



Rodrigo da Silva Lomonte

**Determinação da vida em fadiga de altíssimo
ciclo de material estrutural**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento
de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Marcos Venicius Soares Pereira

Coorientador(a): Juliana de Paiva Corrêa

Rio de Janeiro

Dezembro de 2020

“Diga-me eu esquecerei, ensina-me e eu poderei lembrar, envolva-me e eu aprenderei”

Benjamim Franklin

Agradecimentos

De todas as linhas deste trabalho as que descrevo agora possivelmente são as mais difíceis. Expressar minha gratidão a todas as pessoas que contribuíram para o sucesso na minha caminhada em apenas uma página seria no mínimo injusto. Porém, não poderia deixar de prestar minha homenagem.

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por ter me dado força e saúde para superar as dificuldades. Deixo agora dois agradecimentos especiais. O primeiro deles à minha mãe, que com todo seu amor e carinho sempre esteve ao meu lado, com seu apoio incondicional, me fazendo acreditar em um mundo melhor. O segundo deles dedico ao meu pai, a pessoa que mais me inspira e que me fez crescer como pessoa, com seus conselhos que valem para a vida.

Aos meus amigos do Colégio Ipiranga, meu eterno agradecimento pelo companheirismo, nem a distância foi capaz de separar nossa amizade. Sem vocês toda essa jornada não teria sentido.

Aos meus amigos da PUC, foi um prazer conhecer vocês, agradeço pela paciência, dedicação, suporte e pelos incansáveis dias de estudo. A participação de cada um foi fundamental para que eu pudesse chegar tão longe no processo de graduação.

Agradeço à PUC-Rio pela oportunidade de estudar Engenharia Mecânica. Todo conhecimento adquirido vai muito além da rotina acadêmica. Sempre serei grato por ter feito parte da instituição, honrarei e levarei seu nome junto comigo para o restante de minha vida profissional.

Ao meu orientador, Marcos Venicius, agradeço pela disponibilidade e por compartilhar seu vasto conhecimento comigo desde suas aulas na graduação até os Projetos de Iniciação Científica e de Graduação.

À OMNI Táxi Aéreo, que abriu as portas para mim, sou grato pela oportunidade de estágio, permitindo conhecer a engenharia na prática em uma experiência única, sendo meu ponto de partida para o mercado profissional.

A todos que de alguma forma participaram dessa trajetória, meu sincero obrigado.

RESUMO

Determinação da vida em fadiga de altíssimo ciclo de material estrutural

Componentes mecânicos podem ter uma vida-fadiga maior do que aquela convencionalmente estabelecida em 10^7 ciclos. A fadiga de altíssimo ciclo (UHCF) assumiu enorme importância quando estabeleceu que a tensão limite de fadiga, determinada em $10^6 - 10^7$ ciclos, não existe em muitos casos. O presente projeto tem por objetivo determinar a vida-fadiga, em regime de mega e gigaciclos, de aço estrutural utilizado na fabricação de eixo virabrequim e estudar a influência de descontinuidades metalúrgicas sobre a resistência à fadiga do material. Experimentalmente, corpos de prova foram usinados a partir do mesmo material do eixo que falhou em operação, atendendo as condições de contorno para testes ultrassônicos. Dadas as propriedades mecânicas do material (módulo de elasticidade, limite de escoamento, limite de resistência mecânica e densidade), os corpos de prova de UHCF foram submetidos a ensaios para levantamento da vida-fadiga entre $10^7 - 10^9$ ciclos, em frequência ultrassônica de 20 kHz, no Laboratório de Fadiga de Altíssimo Ciclo da PUC-Rio. Com os ensaios devidamente finalizados e os dados obtidos, análises serão permitidas para entender melhor este novo regime, até pouco tempo desconhecido.

Palavras-chave: fadiga; limite de fadiga; ensaios ultrassônicos; aço estrutura; gigaciclos; UHCF; vida-fadiga.

ABSTRACT

Determination of ultra-high cycle fatigue behavior of structural material

Mechanical components can have a longer fatigue life than that conventionally established in 10^7 cycles. Ultra-High Cycle Fatigue (UHCF) has assumed great significance after it has been established that a fatigue limit does not exist in many cases. This project aims to determine the fatigue life, in mega and gigacycle regime, of structural steel used in the manufacture of a crankshaft and to study the influence of metallurgical inhomogeneities on strength fatigue. Experimentally, specimens meeting the boundary conditions for ultrasonic tests, will be machined from the same material of the crankshaft that failed in operation. Given the mechanical properties of the material (elasticity modulus, yield limit, mechanical strength and density), the UHCF specimens will be subjected to $10^7 - 10^9$ cycles, at an ultrasonic frequency of 20 kHz at Laboratório de Fadiga de Altíssimo Ciclo da PUC-Rio. With the tests completed and the data obtained, analyzes will be done in order to better understand this new regime.

Keywords: fatigue; fatigue limit; ultrasonic tests; structural steel; gigacycle; UHCF; fatigue life.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
2.	FUNDAMETAÇÃO TEÓRICA	12
2.1.	O CONCEITO DE FALHAS MECÂNICAS	12
2.2.	FADIGA.....	14
2.2.1.	Conceitos de Tensão	14
2.2.2.	Trincamento por Fadiga	16
2.2.3.	Métodos tradicionais de dimensionamento em fadiga	20
2.2.4.	A Metodologia SN (ou de Wöhler).....	21
2.2.5.	Regimes no estudo de Fadiga	23
2.2.6.	A Fadiga de Altíssimo Ciclo (UHCF).....	25
2.2.7.	A Curva DUPLEX SN e os mecanismos de falha em UHCF	26
3.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
3.1.	O AÇO DIN 34CrNiMo6.....	29
3.2.	O CORPO DE PROVA	30
3.3.	A MÁQUINA DE ENSAIO	34
4.	RESULTADOS	38
5.	CONCLUSÃO	41
6.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	42
7.	BIBLIOGRAFIA	43

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Flambagem de Trilhos (Fonte: National Transportation Library [3])	13
Figura 2: Suporte estrutural do trem de pouso trincado (Fonte: autor)	13
Figura 3: Ciclos de Carregamento (Fonte: Dowling, 2013 [2])	15
Figura 4: Fases da vida em fadiga (Fonte: Schijve, 2009, adaptado [4])	16
Figura 5: Deslizamento cíclico da iniciação da trinca (Fonte: Schijve, 2009 [4])	17
Figura 6: Esquema da nucleação por PSB (Castro e Meggiolaro, 2009 [1])	17
Figura 7: Deformação na ponta da trinca e seu avanço (Fonte: Schijve, 2009 [4])...	18
Figura 8: Estrias de superfície fraturada, aço Ni-Cr-Mo-V (Fonte: Dowling,2013[2])	19
Figura 9: Marcas de praia, aspecto macroscópico (Fonte: Prof. Marcos Pereira [6])	19
Figura 10: Superfície típica de fratura por fadiga (Fonte: Castro, 2019 [5])	20
Figura 11: Curva SN típica para o aço A-517 (Fonte: Dowling, 2013 [2])	22
Figura 12: Curvas de Wöhler em log-log (Fonte: Castro e Meggiolaro, 2009 [1])	22
Figura 13: Representação dos regimes LCF e HCF (Fonte: Schijve, 2002 [9])	24
Figura 14: Representação do decaimento após 10^7 ciclos (Fonte: Downling, 2013 [2])	24
Figura 15: Esquemático da Curva DUPLEX SN (Fonte: Pyttel, 2010 [8])	26
Figura 16: Regiões preferenciais de iniciação de trincas (Fonte: Bathias, 2001 [10])	27
Figura 17: Fish-Eye e o defeito que o originou (Fonte: Mughrabi, 2016 [14])	28
Figura 18: Estágios de falha em superfície típica (Fonte: Kazymyrovych, 2009 [12])	28
Figura 19: Corpo de Prova em fadiga ultrassônica (Fonte: Bathias e Paris, 2005 [16])	32
Figura 20: Geometria dos corpos de prova (Fonte: Corrêa, 2020)	33
Figura 21: Corpo de prova usinado (Fonte: Corrêa, 2020)	34
Figura 22: Sistema de teste na máquina USF- 2000A (Fonte: SHIMADZU, 2016 [15])	36
Figura 23: Equipamento de fadiga ultrassônica no LABFADAC (Fonte: Corrêa, 2020)	37
Figura 24: Curva S-N do aço DIN 34CrNiMo6 ensaiado em teste ultrassônico	39
Figura 25: Curva S-N do ensaio com região de falha	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação entre os tempos de ensaio (Fonte: Teixeira, 2018 [7])	25
Tabela 2: Composição Química do Aço 34CrNiMo6	29
Tabela 3: Propriedades Mecânicas do Aço 34CrNiMo6	30
Tabela 4: Dimensões dos parâmetros dos corpos de prova	34
Tabela 5: Ensaio com 450 MPa (50% do LRM).....	38
Tabela 6: Ensaio com 360 MPa (40% do LRM).....	38
Tabela 7: Ensaio com 270 MPa (30% do LRM).....	39

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta\sigma$	Gama de Tensão
σ_a	Amplitude de Tensão
σ_m	Tensão Média
R	Razão de carregamento
A	Razão de Amplitude
σ_{max}	Tensão Máxima
σ_{min}	Tensão mínima
τ_{max}	Tensão cisalhante máxima
ΔK	Varição do fator de intensidade de tensões
K_{max}	Fator de intensidade de tensão máxima
K_{min}	Fator de intensidade de tensão mínimo
B	Expoente de Wöhler
C	Coefficiente de Wöhler
S_F	Resistência a fadiga dado o número de ciclos
S'_L	Limite de Fadiga
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Densidade do material
E	Módulo de Elasticidade
E_d	Módulo de Elasticidade dinâmico
e	Volume de dilatação
c	Velocidade de propagação
A_0	Amplitude de deslocamento

U	Deslocamento da barra elástica
$R_0 ; R_1 ; R_2$	Raios do Corpo de Prova
L	Comprimento total do corpo de prova
L_2	Comprimento fixo do corpo de prova
L_1	Comprimento de ressonância do corpo de prova
ω	Frequência angular
f	Frequência de ensaio
k	Razão da velocidade angular e velocidade de propagação
$\alpha ; \beta$	Parâmetros da equação de vibração

1. INTRODUÇÃO

O estudo de falhas estruturais é umas das principais questões dentro da engenharia, porém seu campo de aplicação vai muito além da rotina acadêmica. Um projeto só pode ser considerado seguro e confiável se ele for corretamente dimensionado para o tipo de falha predominante, permitindo não somente previsões acerca de sua vida em serviço, como também análises que auxiliem as operações, com levantamento de dados para uma correta manutenção, a fim de possibilitar inspeções periódicas e controladas, evitando falhas catastróficas, sempre levando em consideração a viabilidade econômica.

