios de fadiga com carga de 50 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

Fonte: Elaboração própria.

4.4 Comparação entre os Resultados de Fluência e Fadiga

Por meio da compilação dos resultados dos ensaios com carga máxima ($C_{máx}$) de 90% da CR (Figura 42), constatou-se que, na frequência de 1,0 Hz, à medida que a carga mínima ($C_{mín}$) aumenta, o tempo de vida tende a aumentar. Já na frequência de 0,1 Hz, o tempo aumenta até a $C_{mín}$ de aproximadamente 50% da CR. Após isso, o tempo diminui. Já em fluência, o tempo se mostrou extremamente reduzido quando comparado aos tempos em fadiga.

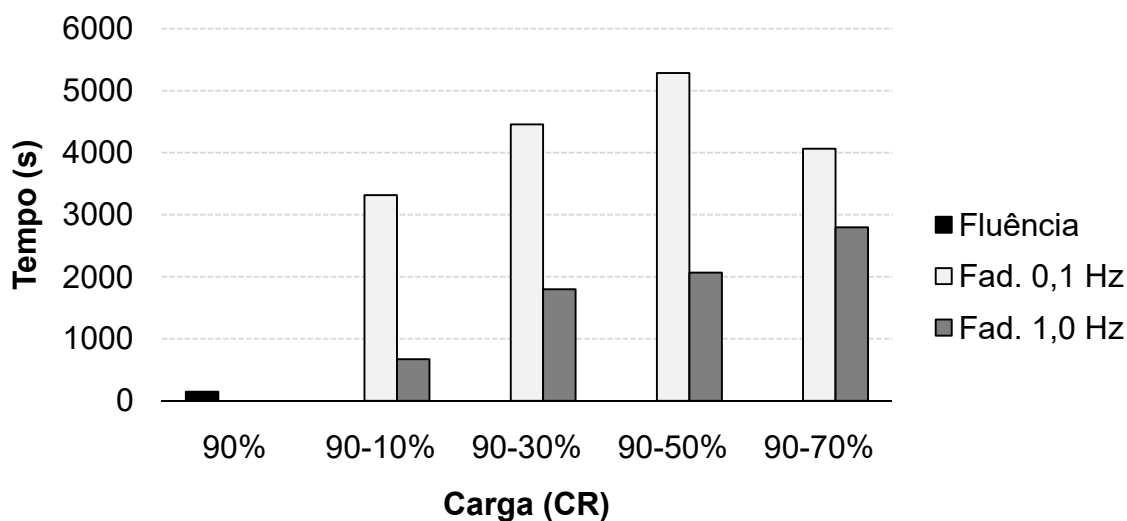


Figura 42: Tempos de vida em fluência e fadiga com carga máxima de 90% da carga de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

Nos ensaios com $C_{máx}$ de 70% da CR (Figura 43), quanto maior foi a $C_{mín}$, maior foi o tempo de vida do material. Os maiores tempos foram obtidos na frequência de 0,1 Hz, como no caso anterior. O tempo em fluência, por sua vez, também se mostrou bastante reduzido quando comparado aos tempos em fadiga.

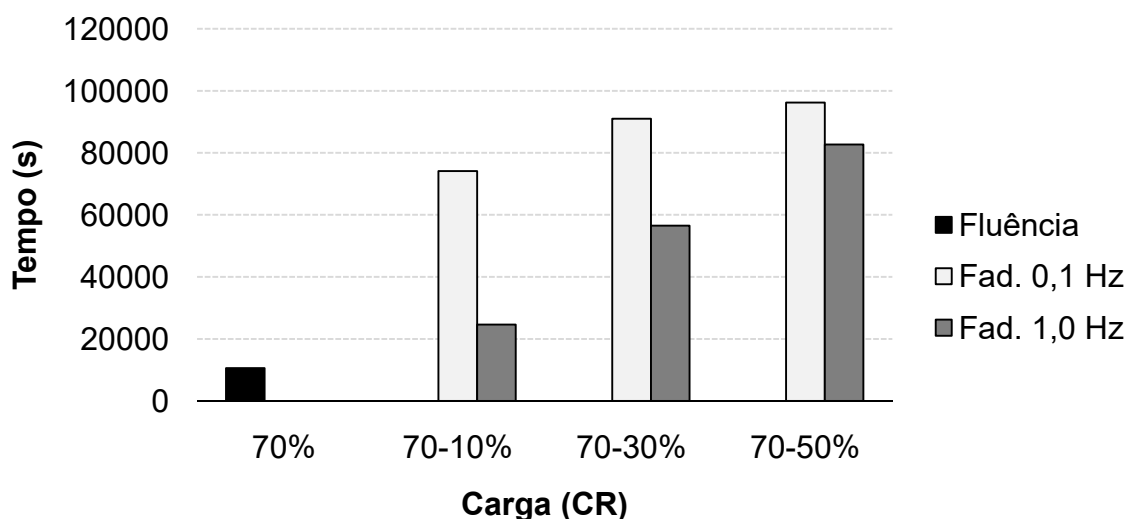


Figura 43: Tempos de vida em fluência e fadiga com carga máxima de 70% da carga de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

Já nos ensaios com $C_{m\acute{a}x}$ de 50% da CR (Figura 44), o tempo de vida em fadiga com carga cíclica de 10 a 50% da CR também é maior na frequência de 0,1 Hz do que na frequência de 1,0 Hz. Para os conjuntos de 30 a 50% da CR, esses tempos seriam ainda maiores, mas os ensaios foram interrompidos devido à elevada duração. Quanto ao tempo em fluência, o valor se situou entre os dois resultados dos conjuntos com $C_{m\acute{i}n}$ de 10% da CR.

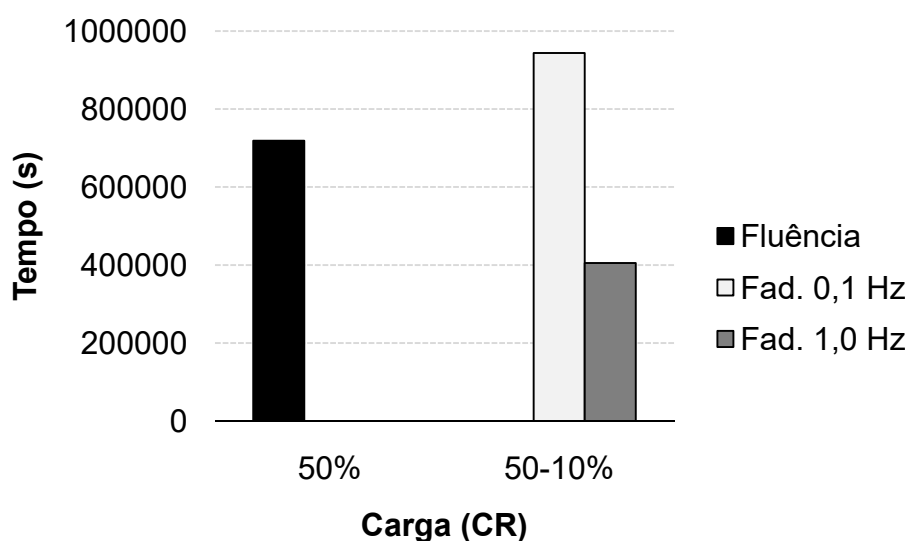


Figura 44: Tempos de vida em fluência e fadiga com carga máxima de 50% da carga de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