Dentro deste contexto, falhas podem ser definidas como a perda parcial ou completa da capacidade operacional de um componente. As principais falhas mecânicas são a deflexão excessiva, o escoamento, flambagem, fluência, desgaste, fratura e fadiga, esta última tema central deste trabalho.

A fadiga é certamente o mecanismo de falha dominante nas estruturas mecânicas. Ela é resultado do processo de acúmulo de danos no material devido a aplicação de carregamentos cíclicos e tem como principal característica o trincamento da peça.

Trata-se de um conteúdo relativamente recente, com início datado de meados do século XIX. Uma das principais metodologias do projeto à fadiga é conhecida como o Método SN ou de Wöhler, que relaciona gamas de tensão com o número de ciclos para a falha, largamente utilizado para evitar ou prever a iniciação de trincas por fadiga em vidas longas. Apesar de ser um método conceitualmente simples e corroborado por uma enorme quantidade de dados empíricos, ele considera o conceito de uma vida infinita à fadiga, ou seja, para carregamentos abaixo de determinado valor de amplitude de tensão, denominado de limite de resistência à fadiga, os componentes mecânicos não falham em serviço. Porém, em função da crescente demanda por equipamentos cada vez mais eficientes, que produzem respostas em intervalos de tempo expressivamente menores e com elevadas solicitações em operação, componentes mecânicos podem ter uma vida-fadiga maior do que a convencionalmente estabelecida em 10^7 ciclos de carregamento. Conseqüentemente, as abordagens convencionais de vida-fadiga não são mais aplicáveis, fazendo com

que a avaliação do comportamento em fadiga de longa duração ganhe notória importância em projetos de componentes e estruturas que irão atingir $10^7 - 10^{12}$ ciclos de carregamento, criando o conceito de fadiga de altíssimo ciclo (Ultra High Cycle Fatigue – UHCF). A UHCF assumiu grande importância por estabelecer que uma tensão limite de fadiga, endurance limit, não existe em muitos casos. Estudos recentes ressaltam que, a maioria dos materiais, incluindo ligas ferrosas, apresentam resistência à fadiga que decresce continuamente entre $10^7 - 10^{10}$ ciclos, demonstrando que um projeto a fadiga baseado no critério de vida infinita pode ser inadequado em certas aplicações, propondo que a resistência à fadiga associada a um número de ciclos seja mais relevante do que o próprio limite de fadiga do material.

2. FUNDAMETAÇÃO TEÓRICA

Falhas por fadiga continuam sendo a principal preocupação em projetos de engenharia. Nota-se que os custos com a prevenção da fratura são elevados. Estima-se que 80% deles são direcionados a situações em que o carregamento cíclico e a fadiga são fatores dominantes [2]. A integridade estrutural só é assegurada se nenhum mecanismo de falha possa comprometer o pleno funcionamento de um componente em sua vida em serviço. Sendo assim, é de extrema importância o melhor entendimento do conceito de falha.

2.1. O CONCEITO DE FALHAS MECÂNICAS

Como citado, falha é a perda parcial ou completa da capacidade de funcionamento de uma peça e elas são ditas mecânicas quando são causadas principalmente por carregamentos ao longo de sua vida em operação. Neste contexto, as falhas mecânicas podem ser divididas em dois grandes grupos, denominados de globais e de locais. As falhas globais, de maneira simplificada, independem das particularidades locais do material, portanto, sua modelagem deve levar em consideração a análise do campo de tensões em pelo menos uma seção resistente da peça. Já as falhas locais são primordialmente causadas por tensões atuantes em pontos críticos do componente, que podem quebrar uma peça sem que o dano afete todo o seu volume, sendo muito dependente de entalhes, características metalúrgicas e qualquer outro tipo de concentrador de tensão, como por exemplo furos e ranhuras. Isto faz com que, na prática, seja suficiente a localização dessas regiões críticas juntamente com a identificação de sua história de tensões para que o dano possa ser devidamente modelado. A seguir são descritos dois exemplos distintos para demonstrar a diferença entre esses dois tipos de falhas:



Figura 1: Flambagem de Trilhos (Fonte: National Transportation Library [3])

Na figura anterior percebe-se o fenômeno da flambagem global, uma falha mecânica causada por tensões compressivas, originadas principalmente pela dilatação térmica a que esses trilhos estão sujeitos, fato que leva a uma instabilidade estrutural. Já na imagem seguinte, pode-se ver uma viga do conjunto do trem de pouso de um helicóptero que precisou ser substituído devido ao aparecimento de trincas ao longo da sua estrutura. As trincas se iniciaram nos furos que abrigam os parafusos e rebites que, como citado, representam pontos de concentração de tensão, evidenciando um exemplo de falha local.



Figura 2: Suporte estrutural do trem de pouso trincado (Fonte: autor)

Com o conceito de falha devidamente definido, é possível entrar no campo de estudo da fadiga e de suas particularidades.

2.2. FADIGA

A fadiga é o mecanismo de falha dominante em estruturas mecânicas e está diretamente relacionada a um processo de acúmulo de dano no material quando o componente é submetido a carregamentos cíclicos ao longo de sua vida em serviço. Sua principal característica é a nucleação e a propagação paulatina de uma trinca, que após nucleada se propaga de maneira estável até atingir seu tamanho crítico, em um processo denominado de trincamento. Após alcançar este tamanho crítico, seu regime de propagação se torna instável e a falha da peça se torna iminente. Vale ressaltar que a falha por fadiga ocorre tipicamente sob carregamentos mecânicos inferiores àqueles que o material poderia resistir em condições monotônicas.

Sendo um mecanismo local, progressivo e cumulativo, o estudo das falhas por fadiga deve levar em conta características como a geometria da peça, as cargas de serviço, as propriedades mecânicas, as análises de tensão, o surgimento de trincas e o acúmulo de danos, tópicos que serão abordados a seguir.

2.2.1. Conceitos de Tensão

Via de regra, há três fatores que favorecem a formação de uma trinca por fadiga: tensões trativas, número de ciclos e variação das cargas aplicadas. As tensões trativas são danosas à vida de uma peça, ao mesmo tempo que as compressivas são benéficas, pois enquanto estas tendem a fechar a trinca quando aplicadas, dificultando seu crescimento, aquelas tendem a abri-las, facilitando sua propagação.

Dito isto, torna-se fundamental definir os ciclos de carregamento e todos os parâmetros que são utilizados na modelagem da vida-fadiga de um componente. Na prática e em testes de fadiga, é muito comum a aplicação de carregamentos que possuem valores máximos e mínimos de tensão fixos, no que é conhecido como amplitude de tensão constante, como mostrado na representação gráfica abaixo:

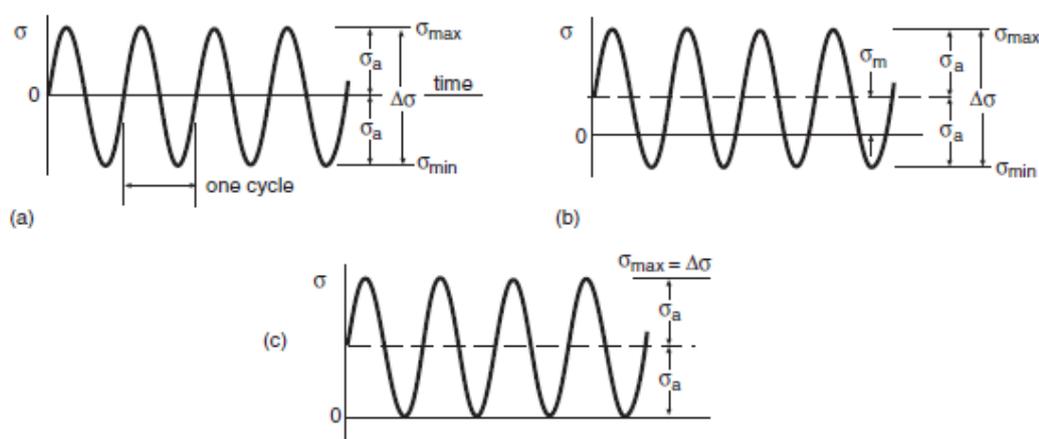


Figura 3: Ciclos de Carregamento (Fonte: Dowling, 2013 [2])

Pela figura 3, pode-se perceber cinco conceitos relevantes: gama de tensão ($\Delta\sigma$), amplitude de tensão (σ_a), tensão média (σ_m), razão de carregamento (R) e razão de amplitudes (A). Vale destacar que a gama de tensão representa a diferença entre as tensões máximas e mínimas aplicadas e a tensão média é a carga a que o componente está permanentemente sujeito. No caso (a) mostrado acima, tem-se um carregamento totalmente reversível, ou seja, de tensão média nula. Já o caso (b) tem σ_m diferente de zero e o (c) representa a situação em que o material está sempre submetido a uma tensão trativa. Matematicamente, esses conceitos são definidos da seguinte forma:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (1)$$

$$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (3)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (4)$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \quad (5)$$

2.2.2. Trincamento por Fadiga

O trincamento por fadiga é induzido pela aplicação repetida de cargas alternadas, e depende da gama e do máximo de tensões de serviço [1]. Vale ressaltar que as trincas de fadiga podem ter início em um ponto crítico de um componente mesmo que esta região esteja inicialmente livre de qualquer defeito.

De maneira geral, o processo de falha por fadiga pode ser dividido em três etapas: iniciação (nucleação), propagação e fratura. A seguir é demonstrado um diagrama que indica as fases da vida em fadiga, sendo importante enfatizar que grande parte deste período está relacionada a etapa de nucleação da trinca.

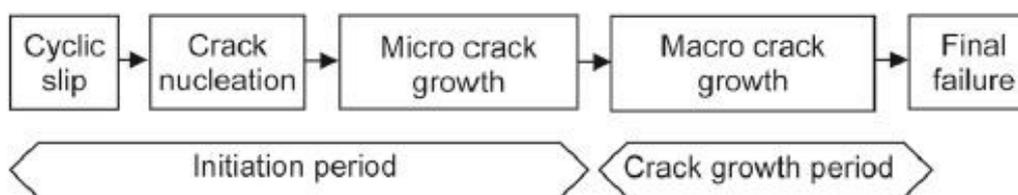


Figura 4: Fases da vida em fadiga (Fonte: Schijve, 2009, adaptado [4])

A iniciação típica das trincas por fadiga envolve a movimentação cíclica das discordâncias, fenômeno associado a deformações plásticas, apesar de as estruturas de engenharia serem dimensionadas para trabalharem sob condições de carregamento macroscopicamente elásticos. Para que estes carregamentos elásticos provoquem deformações plásticas localizadas, é necessário que algum elemento atue como concentrador de tensão, podendo ser uma descontinuidade geométrica ou até mesmo um defeito metalúrgico (como inclusões não metálicas no material). Porém, em peças consideradas livres de defeitos, a iniciação se inicia de fato na superfície devido a um mecanismo decorrente do ciclo de cargas, denominado de Bandas de Deslizamento Persistentes (*Persistent Slip Bands*, PSB). Como a superfície do componente mecânico está, predominantemente, sob um estado plano de tensões, enquanto que as regiões centrais estão sob predominância de um estado triaxial é de se esperar que as regiões superficiais estejam mais sujeitas a deformações plásticas, uma vez que o valor da tensão cisalhante máxima (τ_{\max}) atuante é maior, tendendo a formar intrusões e extrusões. Com o encruamento decorrente da deformação plástica a cada ciclo de carregamento, a banda de deslizamento vizinha à

anteriormente formada passa a sofrer ação da cisalhante. O processo de aparecimento de intrusões e extrusões é repetido dando início a uma micro trinca que irá concentrar todo o dano, crescendo inicialmente paralelamente a direção de τ_{\max} . Nas imagens mostradas a seguir pode ser visto com mais detalhes o mecanismo descrito, com a demonstração do comportamento ao longo dos ciclos e ampliação das zonas de aparecimento das intrusões e extrusões:

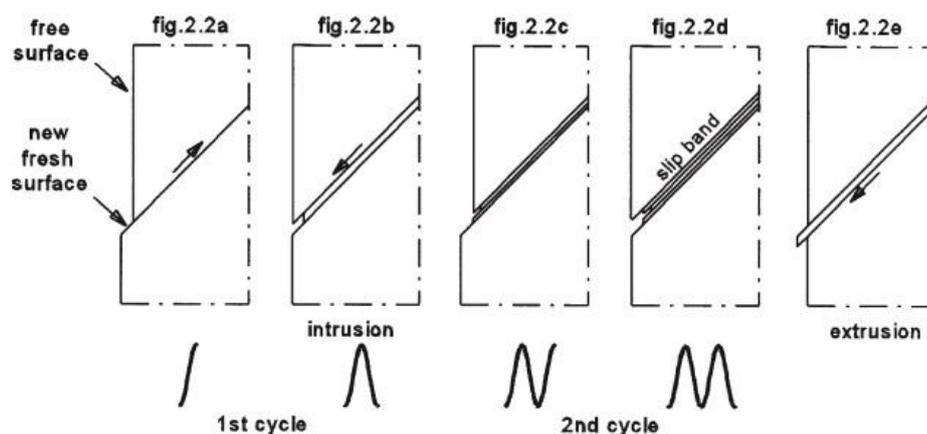


Figura 5: Deslizamento cíclico da iniciação da trinca (Fonte: Schijve, 2009 [4])

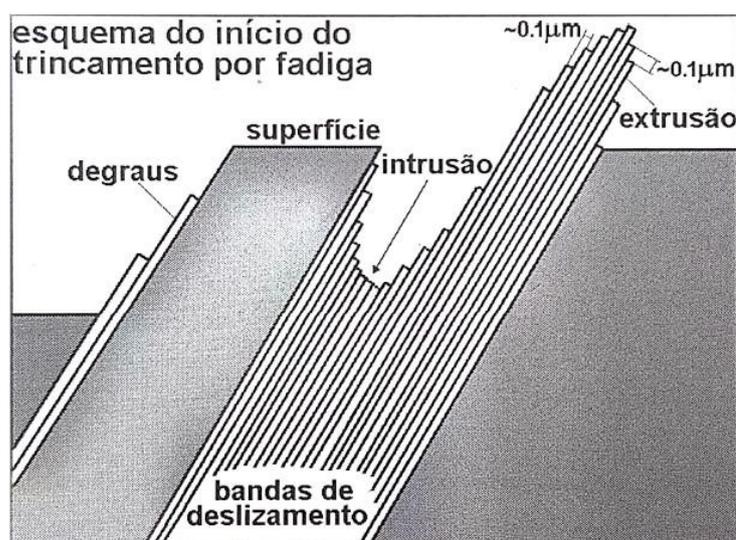


Figura 6: Esquema da nucleação por PSB (Castro e Meggiolaro, 2009 [1])

Terminada a fase de iniciação, a trinca entra em sua segunda etapa, a propagação, momento em que ela troca de direção e passa a crescer numa direção perpendicular à máxima tensão normal trativa como forma de diminuir a perda de energia por atrito em suas faces. Nessa fase, considerada estável, a trinca só continua seu avanço quando uma tensão de tração tenha magnitude suficiente para abri-la,

fazendo com que sua ponta se deforme plasticamente ao longo dos ciclos, como pode ser visto na representação a seguir:

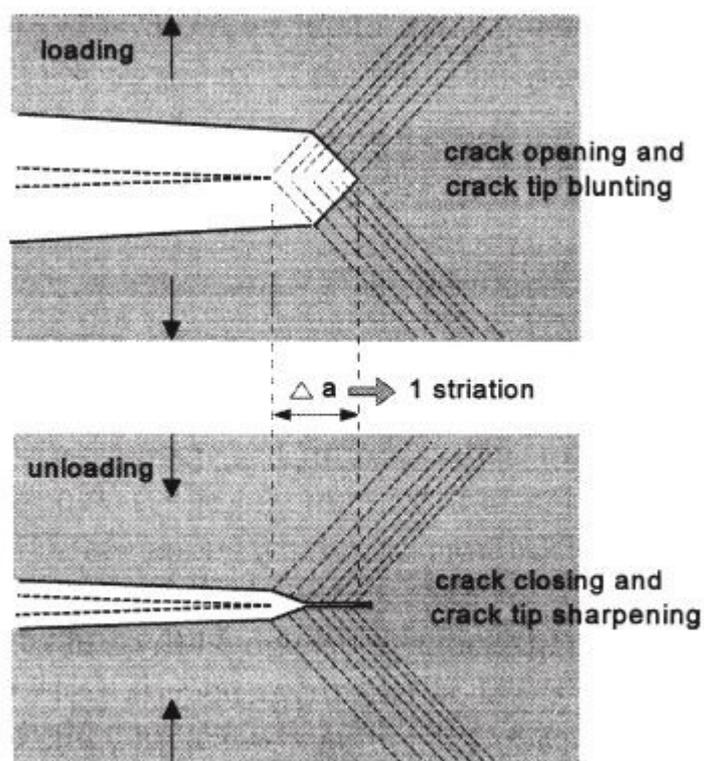


Figura 7: Deformação na ponta da trinca e seu avanço (Fonte: Schijve, 2009 [4])

Os sucessivos cegamentos e afiações promovidos na ponta da trinca pelas tensões trativas e deformações plásticas formam as conhecidas estrias de fadiga. Elas são característica microscópicas (só sendo observadas em Microscópios Eletrônico de Varredura, MEV), que nem sempre são visíveis em todos os materiais, mas que são fontes extremamente úteis para indicar o histórico cíclico de carregamento e a direção de propagação da trinca. Um exemplo dessas estrias pode ser observado na figura que segue:

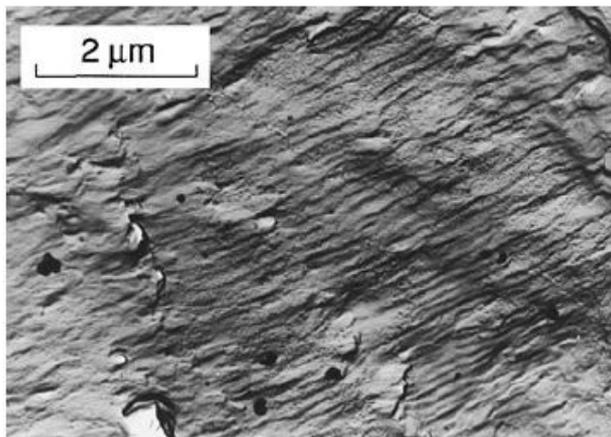


Figura 8: Estrias de superfície fraturada, aço Ni-Cr-Mo-V (Fonte: Dowling,2013[2])

Vale ressaltar ainda que, na região de propagação estável, é possível identificar um padrão macroscópico conhecido como marcas de praia [5]. Estas apresentam-se como ondulações concêntricas ao ponto de início da trinca e são extremamente importantes na identificação de interrupções nos períodos de propagação e na localização da posição das trincas quando existem alterações nos ciclos de carregamento. Estas mudanças ocorrem por desligamentos e partidas de equipamentos, mudanças nas magnitudes e na frequência de carregamento ou pela diferença no tempo de corrosão durante a propagação. Por fim, é importante enfatizar que as marcas de praia, mostrada na próxima imagem, não devem ser confundidas com as estrias citadas anteriormente.