Com relação à deformação, nos ensaios de fadiga com $C_{m\acute{a}x}$ de 90% da CR (Figura 45), os valores na frequência de 0,1 Hz foram maiores do que os valores na frequência de 1,0 Hz. As maiores deformações na frequência de 0,1 Hz foram registradas com a $C_{m\acute{i}n}$ de 30 e de 50% da CR, e na frequência de 1,0 Hz, com $C_{m\acute{i}n}$ de 30% da CR. Já a deformação em fluência foi menor do que qualquer deformação em fadiga.

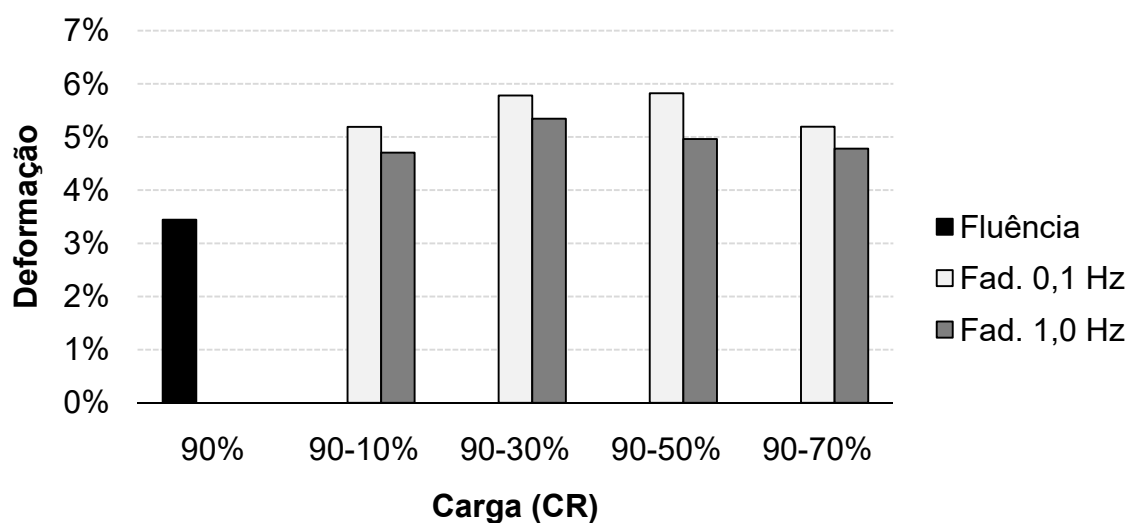


Figura 45: Deformação em fluência e fadiga com carga máxima de 90% da carga de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

Nos ensaios com $C_{máx}$ de 70% da CR (Figura 46), a deformação tende a aumentar com o aumento da $C_{mín}$ e, como no caso anterior, os valores foram maiores na frequência de 0,1 Hz. Em fluência, a deformação foi menor do que nos ensaios de fadiga.

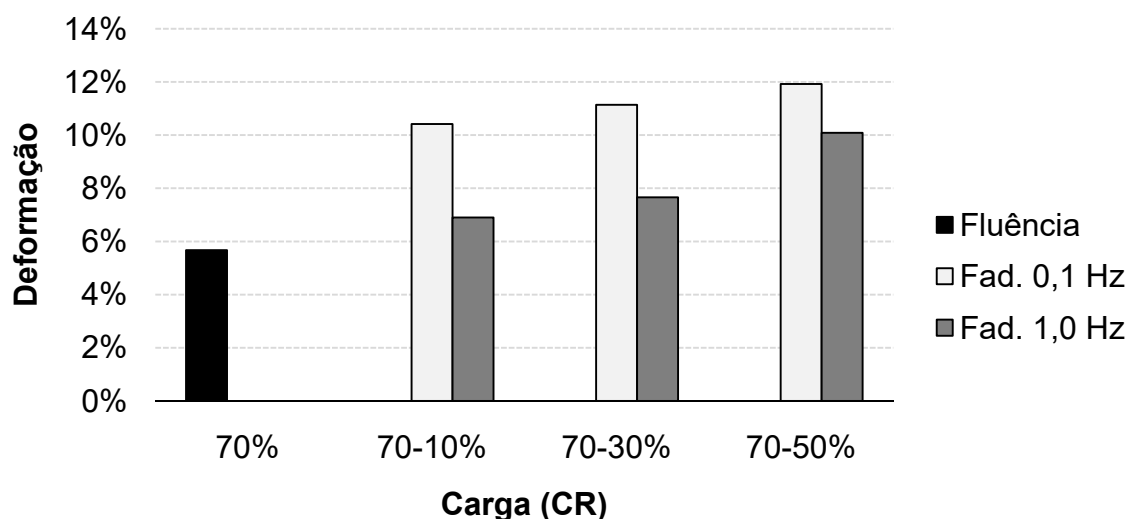


Figura 46: Deformação em fluência e fadiga com carga máxima de 70% da carga de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

Já nos ensaios com $C_{m\acute{a}x}$ de 50% da CR (Figura 47), a deformação foi maior na frequência de 0,1 Hz do que na frequência de 1,0 Hz e tende a aumentar com o aumento da $C_{m\acute{i}n}$, considerando os resultados parciais com $C_{m\acute{i}n}$ de 30% da CR. Já a deformação em fluência superou as deformações em fadiga dos conjuntos de ensaios com $C_{m\acute{i}n}$ de 10% da CR.