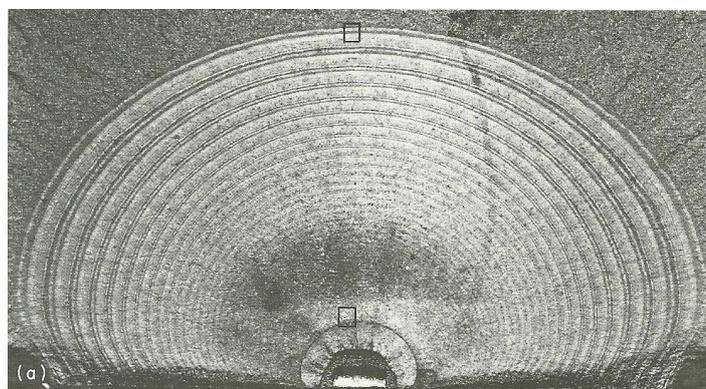


Figura 9: Marcas de praia, aspecto macroscópico (Fonte: Prof. Marcos Pereira [6])

Essa propagação lenta se dá até o momento em que a trinca atinge seu tamanho crítico. A partir deste ponto, a propagação se torna instável e a falha da peça é iminente. A seguir é demonstrada uma superfície de fratura por fadiga, sintetizando todos os conceitos descritos neste tópico.

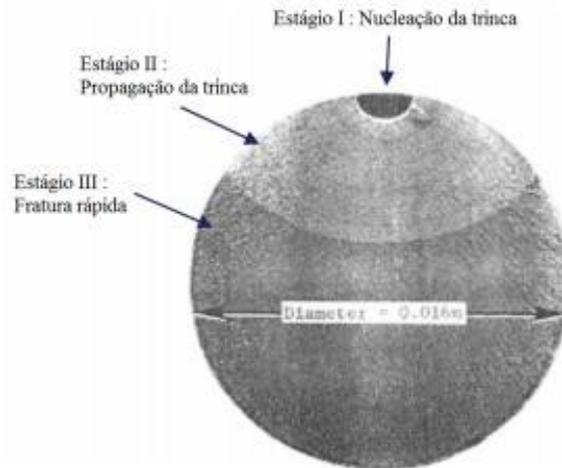


Figura 10: Superfície típica de fratura por fadiga (Fonte: Castro, 2019 [5])

2.2.3. Métodos tradicionais de dimensionamento em fadiga

Apesar do vasto conhecimento adquirido ao longo dos tempos sobre trincas, continua sendo uma tarefa extremamente lenta e cara gerar modelos matemáticos precisos que quantifiquem a influência dos vários defeitos e do gradiente de tensão em um pequeno volume de material. Sendo assim, existem três metodologias no estudo de fadiga convencional que devem ser mencionadas. São elas:

- 1) Método SN: modelagem matemática simples e com vasta quantidade de dados empíricos. Correlaciona as tensões cíclicas com o número de ciclos para a falha nas chamadas Curvas de Wöhler. Este método supõe que as tensões macroscópicas que solicitam o ponto crítico são lineares elástica, ou seja, abaixo do limite de escoamento do material
- 2) Método ϵN : reconhece as deformações elastoplásticas cíclicas que atuam no ponto crítico da peça e as relaciona com o número de ciclos para a falha. É um método menos conservador, tendo a principal vantagem prever a vida de iniciação da trinca de fadiga.
- 3) Método da/dN : baseado nos conceitos da mecânica da fratura linear elástica, correlacionando as taxas de propagação da trinca (da/dN) com a variação do fator de intensidade de tensões ($\Delta K = K_{max} - K_{min}$) nas conhecidas curvas $da/dN \times \Delta K$.

Como o foco deste trabalho se baseia no levantamento de curvas de vida-fadiga em que a relação entre o carregamento aplicado e o número de ciclos é fundamental, o método SN será melhor detalhado a seguir.

2.2.4. A Metodologia SN (ou de Wöhler)

O método SN é utilizado para evitar ou para prever a iniciação de trincas por fadiga em vidas longas, ou seja, para dimensionar peças e estruturas que resistam a um grande número de ciclos sob as cargas reais de serviço [1]. Esta metodologia foi desenvolvida a partir dos trabalhos pioneiros do engenheiro e pesquisador August Wöhler.

Como citado, a rotina de dimensionamento do SN não quantifica explicitamente o efeito plástico e nem reconhece a presença de trincas. Portanto, vale-se de uma análise de tensões linear elástica, fazendo com que esse método só possa ser utilizado, sem restrições, quando a tensão macroscópica no ponto crítico da peça tiver valor menor que o do limite de resistência ao escoamento cíclico do material, que é modelado, nesta região, como contínuo, homogêneo, isotrópico, linear e elástico. Vale ressaltar que, respeitando suas limitações, esta filosofia apresenta um conjunto de técnicas de cálculo e de informações simples e confiáveis, sustentada por uma vasta experiência prática. Além disso, supõem que o início do trincamento possa ser reproduzido a partir de testes em corpos de prova feitos do mesmo material e com as mesmas características locais do componente de interesse quando sujeitos a mesma história de tensões.

Uma das principais características desta rotina de dimensionamento são as curvas que relacionam a amplitude de tensão com o número de ciclos para a falha (N), conhecidas como curva SN, ou simplesmente curvas de Wöhler. Elas são obtidas testando-se pequenos corpos de prova (CP) sob gamas de tensão $\Delta\sigma$ constantes, como pode ser exemplificado a seguir para o caso do aço A-517:

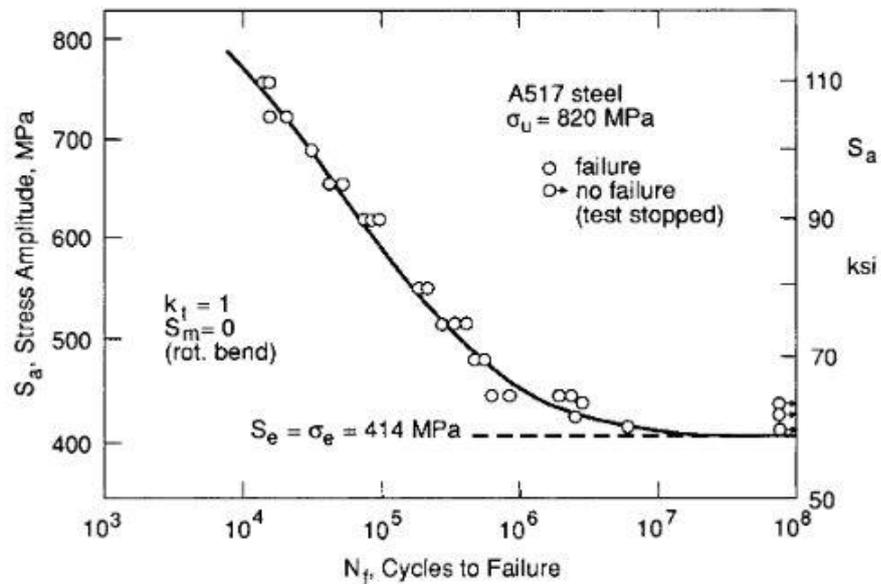


Figura 11: Curva SN típica para o aço A-517 (Fonte: Dowling, 2013 [2])

O gráfico mostrado anteriormente é gerado através de diversos testes em CPs padronizados, que em geral tendem a apresentar certa dispersão em seus resultados. É importante enfatizar que essas curvas reproduzem a resistência à fadiga do material e não da estrutura como um todo, uma vez que a influência dos detalhes não é inicialmente contabilizada.

De maneira geral, as Curvas de Wöhler são descritas pela seguinte expressão, denominada equação de Basquim, obtida ajustando-se uma reta aos pontos experimentais em uma escala log-log:

$$NS_F^B = C \quad (6)$$

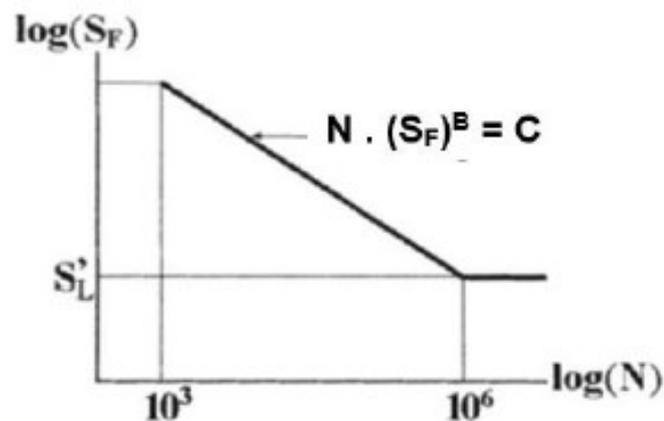


Figura 12: Curvas de Wöhler em log-log (Fonte: Castro e Meggiolaro, 2009 [1])

Na relação (6), B e C são chamados, respectivamente, de expoente e coeficiente de Wöhler e são constantes do material. Já S_F é a resistência à fadiga do material em determinado número de ciclos.

Wöhler ainda forneceu outra contribuição extremamente importante no estudo da vida-fadiga convencional a partir da identificação de uma possível existência de um limite de fadiga S'_L criando o conceito de endurance limit. Nele foi proposto que, para valores de amplitude de tensão menores que o valor do limite de fadiga, o componente não falharia em serviço, apresentando, portanto, uma vida infinita em fadiga. Este fato pode ser representado pelo comportamento assintótico assumido nas curvas SN, como é visto na figura 11 pela linha tracejada. Porém, com o avanço das técnicas e tecnologias experimentais esse conceito vem sendo cada vez mais questionado, como será discutido nos próximos tópicos deste trabalho.

2.2.5. Regimes no estudo de Fadiga

Com o avanço dos estudos em fadiga, beneficiado cada vez mais pelo surgimento de máquinas que aprimoraram as técnicas experimentais, as curvas SN foram adaptadas e divididas basicamente em dois regimes distintos, o de fadiga de baixo ciclo (LCF – *Low Cycle Fatigue*) e o de Fadiga de Alto Ciclo (HCF – *High Cycle Fatigue*).