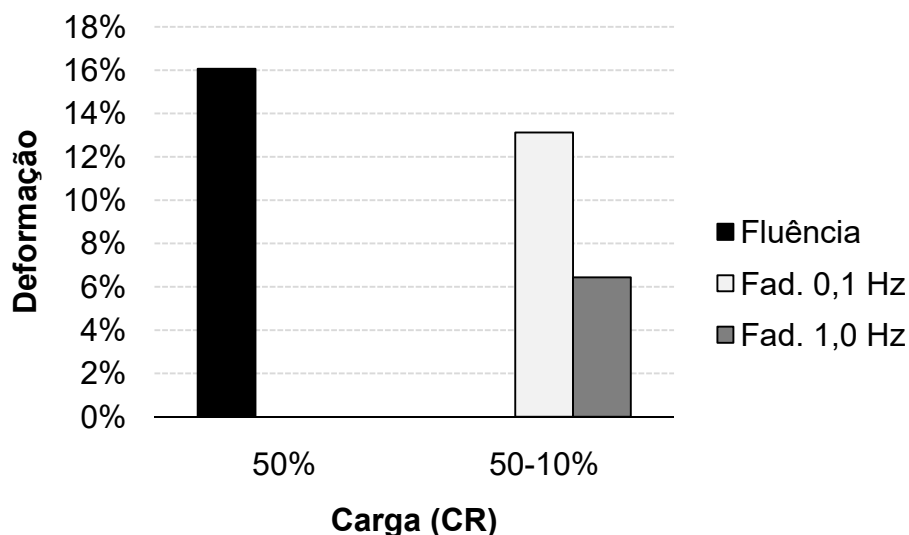


Figura 47: Deformação em fluência e fadiga com carga máxima de 50% da carga de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

Em relação à taxa de deformação, observou-se que, para os ensaios com $C_{m\acute{a}x}$ de 90% da CR, ela tende a diminuir com o aumento da $C_{m\acute{i}n}$. Essa diminuição é representada pela diminuição do ângulo de inclinação da taxa (Figura 48). Além disso, os valores de inclinação dos ensaios na frequência de 1,0 Hz são maiores do que os dos ensaios na frequência de 0,1 Hz. Já a inclinação em fluência foi um pouco maior do que as inclinações em fadiga.

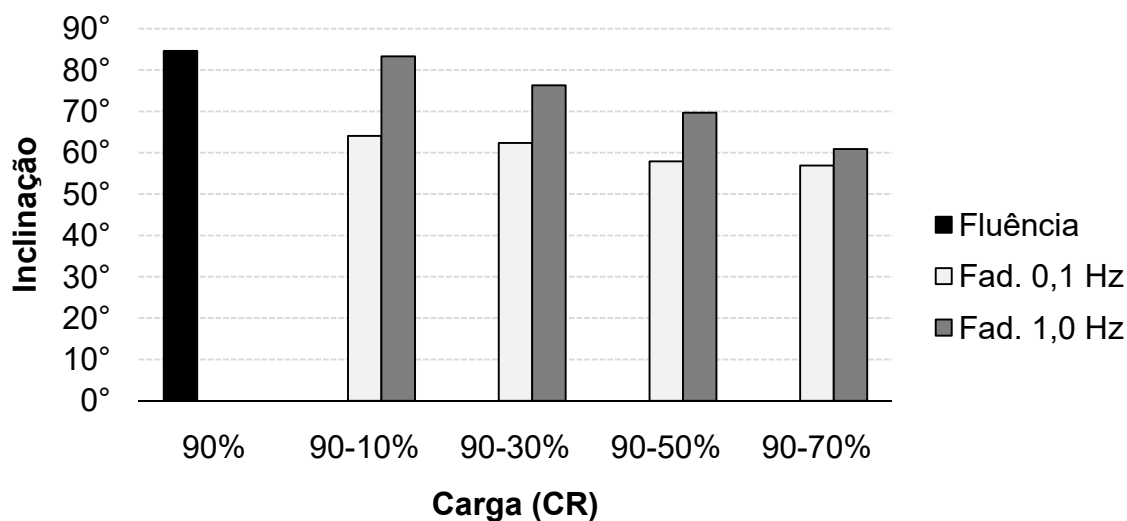


Figura 48: Inclinação da curva em fluência e fadiga com carga máxima de 90% da carga de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

Para os ensaios com $C_{m\acute{a}x}$ de 70% da CR (Figura 49), a inclinação diminuiu com o aumento da $C_{m\acute{m}n}$ de 10 para 30% da CR, entretanto, quando diminuiu de 30 para 50% da CR não houve diferença significativa na inclinação. A $C_{m\acute{m}n}$ de 30% da CR também marca o ponto no qual a inclinação na frequência de 0,1 Hz supera a inclinação na frequência de 1,0 Hz. Já a inclinação em fluência foi superior às inclinações em fadiga.

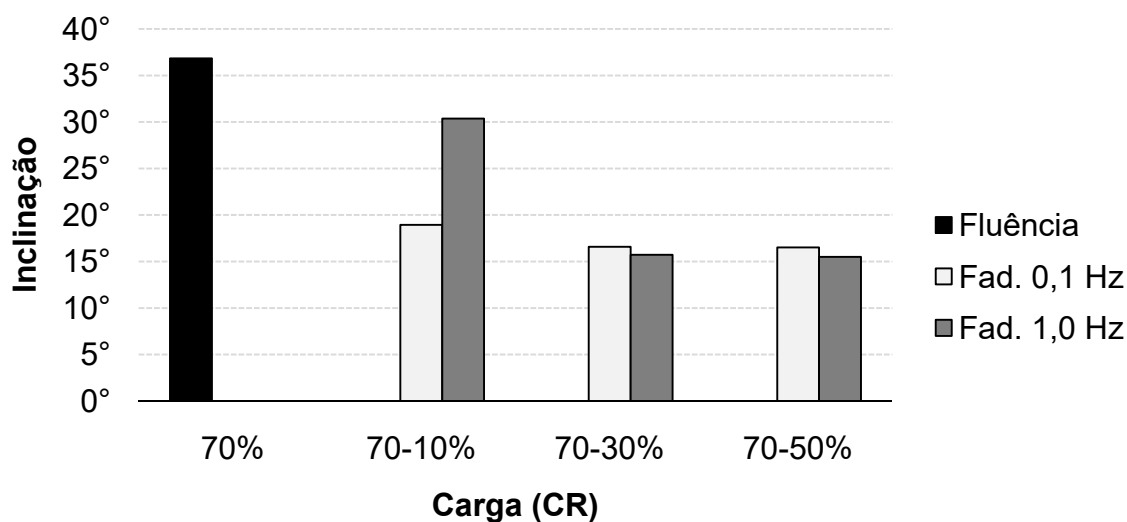


Figura 49: Inclinação da curva em fluência e fadiga com carga máxima de 70% de carga de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, para os ensaios com $C_{m\acute{a}x}$ de 50% da CR (Figura 50), a inclinação na frequência de 0,1 Hz se mostra maior do que a inclinação na frequência de 1,0 Hz. E a inclinação em fluência supera as inclinações em fadiga com $C_{m\acute{i}n}$ de 10% da CR.

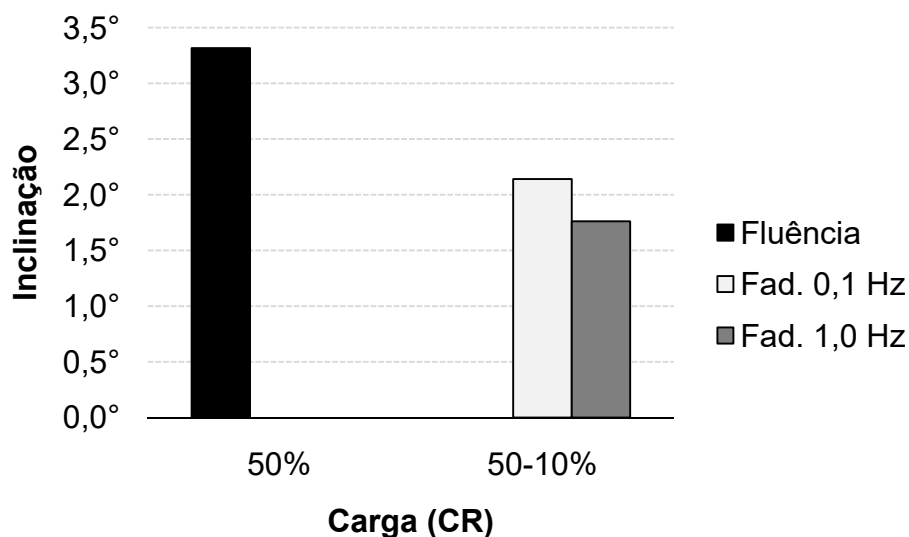


Figura 50: Inclinação da curva em fluência e fadiga com carga máxima de 50% da carga de ruptura.

Fonte: Elaboração própria.

4.5 Correlação entre os Resultados de Fluência e Fadiga

Os resultados de fadiga referentes a tempo de vida, deformação e inclinação da curva foram correlacionados aos resultados de fluência por meio da determinação da carga em fluência que provocaria o mesmo efeito obtido em fadiga.

Tomando os resultados apresentados na Tabela 25, nos ensaios de fadiga com carga de 90 a 10% da CR, na frequência de 0,1 Hz, verificou-se que, em média, o tempo de duração dos ensaios até a ruptura correspondeu ao tempo de um ensaio em fluência com carga de 86,96% da CR. Porém, tomando-se a deformação como parâmetro, o material em fadiga se deformou até a ruptura, em média, o que em um ensaio de fluência se deformaria com uma carga de 82,17% da CR. O mesmo vale para a inclinação, de forma que, em média, o material teve uma deformação por

tempo média correspondente a uma deformação por tempo média de um ensaio de fluência com carga de 86,47% da CR.

Tabela 25: Cargas de fluência equivalentes para obtenção dos resultados de fadiga com carga máxima de 90% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

Carga mínima	10% CR	30% CR	50% CR	70% CR
Tempo	86,96% CR	85,86% CR	85,07% CR	86,24% CR
Deformação	82,17% CR	79,52% CR	79,33% CR	82,15% CR
Inclinação/Taxa	86,47% CR	86,14% CR	85,24% CR	85,02% CR

Fonte: Elaboração própria.

Assim, observando também a Tabela 26, verifica-se que os resultados dos ensaios de fadiga com $C_{m\acute{a}x}$ de 90% da CR na frequência de 1,0 Hz foram semelhantes aos resultados que seriam obtidos em fluência com carga de 90% da CR, tratando-se de tempo e taxa. Contudo, as deformações foram um pouco maiores. Já os ensaios realizados na frequência de 0,1 Hz foram um pouco menos severos e também apresentaram deformações um pouco maiores.

Tabela 26: Cargas de fluência equivalentes para obtenção dos resultados de fadiga com carga máxima de 90% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

Carga mínima	10% CR	30% CR	50% CR	70% CR
Tempo	89,50% CR	88,41% CR	88,16% CR	87,46% CR
Deformação	84,33% CR	81,47% CR	83,18% CR	84,00% CR
Inclinação/Taxa	89,79% CR	88,67% CR	87,51% CR	85,84% CR

Fonte: Elaboração própria.

Já por meio dos resultados dos ensaios de fadiga com $C_{m\acute{a}x}$ de 70% da CR, apresentados nas Tabelas 27 e 28, percebe-se que os tempos e taxas também são próximos daqueles que seriam obtidos em fluência com carga de 70% da CR, com exceção dos resultados na condição de $C_{m\acute{i}n}$ de 10% da CR na frequência de 1,0 Hz, que foram consideravelmente mais severos.

Tabela 27: Cargas de fluência equivalentes para obtenção dos resultados de fadiga com carga máxima de 70% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz.

Carga mínima	10% CR	30% CR	50% CR
Tempo	70,00% CR	68,48% CR	68,05% CR
Deformação	66,65% CR	64,56% CR	62,30% CR
Inclinação/Taxa	72,44% CR	70,93% CR	70,87% CR

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 28: Cargas de fluência equivalentes para obtenção dos resultados de fadiga com carga máxima de 70% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz.

Carga mínima	10% CR	30% CR	50% CR
Tempo	76,72% CR	71,91% CR	69,20% CR
Deformação	76,81% CR	74,63% CR	67,60% CR
Inclinação/Taxa	77,74% CR	70,32% CR	70,15% CR

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, os resultados dos ensaios de fadiga com carga de 50 a 10% da CR, apresentados na Tabela 29, mostram que, na frequência de 0,1 Hz, o tempo de vida foi maior do que seria em fluência com uma carga de 50% de CR e a deformação foi menor. Na frequência de 1,0 Hz, por outro lado, o tempo foi menor e a deformação consideravelmente mais reduzida. Já a taxa foi semelhante nos dois casos.

Tabela 29: Cargas de fluência equivalentes para obtenção dos resultados de fadiga com carga de 50 a 10% da carga de ruptura.

Frequência	0,1 Hz	1,0 Hz
Tempo	47,11% CR	55,68% CR
Deformação	58,81% CR	78,17% CR
Inclinação/Taxa	47,14% CR	46,32% CR

Fonte: Elaboração própria.

4.6 Resultados da Análise Microscópica

Por meio da observação microscópica da amostra de material retirado da bobina, mostrada na Figura 51, nota-se que o multifilamento é composto por

diversos filamentos heterogêneos, que podem ser descritos como feixes de estruturas paralelas, visto que o *HMPE* possui elevada orientação molecular. Além disso, também existem linhas transversais escuras nos filamentos, que sugerem a presença de irregularidades.