No regime de LCF, tem-se uma vida curta em fadiga, caracterizado por tensões que estão entre o limite de resistência mecânica (LRM) e o limite de escoamento do material (LE). Sendo assim, as deformações plásticas são significativas e a falha é controlada pela deformação. A partir de aproximadamente 10^4 ciclos, há a fronteira de transição para o regime de alto ciclo. Em HCF, os valores de tensão são menores que o limite de escoamento do material, portanto, existem apenas deformações de ordem elásticas e a falha passa a ser controlada por tensão [7]. Esses conceitos estão ilustrados na figura que segue:

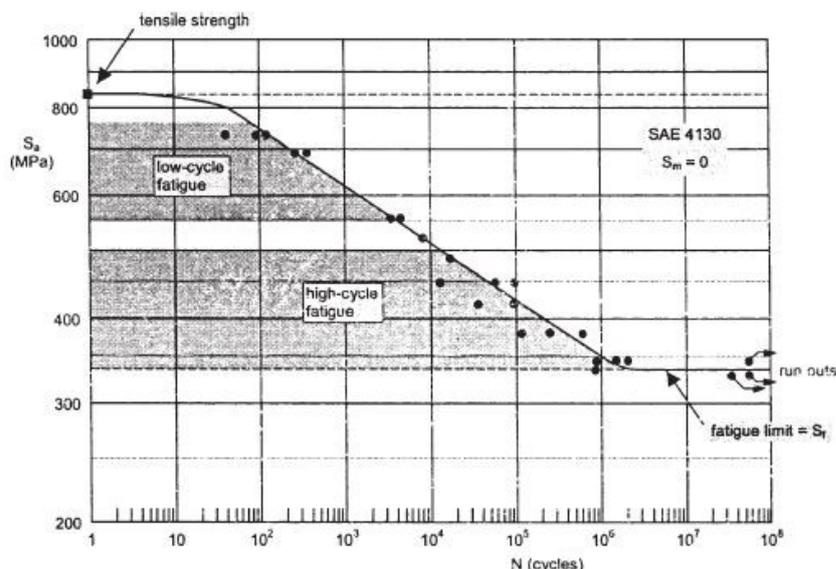


Figura 13: Representação dos regimes LCF e HCF (Fonte: Schijve, 2002 [9])

Como pode ser visto pela figura 13, as curvas SN tendem a apresentar um comportamento assintótico em torno de 10^7 ciclos quando carregamentos que variam entre 35 e 50% do LRM do material são aplicados, no que é considerado o limite de fadiga (*endurance limit*) do material. Este conceito é definido como o valor de tensão abaixo do qual falhas por fadiga não aparentam ocorrer [2]. Assim, pode-se sugerir que o componente apresentará vida infinita em fadiga, não vindo a falhar em serviço. Contudo, novas pesquisas vêm demonstrando que esse platô em torno de 10^7 ciclos é inadequado em muitos casos, como por exemplo nos aços, que têm apresentado um decaimento contínuo nas curvas de vida-fadiga. Este fato pode ser observado na figura 14, trazendo à tona o conceito da fadiga de altíssimo ciclo (UHCF – *Ultra High Cycle Fatigue*), foco do presente trabalho.

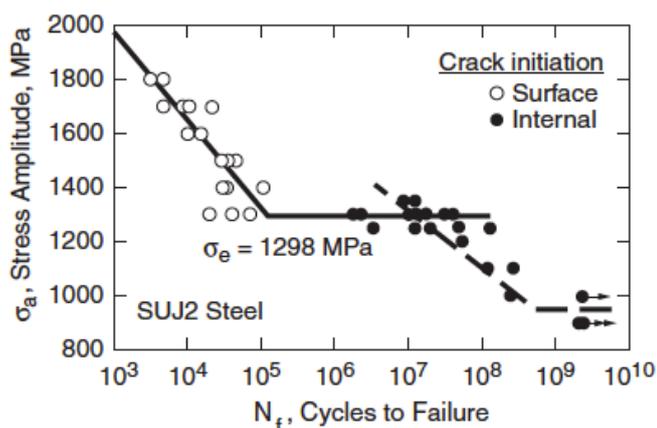


Figura 14: Representação do decaimento após 10^7 ciclos (Fonte: Downing, 2013 [2])

2.2.6. A Fadiga de Altíssimo Ciclo (UHCF)

Com o progressivo avanço das tecnologias e a demanda cada vez maior por equipamentos que combinam alta produtividade, eficiência e elevada vida útil, passou a ser comum, na indústria em geral, a presença de máquinas que alcancem um número extremamente elevado de ciclos em operação. Porém, até recentemente, acreditava-se que, quando submetidos a carregamentos de valor inferior ao limite de fadiga estabelecido para o material, estes componentes mecânicos não apresentariam falha por fadiga, por estarem localizados na região de vida infinita em fadiga. Contudo, muitos equipamentos começaram a apresentar falhas em número de ciclos superior àquele convencionalmente estabelecido em 10^7 ciclos sob tensão abaixo do *endurance limit*. Este fato contribuiu para o questionamento acerca da existência de vida infinita e para o surgimento dos estudos no campo da fadiga de altíssimo ciclo.

Outro fator decisivo para o avanço nas pesquisas na região de altíssimo ciclo está diretamente relacionado ao desenvolvimento de testes de fadiga ultrassônica. Eles permitiram gerar os elevados números de ciclos em um tempo hábil, trazendo maior viabilidade aos ensaios do que os equipamentos servo-hidráulicos convencionais. As máquinas de fadiga ultrassônica conseguem alcançar frequências da ordem de 20 kHz a partir de um princípio de funcionamento relativamente simples, diminuindo consideravelmente o tempo dos experimentos, como pode ser visto na tabela abaixo, retirada de [7]:

Tabela 1: Comparação entre os tempos de ensaio (Fonte: Teixeira, 2018 [7])

Número de ciclos	Convencional (100 Hz)	Ultrassônico (20 kHz)
10^7 ciclos	1 dia	9 minutos
10^9 ciclos	4 meses	14 horas
10^{10} ciclos	3 anos	6 dias

Os primeiros questionamentos sobre a vida infinita dos materiais metálicos apareceram com Claude Bathias em 1999. Com o passar dos tempos novas abordagens para a Curva SN e para os mecanismos de fratura na região de UHCF foram se desenvolvendo, como será melhor detalhado nos próximos tópicos.

2.2.7. A Curva DUPLEX SN e os mecanismos de falha em UHCF

Como mencionado anteriormente, até pouco tempo atrás, o critério do limite de fadiga associado a uma vida infinita era largamente utilizado em projetos de engenharia. Este conceito baseava-se principalmente nos comportamentos obtidos nas curvas de vida-fadiga convencionais que exibiam uma tendência assintótica em aproximadamente 10^7 ciclos. Porém, com os avanços das técnicas de ensaios e as falhas de equipamentos em tempos menores que os previstos, descobriu-se que a utilização deste conceito era inadequada para muitos materiais. Com novos dados obtidos a partir dos experimentos em fadiga ultrassônica, foi possível obter a extensão das curvas SN. Sendo assim, para melhor representar o que acontece nas regiões compreendidas entre 10^7 e 10^{10} ciclos, foi proposto a utilização das curvas DUPLEX SN, constituídas basicamente por um par de curvas que representam, de maneira esquemática, os regimes de falha por fadiga e os mecanismos dominantes para a origem de trincas e seus sítios de iniciação. Esta representação é mostrada na figura que segue, com eixos em escala log-log:

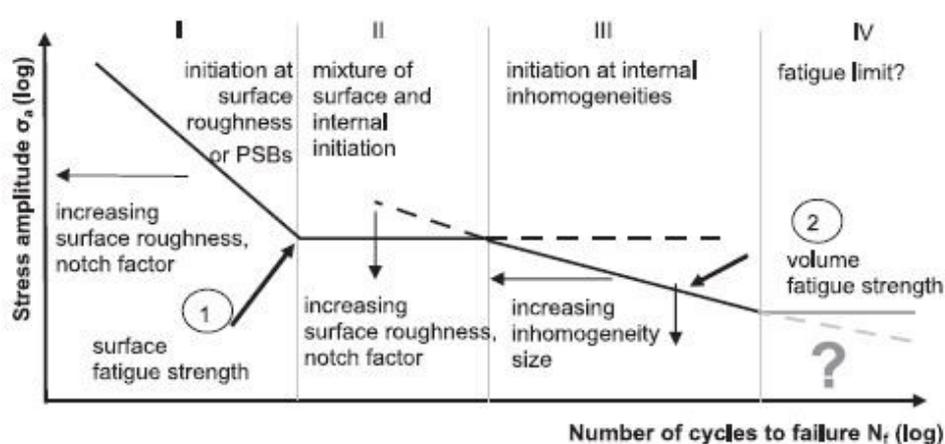


Figura 15: Esquemático da Curva DUPLEX SN (Fonte: Pyttel, 2010 [8])

O gráfico ilustrado na figura 15 demonstra quatro regiões, cada uma associada a um dos regimes de fadiga citados nos tópicos anteriores. A região I descreve o comportamento em fadiga de baixo ciclo (LCF) em que as falhas têm seu início na superfície. Já a região II representa a fadiga de alto ciclo (HCF) e o convencional limite de fadiga, sendo a falha preferencialmente superficial. Por fim, as regiões III e IV estão relacionadas ao regime de altíssimo ciclo em que as falhas tendem a ser internas ou

subsuperficiais. Vale ainda ressaltar que, apesar de a possibilidade de existência de um limite de fadiga final na região IV, este conceito ainda apresenta divergências, sendo muito contestado por diversos autores [8].

Como dito, no regime de UHCF, os mecanismos de falha tendem a ser internos ou subsuperficiais na maioria dos casos. De acordo com Bathias [10], é possível modelar a iniciação de trincas em corpos de prova cilíndricos de superfície polida de três maneiras distintas, como mostrado no esquema seguinte:

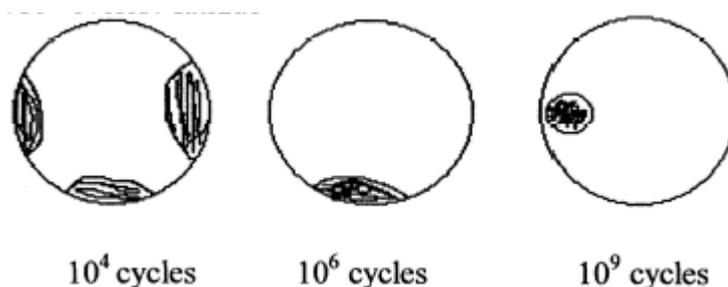


Figura 16: Regiões preferenciais de iniciação de trincas (Fonte: Bathias, 2001 [10])

Na figura 16 é possível observar que para um número pequeno de ciclos, no campo de LCF, as trincas tendem a se iniciar em múltiplos pontos ao longo da superfície. Para vidas relacionadas ao regime de HCF, a tendência é que a iniciação permaneça na superfície, porém restrita a uma única localidade. Já para ciclos da ordem de 10^9 , no campo da fadiga de altíssimo ciclo, observa-se uma mudança gradual da região preferencial de nucleação para regiões internas. Vale ressaltar que, apesar de amplas evidências mostrarem a coerência do esquema mostrado na imagem anterior, ele não pode ser considerado uma regra final para todos os materiais, visto que há exceções que devem ser melhor estudadas.