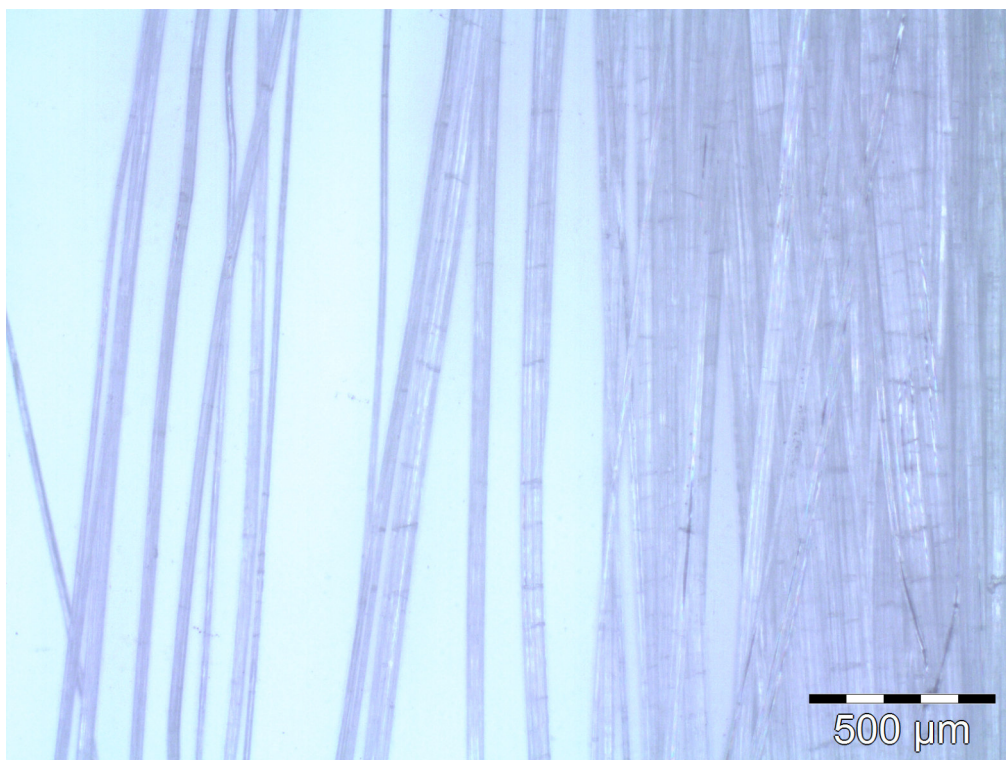


Figura 51: Amostra de material retirado da bobina.

Fonte: Autoria própria.

Já as Figuras 52 e 53 mostram detalhes da amostra de ruptura por fluência com carga de 50% da CR e as Figuras 54 e 55 mostram detalhes da amostra de ruptura por fadiga com carga de 50 a 10% da CR na frequência de 1,0 Hz. Tomando essas figuras como base, não é possível destacar diferenças significativas que indiquem o mecanismo de fratura dominante, mas apenas que ambas ocorreram de forma semelhante em nível de filamento.

Sobre as fraturas dos filamentos, é possível afirmar algumas delas apresentaram uma diminuição na seção transversal, indicativa de deformação plástica, entretanto, outras apresentaram um aspecto mais “crespo”, indicativo de outros processos de falha.

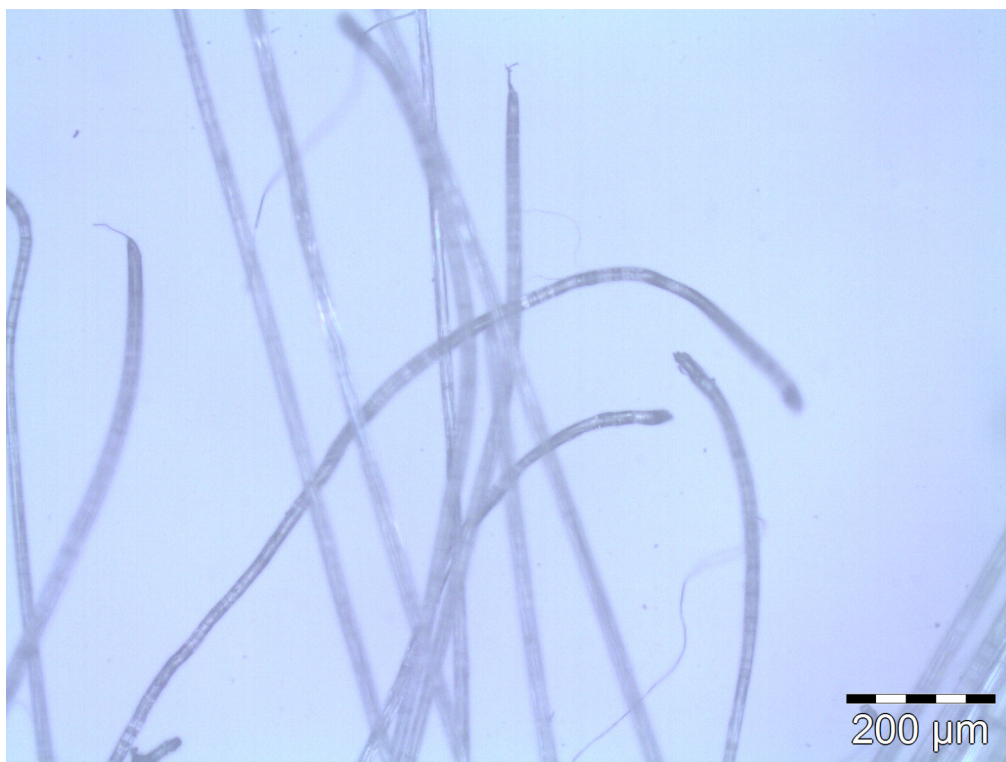


Figura 52: Amostra de ruptura por fluência com carga de 50% da carga de ruptura (1).

Fonte: Autoria própria.

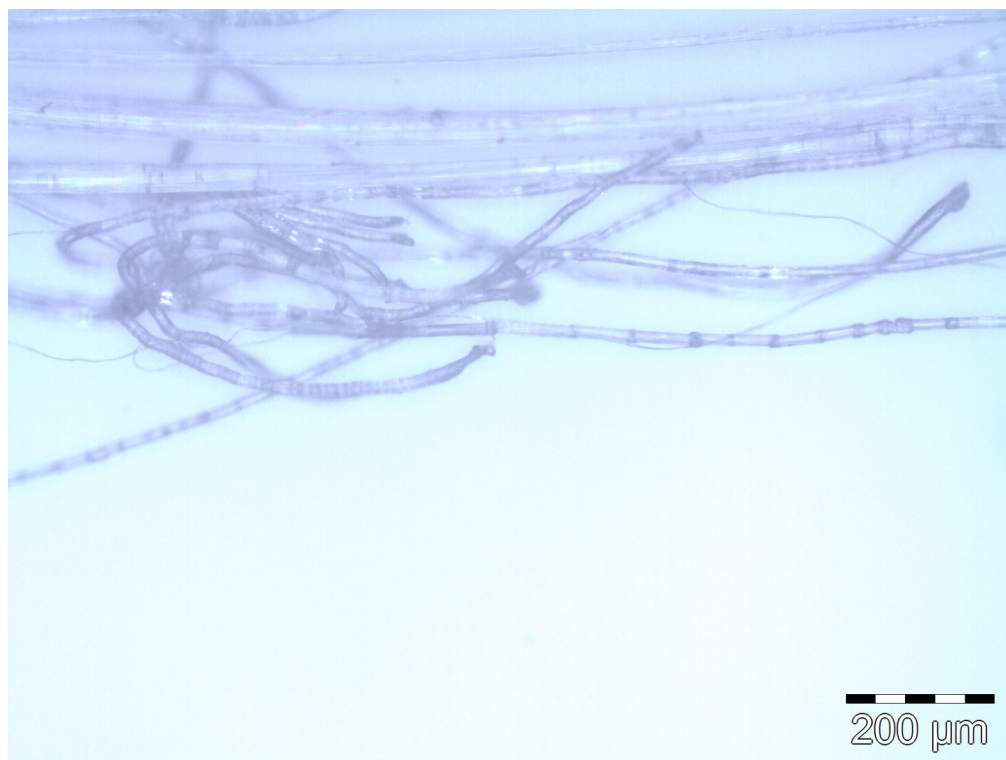


Figura 53: Amostra de ruptura por fluência com carga de 50% da carga de ruptura (2).

Fonte: Autoria própria.

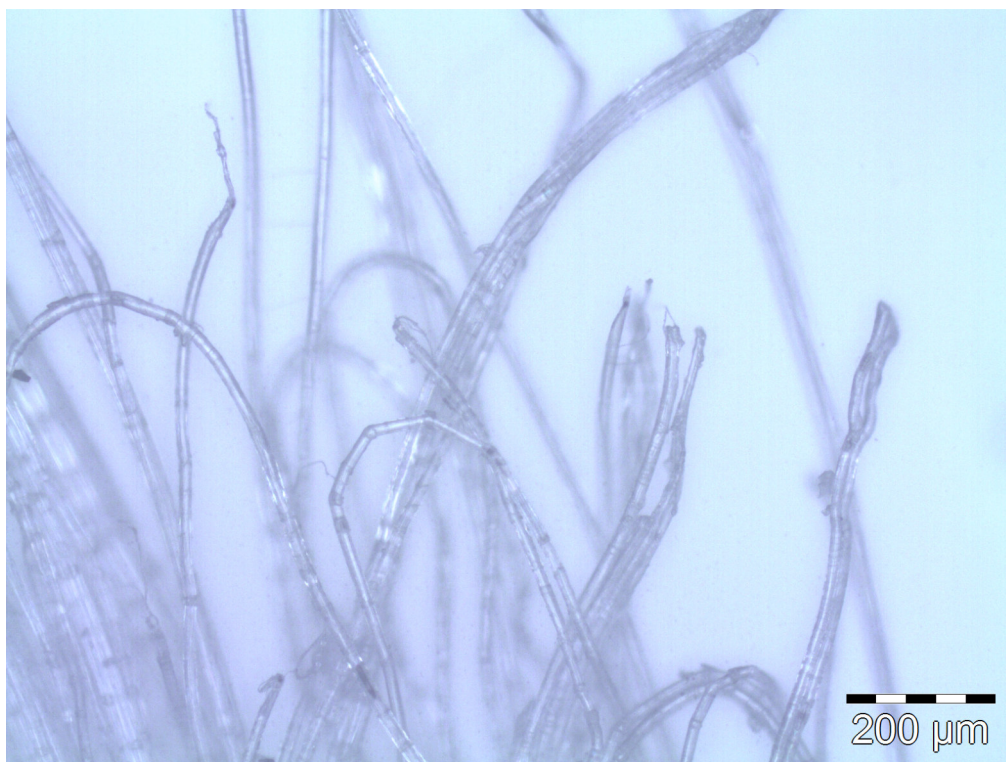


Figura 54: Amostra de ruptura por fadiga com carga de 50 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz (1).

Fonte: Autoria própria.



Figura 55: Amostra de ruptura por fadiga com carga de 50 a 10% da carga de ruptura na frequência de 1,0 Hz (2).

Fonte: Autoria própria.

Também é importante salientar que, após a ruptura, o material ainda sofre uma série de danos devido ao efeito elástico que impulsiona as extremidades rompidas contra os dispositivos de fixação, provocando compressão, flexão e dobramento. Assim, nem todos os danos exibidos nas figuras são oriundos dos esforços suportados pelo material durante os ensaios.

4.7 Discussões

Analizando as deformações em ruptura e em fluência, pode-se ter ideia da magnitude da influência da carga e do tempo no comportamento do *HMPE*. Enquanto em um ensaio de tração o material rompe com cerca de 3% de deformação, em um ensaio de fluência essa deformação pode facilmente ultrapassar os 15%. Esse fato torna perigosa qualquer previsão de vida do material baseada somente em deformação. Altas cargas, em curtos intervalos de tempo, comprometem a resistência do material, mas não provocam grandes alongamentos permanentes. Já cargas moderadas, em longos intervalos de tempo, têm o poder de provocar grandes alongamentos permanentes, sem necessariamente comprometer a resistência do material. Assim, as recomendações de Smeets, Jacobs e Mertens (2001) precisam ser avaliadas com cautela, tanto que Vlasblom e Bosman (2006) recomendam critérios adicionais para o descarte de cabos como o tempo de uso e condições de carregamento.

Nessa linha, a hipótese citada por Humeau *et al.* (2018) de que a falha por fluência do *HMPE* ocorre quando a deformação plástica atinge um valor crítico se torna irrelevante em termos práticos, pois não pode ser relacionada aos resultados de deformação obtidos nos ensaios e possivelmente se refere a um fenômeno localizado.

Apesar da afirmação de que a frequência não possui efeito na vida em fadiga do *HMPE* (Humeau *et al.*, 2018) assim como em outros materiais (Mandell, 1987; Janssen; Govaert; Meijer, 2008), os ensaios realizados mostram menores tempos de vida em todos os casos quando foi utilizada uma frequência maior. Essa incongruência pode ser justificada por meio de três causas: influência dos dispositivos de fixação, desgaste e temperatura.

Embora a forma de fixação ao equipamento evite a abrasão (atrito entre os dispositivos de fixação e o material), ainda assim provoca um complexo estado de tensões que pode contribuir para a ruptura.

Além disso, foram aplicadas torções aos corpos de prova, que comprovadamente diminuem a dispersão dos resultados, mas contribuem para o aumento da fricção entre os filamentos, gerando mais danos e calor. Aliado a isso, a natureza viscoelástica do material também é outra fonte de calor nos ensaios de fadiga.

Ademais, os resultados indicam que os mecanismos de dano que levaram à diminuição do tempo de vida nos ensaios com maior frequência também levaram à diminuição do tempo nos ensaios com maiores amplitudes. Praticamente em todos os ensaios de fadiga com a mesma carga máxima, quanto menor era a carga mínima (maior amplitude), menor era o tempo de vida. Isso vai de encontro ao entendimento corrente, pois o material deveria apresentar um tempo de vida maior por suportar menores cargas médias. A única exceção foi o caso de fadiga com carga de 90 a 70% da carga de ruptura na frequência de 0,1 Hz em relação ao caso com carga mínima de 50% da carga de ruptura. Isso porque o mecanismo de falha por fluência foi preponderante.