De maneira geral, existem três mecanismos que contribuem para a falha em vidas extremamente longas. O primeiro deles está relacionado a poros, inclusões e heterogeneidades microestruturais, que funcionam como concentradores de tensão. O segundo diz respeito a grãos anormais e plaquetas alongadas em configurações de anisotropia. Por último existem condições estatísticas, uma vez que a probabilidade de se encontrar um defeito é maior em regiões internas do material. Sendo assim, o fenômeno da nucleação em UHCF pode ser explicado pelo fato de o defeito deixar de ser um problema mecânico para se tornar um problema metalúrgico [7]. Nessa transição gradual das regiões de falhas, as superfícies de fratura também se

modificam, com a formação do denominado fish-eye. Este é um defeito interno de aspecto circular e concêntrico a origem da trinca, responsável pela propagação radial da mesma e leva esse nome dada a semelhança com um olho de peixe.

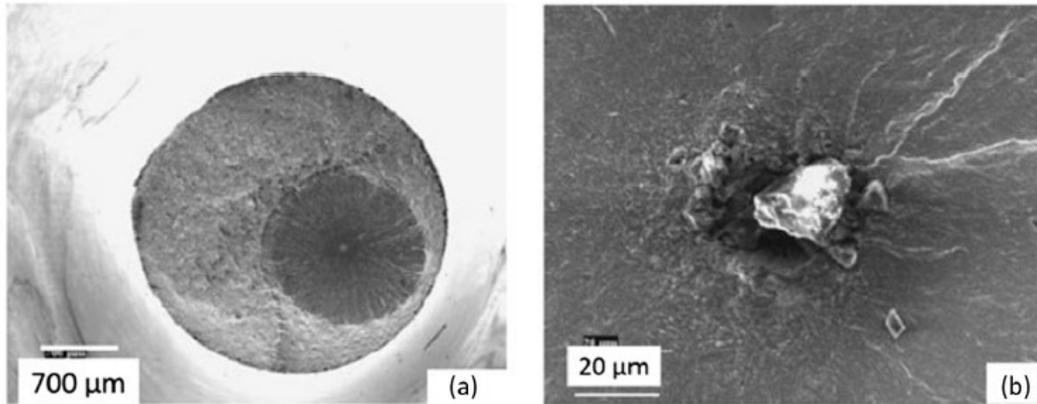


Figura 17: Fish-Eye e o defeito que o originou (Fonte: Mughrabi, 2016 [14])

O processo de falha por fadiga no regime de UHCF pode ser dividido em quatro estágios: 1) nucleação da trinca a partir do defeito interno, 2) crescimento da trinca dentro do fish-eye, 3) crescimento da trinca fora do fish-eye e 4) fratura final [12], com mostrado na próxima imagem:

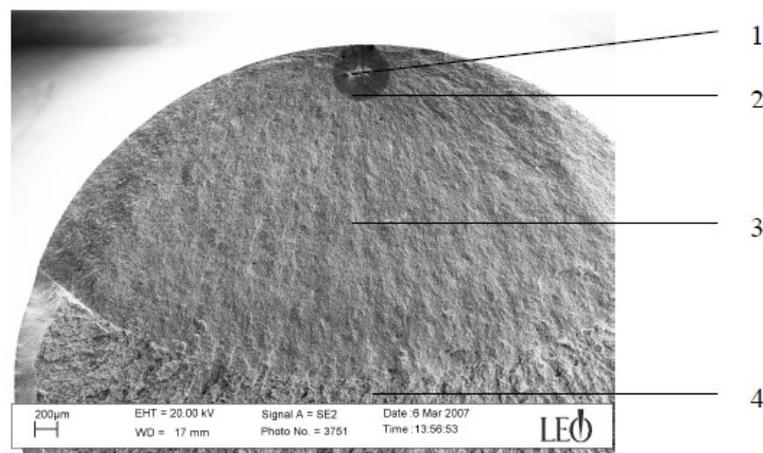


Figura 18: Estágios de falha em superfície típica (Fonte: Kazymyrovych, 2009 [12])

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Feita toda a análise teórica para o estudo do presente trabalho, resta descrever todos os materiais e metodologias empregados na obtenção das curvas de vida-fadiga. Para isto, foi escolhido o aço estrutural 34CrNiMo6 para ser ensaiado em fadiga ultrassônica no Laboratório de Fadiga de Altíssimo Ciclo (LABFADAC) da PUC-Rio, como será descrito neste capítulo. Devido ao cenário de Covid-19 e a impossibilidade de frequentar o campus pelos alunos da graduação, os ensaios foram realizados presencialmente pela Coorientadora Juliana Corrêa sob a supervisão do Orientador (Marcos Venicius Pereira) e transmitidos via plataforma ZOOM para acompanhamento por parte do autor. Posteriormente os resultados foram disponibilizados para a elaboração deste texto.

3.1. O AÇO DIN 34CrNiMo6

O material escolhido para os testes foi o aço estrutural 34CrNiMo6, utilizado na fabricação de eixos virabrequins de unidades geradoras em plantas termoelétricas. Trata-se um aço de extrema importância nas aplicações de engenharia pelo fato de apresentar elevada resistência mecânica combinada com uma boa tenacidade e temperabilidade. Estas propriedades fazem com que este material seja empregado principalmente em componentes de grandes dimensões, como pás de turbinas e eixos de maquinários pesados, caso do virabrequim citado. A densidade deste aço é de $7,87 \text{ g/cm}^3$ e abaixo são mostradas, respectivamente nas tabelas 2 e 3, a composição química e as principais propriedades mecânicas:

Tabela 2: Composição Química do Aço 34CrNiMo6

Aço	Fe (%)	C (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)
DIN 34CrNiMo6	95,1	0,38	1,51	1,75	0,24

Tabela 3: Propriedades Mecânicas do Aço 34CrNiMo6

Aço	Módulo de Elasticidade (GPa)	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência Mecânica (MPa)
DIN 34CrNiMo6	207	760	900

3.2. O CORPO DE PROVA

Como já explicado nos tópicos anteriores, os ensaios em fadiga ultrassônica são feitos em frequências elevadas. Com isso os corpos de prova são diferentes daqueles utilizados nos testes de fadiga convencional. Isto ocorre porque, em máquinas ultrassônicas, a frequência fornecida é uma das frequências naturais da amostra, impondo que o corpo de prova seja dimensionado para que sua frequência fundamental corresponda a frequência do equipamento de ensaio. Para entender melhor a obtenção da geometria do mesmo, a teoria da onda elástica é fundamental e será melhor comentada neste tópico.

Para um corpo elástico isotrópico, as equações diferenciais de interesse são mostradas abaixo. Nelas u , v , w são os deslocamentos, respectivamente, nos eixos x , y , z ; E é o módulo de elasticidade, ρ a densidade, ν é o coeficiente de Poisson, ∇ o Laplaciano e e é o volume de dilatação:

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{(1 + \nu)} \left(\frac{1}{1 - 2\nu} \frac{\partial e}{\partial x} + \nabla^2 u \right) \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{E}{(1 + \nu)} \left(\frac{1}{1 - 2\nu} \frac{\partial e}{\partial y} + \nabla^2 v \right) \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = \frac{E}{(1 + \nu)} \left(\frac{1}{1 - 2\nu} \frac{\partial e}{\partial z} + \nabla^2 w \right) \quad (9)$$

$$e = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (10)$$

Além disso, como simplificação inicial, será considerada uma onda longitudinal em uma barra cilíndrica unidimensional. As expressões gerais e simplificadas, da velocidade de propagação da onda são mostradas abaixo, respectivamente por (11) e (12):

$$c = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (11)$$

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (12)$$

Portanto, as equações diferenciais se reduzem a:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \quad (13)$$

Para se resolver (13) é necessário que o deslocamento seja máximo nas extremidades do corpo de prova, a condição de contorno para um ensaio de fadiga ultrassônico. Dito isto, para o primeiro modo de vibração, obtém-se, definindo-se l como o comprimento de ressonância:

$$u(x, t) = A_0 \cos(kx) \sin(\omega t) \quad (14)$$

Em que,

$$k = \frac{\pi}{l}; \quad \omega = \frac{\pi c}{l} = 2\pi f \quad (15)$$

Por fim, combinando-se (12) e (15) e levando-se em conta os efeitos dinâmicos a partir da consideração do Modulo de Elasticidade Dinâmico ao invés do Módulo de Elasticidade, obtém-se para o comprimento de ressonância:

$$l = \frac{1}{2f} \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (16)$$

A expressão (16) traz uma limitação importante, pois à medida que a frequência de ensaio aumenta, l se reduz, fazendo com valores extremamente elevados de f não sejam utilizados, pois um corpo de prova não poderia ser usinado para atender as dimensões necessárias.

É importante enfatizar que, em fadiga de maneira geral, as espécies utilizadas possuem seção variável. Isto ocorre para promover uma concentração de tensão no meio da geometria, na tentativa de direcionar a falha para esta região. Para o caso ultrassônico, o comprimento de ressonância só pode ser obtido de maneira analítica se a parte central do corpo de prova tiver uma forma exponencial, como mostrado na próxima figura:

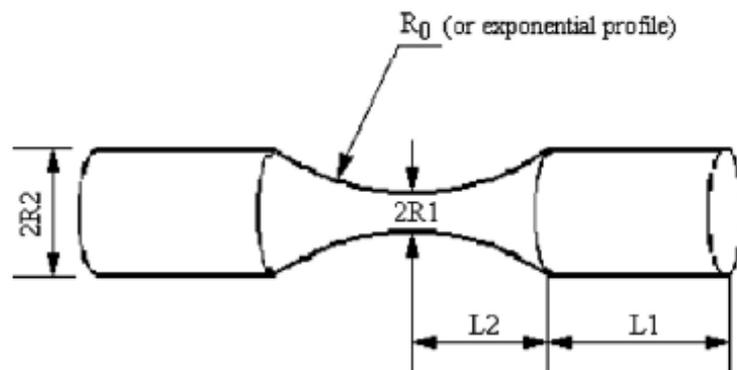


Figura 19: Corpo de Prova em fadiga ultrassônica (Fonte: Bathias e Paris, 2005 [16])

Na geometria mostrada pela figura 19, o comprimento de ressonância é o $L1$. Os parâmetros $L2$, $R0$, $R1$ e $R2$ são dados de entrada no dimensionamento, escolhidos de maneira coerente para facilitar a usinagem do corpo de prova. Portanto, valendo-se da teoria da onda elástica, considerando-se as condições de contorno do ensaio ultrassônico e a variação de área, de acordo com Bathias e Paris [16] o comprimento de ressonância ($L1$) e o comprimento total da amostra (L) são obtidos pelas expressões que seguem:

$$L_1 = \frac{1}{k} \arctan \left\{ \frac{1}{k} [\beta \coth(\beta L_2) - \alpha \tanh(\alpha L_2)] \right\} \quad (17)$$

$$\alpha = \frac{1}{L_2} \operatorname{arccosh} \left(\frac{R_1}{R_2} \right) \quad (18)$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - k^2} \quad (19)$$

$$L = 2(L_1 + L_2) \quad (20)$$

$$k = \frac{2\pi f}{c}; \quad c = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (21)$$

Para o ensaio no aço estrutural 34CrNiMo6, proposto pelo presente trabalho, o corpo de prova do tipo ampulheta e sem entalhe da figura 19 foi utilizado. Vale ressaltar que, o comprimento de ressonância foi obtido diretamente a partir da máquina de fadiga, fornecendo o Módulo de Elasticidade (E), a densidade do material (ρ), o diâmetro maior (D1) e o comprimento da seção reduzida. Com esses dados, o equipamento propôs a geometria dos corpos de prova a serem utilizadas, como pode ser visto abaixo:

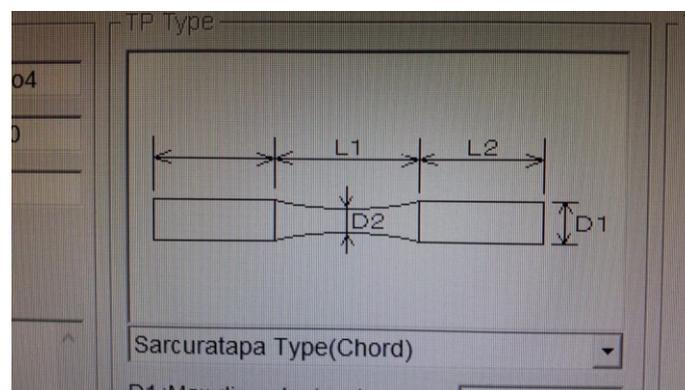


Figura 20: Geometria dos corpos de prova (Fonte: Corrêa, 2020)

Tabela 4: Dimensões dos parâmetros dos corpos de prova

D1	10 mm
L1	30 mm
D2	3 mm
L2	15,38 mm
Lt	60,76 mm

A fim de se validar os resultados, as expressões (17), (18), (19), (20) e (21) foram escritas no MatLab, definindo-se E , ρ , $R1$, $R2$, $L2$ obtendo-se para comprimento de ressonância o valor de $L1 = 15,4$ mm, o mesmo valor sugerido pela máquina. O corpo de prova final usinado é mostrado na próxima figura:



Figura 21: Corpo de prova usinado (Fonte: Corrêa, 2020)

3.3. A MÁQUINA DE ENSAIO

Feita a devida descrição do material e do corpo de prova, resta agora detalhar o equipamento utilizado. As máquinas de fadiga ultrassônica, como dito, possibilitaram uma drástica redução de tempo e de custo para se obter dados no regime do altíssimo ciclo, através de práticas extremamente confiáveis. Sendo uma metodologia recente, não há ainda uma padronização específica, fazendo com que os equipamentos sejam distintos em cada laboratório. Porém, existem quatro componentes que são comuns

a todos eles. O primeiro deles é o gerador ultrassônico que transforma o sinal elétrico de tensão de 50 ou 60 Hz em um sinal elétrico ultrassônico senoidal de 20 kHz. O segundo é um conversor piezoelétrico, excitado pelo gerador, responsável por converter o sinal elétrico para uma onda ultrassônica longitudinal e vibrações mecânicas com a mesma frequência. O terceiro é um amplificador da vibração proveniente do conversor a fim de se obter a tensão necessária na região central do corpo de prova. O quarto é um sistema de aquisição e monitoramento de dados via computador [12]. Vale ressaltar ainda que, durante estes testes, devido ao intenso atrito interno, a temperatura do corpo de prova aumenta significativamente, podendo interferir no comportamento em fadiga do material, por isso um sistema de resfriamento também deve ser adotado durante os procedimentos experimentais, sendo os mais comuns jatos de ar comprimido.

Para o presente trabalho, os corpos de prova do tipo ampulheta sem entalhes foram ensaiados em UHCF no equipamento SHIMADZU USF- 2000A instalado no LABFADAC. Foram utilizadas tensões de 0.3, 0.4 e 0.5 do LRM na tentativa de se obter $10^7 - 10^9$ ciclos. Os carregamentos eram totalmente alternados ($R = -1$). A seguir é mostrado um esquema do funcionamento da máquina empregada, retirada diretamente do catálogo da SHIMADZU:

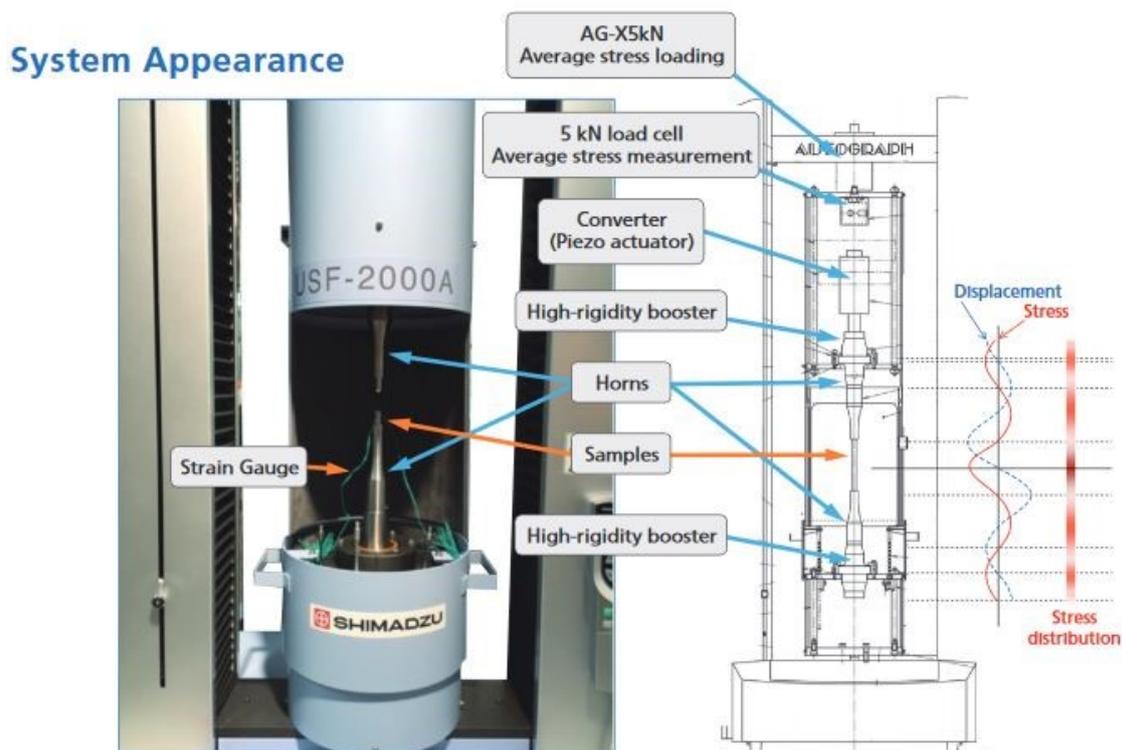


Figura 22: Sistema de teste na máquina USF- 2000A (Fonte: SHIMADZU, 2016 [15])

Na figura 19 pode ser vista a relação entre a tensão promovida e o deslocamento dos pontos do corpo de prova. A região central apresenta o maior valor de tensão e deslocamento nulo, sendo um nó da onda de deslocamento formada. Já as extremidades do CP são as regiões correspondentes aos maiores afastamentos. Estas são as condições de contorno para o ensaio de fadiga ultrassônica, como citado no tópico anterior.

A figura 23 apresenta o equipamento Shimadzu utilizado nos experimentos deste TCC.