Humeau *et al.* (2018) classificariam todos esses menores tempos de vida como falhas prematuras nos ensaios devido às altas frequências, amplitudes e cargas. Contudo, os resultados obtidos servem de alerta para situações que fujam do padrão, como tempestades centenárias, ou que simplesmente não sejam as ideais.

Dessa forma, também é fundamental que se estude a interação dos cabos de *HMPE* com as terminações utilizadas em ancoragem, para garantir a segurança das instalações *offshore*.

5. CONCLUSÃO

Com este trabalho, acredita-se ter colaborado para um maior entendimento do comportamento do *HMPE* frente aos fenômenos de fluência e fadiga.

Em fluência, os resultados mostraram como o tempo de vida, a deformação e a taxa de deformação na fase de fluência secundária se relacionam com a carga. Em relação à deformação, observou-se que ela mantém uma relação linear com a carga no intervalo de 50 a 80% da carga de ruptura.

Em fadiga, foram apresentados vários resultados referentes ao tempo de vida, à deformação e à taxa de deformação, em função de cargas cíclicas definidas por cargas máximas (90, 70 e 50% da carga de ruptura) e cargas mínimas (70, 50, 30 e 10% da carga de ruptura) nas frequências de 0,1 e 1,0 Hz.

Correlacionando os resultados de fadiga com resultados equivalentes em fluência, foi observado que, em muitos casos, os resultados de fadiga se aproximam dos resultados de fluência com a carga máxima de fadiga.

Além disso, constatou-se que o aumento da frequência em fadiga diminui o tempo de vida do material. E, ao contrário do que se intui, o aumento da amplitude, mantendo a mesma carga máxima, também costuma diminuir a vida em fadiga.

Quanto às fraturas em fluência e fadiga, não foram observadas diferenças significativas que pudessem identificar uma ou outra causa de falha.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho trouxe dados conflitantes com a literatura corrente. Desse modo, seria interessante avaliar alguns pontos por meio de uma nova perspectiva, aproximando-se mais da realidade do emprego do *HMPE* em cabos para amarrações *offshore*.

A sugestão é que se avalie a influência da frequência e da amplitude de cargas cíclicas em subcabos de *HMPE*, monitorando a temperatura. Os subcabos são partes reais dos cabos e eliminam a necessidade de dispositivos de fixação, por meio do entrelaçamento das penas do cabo, produzindo resultados mais fidedignos.

Assim, torna-se possível o confronto dos dados levantados com uma condição mais próxima da realidade, também eliminando a influência dos dispositivos de fixação dos corpos de prova aos equipamentos de ensaios mecânicos.

7. REFERÊNCIAS

7.1 Referências Nominais

ASTM, American Society for Testing and Materials. **ASTM E 1823-05: Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing**. 2005.

BAIN, C.; DAVIES, P.; BLES, G.; MARCO, Y.; BARNET, J. Influence of bedding-in on the tensile performance of HMPE fiber ropes. **Ocean Engineering** (Percentil Scopus: 84%), v. 203, p. 107144, 2020.

BELLONI, E. da S. **Investigação experimental sobre o comportamento mecânico de multifilamentos de polietileno de alto módulo após sofrerem carregamentos dinâmicos**. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2019.

CANEVALORO JR., S. V. **Ciência dos Polímeros**: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2.ed. São Paulo: Artliber, 2010.

COLEMAN, B. D. Application of the theory of absolute reaction rates to the creep failure of polymeric filaments. **Journal of Polymer Science** (Percentil Scopus: 69%), v. 20, n. 96, p. 447-455, 1956.

COUTINHO, F.; MELLO, I. L.; SANTA MARIA, L. C. de. Polietileno: principais tipos, propriedades e aplicações. **Polímeros** (Percentil Scopus: 38%), v. 13, p. 01-13, 2003.

DA COSTA MATTOS, H. S.; CHIMISSO, F. E. G. Modelling creep tests in HMPE fibres used in ultra-deep-sea mooring ropes. **International Journal of Solids and Structures** (Percentil Scopus: 91%), v. 48, n. 1, p. 144-152, 2011.

DA CRUZ, D. M.; BARRETO, M. A.; ZANGALLI, L. B.; DA CRUZ JÚNIOR, A. J.; MELITO, I.; CLAIN, F. M.; GUILHERME, C. E. M. Mechanical characterization procedure of HMPE fiber for offshore mooring in deep waters. **Engineering Solid Mechanics** (Percentil Scopus: 64%), 2024.

DA CRUZ, D. M.; BARRETO, M. A.; ZANGALLI, L. B.; POPIOLEK JÚNIOR, T. L.; GUILHERME, C. E. M. Experimental Study of Creep Behavior at High Temperature in Different HMPE Fibers Used for Offshore Mooring. In: **Offshore Technology Conference Brasil** (Percentil Scopus: 26%). OTC, 2023. p. D021S026R002.

DA CRUZ, D. M.; FONDAIK, F. P.; BASTOS, M. B.; GUILHERME, C. E. M. Creep analysis of high modulus polyethylene (HMPE) multifilaments. In: **Rio Oil & Gas Expo and Conference**. 2022.

DEL VECCHIO, C. J. M.; CARTER, J. M. Load-elongation characteristics of high tenacity polyamide yarns. In: **ABCM Symposium Series in Solid Mechanics – Vol. 2**. 2009. p. 239.

FINDLEY, W. N.; LAI, J. S.; ONARAN, K. **Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials** with an Introduction to Linear Viscoelasticity. North-Holland Publishing Company, 1976.

GOVAERT, L. E.; BASTIAANSEN, C. W. M.; LEBLANS, P. J. R. Stress-strain analysis of oriented polyethylene. **Polymer** (Percentil Scopus: 82%), v. 34, n. 3, p. 534-540, 1993.

HAACH, L. F.; POITEVIN, D. T.; BASTOS, M. B. Prospects of synthetic fibers for deepwater mooring. In: **Rio Oil & Gas Expo and Conference**. 2010.

HUMEAU, C.; DAVIES, P.; SMEETS, P.; ENGELS, T. A. P.; GOVAERT L. E.; VLASBLOM M.; JACQUEMIN F. Tension fatigue failure prediction for HMPE fibre ropes. **Polymer Testing** (Percentil Scopus: 89%), v. 65, p. 497-504, 2018.

ISO, International Standardization Organization. **ISO 139: Textiles – Standard atmospheres for conditioning and testing**. 2014.

ISO, International Standardization Organization. **ISO 2062: Textiles – Yarn from packages – Determination of single-end breaking force and elongation at break using constant rate of extension (CRE) tester**. 2009.

JANSSEN, R. P. M.; GOVAERT, L. E.; MEIJER, H. E. H. An analytical method to predict fatigue life of thermoplastics in uniaxial loading: sensitivity to wave type, frequency, and stress amplitude. **Macromolecules** (Percentil Scopus: 90%), v. 41, n. 7, p. 2531-2540, 2008.

KANTERS, M. J. W.; KUROKAWA, T.; GOVAERT, L. E. Competition between plasticity-controlled and crack-growth controlled failure in static and cyclic fatigue of thermoplastic polymer systems. **Polymer testing** (Percentil Scopus: 89%), v. 50, p. 101-110, 2016.

LIAN, Y.; ZHENG, J.; LIU, H.; XU, P.; GAN, L. A study of the creep-rupture behavior of HMPE ropes using viscoelastic-viscoplastic-viscodamage modeling. **Ocean Engineering** (Percentil Scopus: 84%), v. 162, p. 43-54, 2018.

LIAN, Y.; LIU, H.; ZHANG, Y.; LI, L. An experimental investigation on fatigue behaviors of HMPE ropes. **Ocean Engineering** (Percentil Scopus: 84%), v. 139, p. 237-249, 2017.

MANDELL, J. F. Modeling of marine rope fatigue behavior. **Textile Research Journal** (Percentil Scopus: 63%), v. 57, n. 6, p. 318-330, 1987.

Ropes Direct. A beginner's guide to splicing rope. Disponível em: <<https://www.ropesdirect.co.uk/blog/a-beginners-guide-to-splicing-rope/>>. Acesso em: 15 de maio de 2024.

SMEETS, P.; JACOBS, M.; MERTENS, M. Creep as a design tool for HMPE ropes in long term marine and offshore applications. In: **Oceans 2001** (Percentil Scopus: 11%). IEEE, 2001. p. 685-690.

SUDAIA, D. P. **Avaliação do Efeito do Processo de Envelhecimento de Diferentes Tipos de Fibras Sintéticas com Aplicação em Cabos de Ancoragem Permanente.** 321 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) – Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

VAN DINGENEN, J. L. J. **High performance fibres.** Gel-spun high-performance polyethylene fibres, v. 3, p. 62-73. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2001.

VLASBLOM, M.; BOESTEN, J.; LEITE S.; DAVIES P. Development of HMPE fiber for permanent deepwater offshore mooring. In: **Offshore Technology Conference** (Percentil Scopus: 26%). OTC, 2012. p. OTC-23333-MS.

VLASBLOM, M. P.; BOSMAN, R. L. M. Predicting the creep lifetime of HMPE mooring rope applications. In: **OCEANS 2006** (Percentil Scopus: 11%). IEEE, 2006. p. 1-10.

WILDING, M. A.; WARD, I. M. Creep and recovery of ultra high modulus polyethylene. **Polymer** (Percentil Scopus: 82%), v. 22, n. 7, p. 870-876, 1981.

WILDING, M. A.; WARD, I. M. Creep and stress-relaxation in ultra-high modulus linear polyethylene. **Journal of materials science** (Percentil Scopus: 87%), v. 19, p. 629-636, 1984.

WILDING, M. A.; WARD, I. M. Tensile creep and recovery in ultra-high modulus linear polyethylenes. **Polymer** (Percentil Scopus: 82%), v. 19, n. 8, p. 969-976, 1978.

7.2 Referências por Estrato

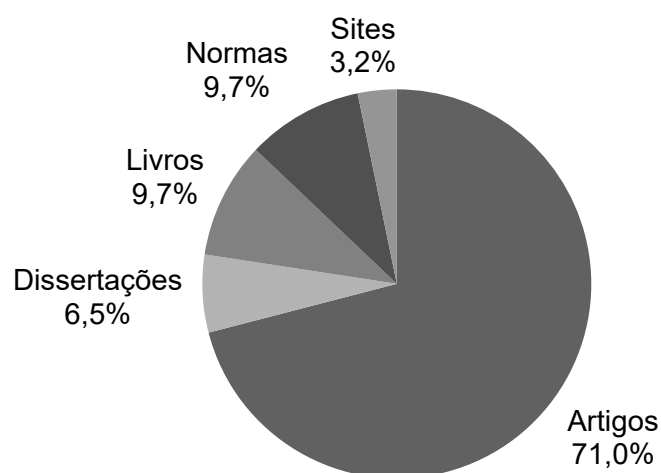


Figura 56: Distribuição bibliográfica por estrato.

Fonte: Elaboração própria.

7.3 Referências dos Artigos por Qualis

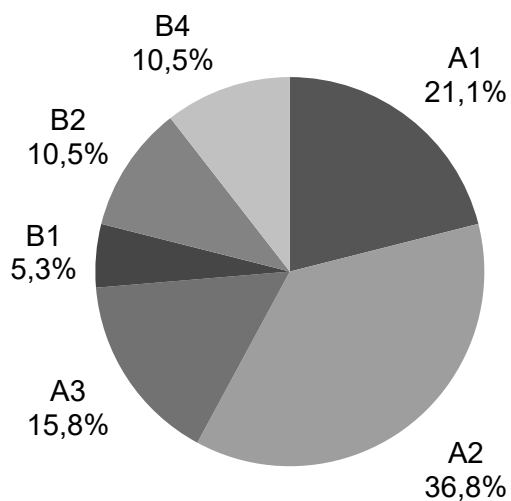


Figura 57: Distribuição dos artigos por Qualis.

Fonte: Elaboração própria.

7.4 Referências dos Artigos por Ano

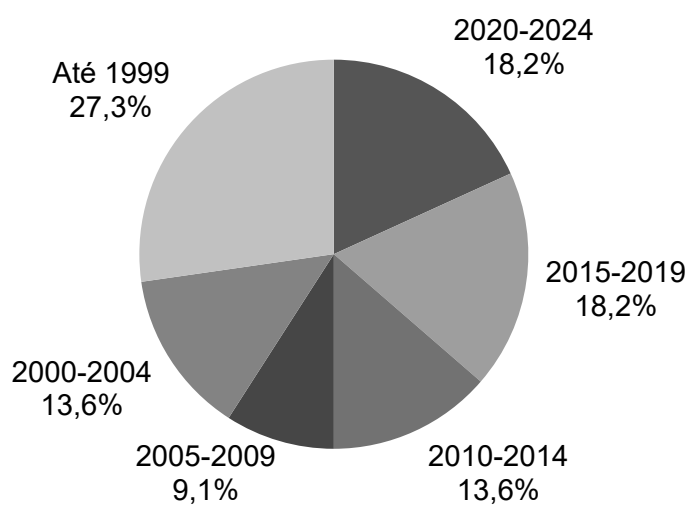


Figura 58: Distribuição dos artigos por ano.

Fonte: Elaboração própria.