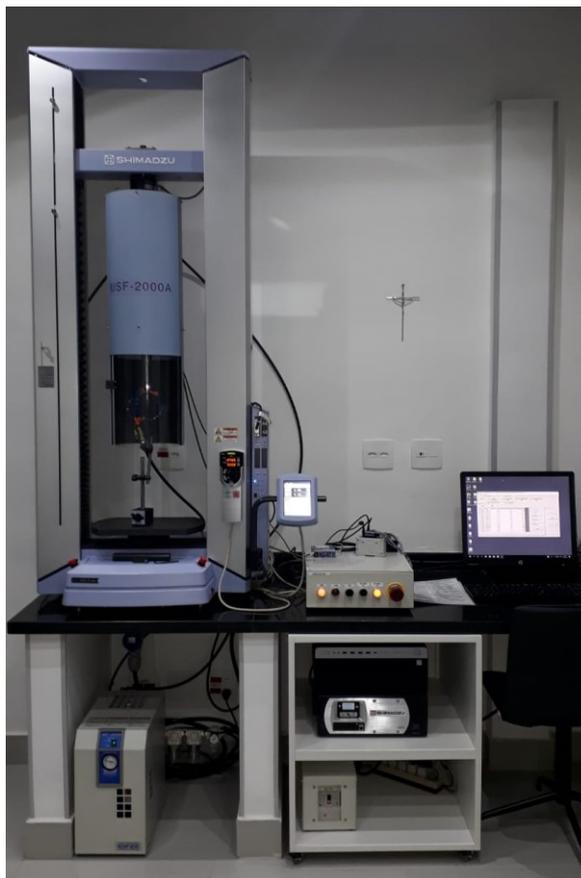


Figura 23: Equipamento de fadiga ultrassônica no LABFADAC (Fonte: Corrêa, 2020)

Para cada uma das tensões escolhidas, respectivamente 450, 360 e 270 MPa, foram feitos dez ensaios. Em cada um deles anotou-se o número de ciclos para a falha. Caso de o corpo de prova ultrapassasse o alvo de 10^9 ciclos, número escolhido para guiar o experimento, o teste era interrompido. Este era um indicativo de que a amostra não falhou. No próximo item, os resultados serão expostos e melhor analisados.

4. RESULTADOS

Com toda a metodologia experimental definida e explicada, os resultados dos ensaios puderam ser obtidos. Assim, as tabelas a seguir relacionam a tensão adotada no ensaio e o número de ciclos (NC) atingido pelo corpo de prova (CP), na falha ou interrupção do teste:

Tabela 5: Ensaio com 450 MPa (50% do LRM)

Tensão	CP	Condição	Número de Ciclos
450 MPa	1	Falhou	7,95E+06
	2	Falhou	1,56E+07
	3	Falhou	1,69E+07
	4	Falhou	7,02E+06
	5	Falhou	8,12E+06
	6	Falhou	8,65E+06
	7	Falhou	9,99E+06
	8	Falhou	6,86E+06
	9	Falhou	1,46E+07
	10	Falhou	2,24E+07

Tabela 6: Ensaio com 360 MPa (40% do LRM)

Tensão	CP	Condição	Número de Ciclos
360 MPa	1	Falhou	1,10E+08
	2	Falhou	1,43E+08
	3	Falhou	1,11E+08
	4	Falhou	5,73E+07
	5	Falhou	9,65E+07
	6	Falhou	7,95E+07
	7	Falhou	1,57E+08
	8	Falhou	1,24E+08
	9	Falhou	1,97E+08
	10	Falhou	8,96E+07

Tabela 7: Ensaio com 270 MPa (30% do LRM)

Tensão	CP	Condição	Número de Ciclos
270 MPa	1	Falhou	8,88E+08
	2	Falhou	7,90E+08
	3	Não Falhou	1,01E+09
	4	Não Falhou	1,01E+09
	5	Não Falhou	1,63E+09
	6	Não Falhou	2,07E+09
	7	Não Falhou	1,79E+09
	8	Não Falhou	1,59E+09
	9	Não Falhou	1,49E+09
	10	Não Falhou	1,02E+09

Pelas tabelas anteriores fica evidente que ocorrem falhas além do patamar convencionalmente estabelecido pelo limite de fadiga em 10^7 ciclos para o material em questão. Porém, para se obter um melhor entendimento e visualização da região do altíssimo ciclo, os dados devem ser dispostos numa curva de vida-fadiga, como pode ser visto abaixo:

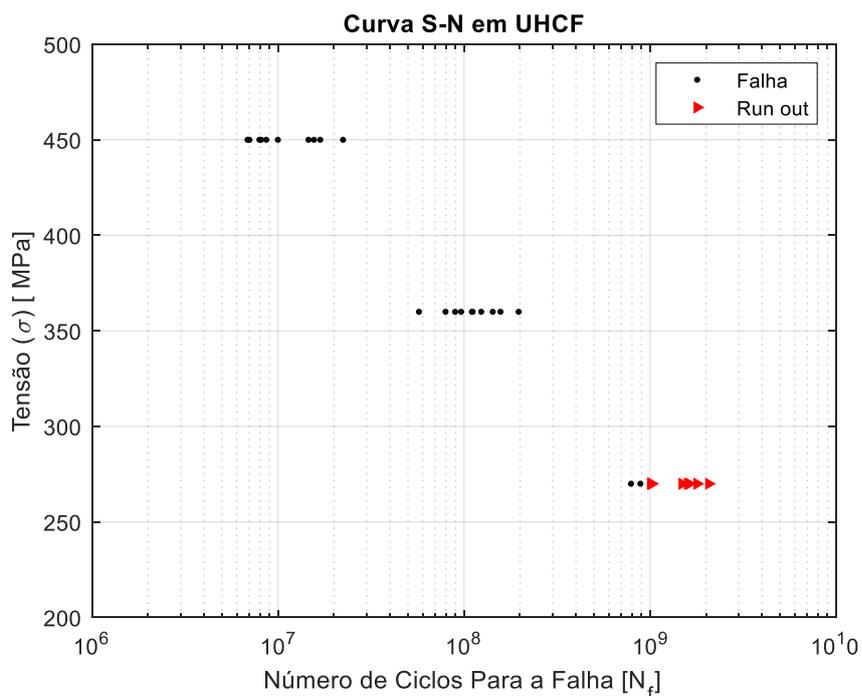


Figura 24: Curva S-N do aço DIN 34CrNiMo6 ensaiado em teste ultrassônico

O gráfico da figura 24 foi elaborado em escala semi-log. Nele pode-se observar tantos os corpos de prova que falharam como os que não falharam (*run out*) até o

número de ciclos alvo. Observando-se os pontos da curva, nota-se que ocorreram 16 falhas entre 10^7 e 10^9 ciclos, ficando evidente que houve vida em fadiga na região de altíssimo ciclo, ou seja, que os corpos de prova falharam na região que seria de vida infinita em fadiga. Além disso, como é de se esperara em um teste de fadiga, os resultados para um mesmo nível de carregamento apresentam uma notória dispersão, permitindo que um novo gráfico fosse elaborado com adição de duas curvas de tendência para melhor análise do comportamento:

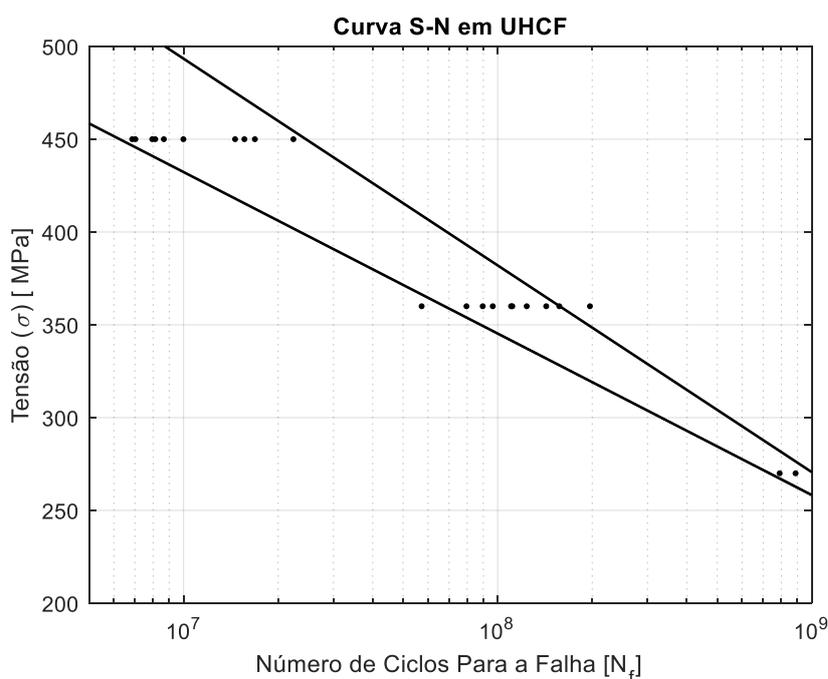


Figura 25: Curva S-N do ensaio com região de falha

As linhas de tendência da figura anterior demonstram claramente que a medida que o valor de tensão aplicada se reduz, o número de ciclos para a falha tende a aumentar, ou seja, maior é a vida em fadiga do material. Portanto, torna-se mais adequado utilizar o conceito, proposto por Bathias, de associar uma resistência a fadiga a um determinado número de ciclos ao invés do limite de fadiga. Vale ressaltar ainda que as linhas de tendências foram obtidas separando-se os três primeiros e os três últimos pontos que falharam, um para cada tensão de teste utilizada. Isto permite visualizar a região onde as falhas se concentraram e evidenciar o decaimento sugerido pela curva DUPLEX S-N, uma vez que há falha dentro do intervalo de 180 MPa. Este valor não pode ser ignorado e não sugere uma tendência de estabilização entre 10^7 e 10^9 ciclos.

5. CONCLUSÃO

Como mencionado anteriormente, projetos em engenharia só podem ser considerados seguros quando é possível garantir que uma peça resistirá aos carregamentos e sobrecargas durante toda sua vida operacional. Isto significa que, a medida que se admite que é impossível existir um componente isento de defeitos, é tarefa do engenheiro projetá-lo de forma que falhas inesperadas e catastróficas não aconteçam, permitido ainda que manutenções programadas possam ser feitas na tentativa de se prolongar a vida útil do material. Trata-se da filosofia do projeto tolerante a defeitos. Neste contexto, design de estruturas baseados no critério de vida infinita em fadiga vem se demonstrando inadequados em muitos casos, uma vez que os componentes mecânicos estão apresentando falhas inesperadas entre $10^7 - 10^{12}$ ciclos de carregamento. Por isso, é de extrema importância o melhor entendimento do regime do altíssimo ciclo, que foi tema central deste trabalho.

Os estudos em UHCF só foram possíveis a partir da introdução dos ensaios de fadiga ultrassônicos. Estes possuem diversas particularidades e permitiram uma drástica redução no tempo de ensaio. Sendo assim, foi fundamental o conhecimento da geometria do corpo de prova e do funcionamento da máquina de teste. Com a rotina bem estabelecida, os experimentos no aço 34CrNiMo6, utilizado na fabricação de eixo virabrequim de plantas termelétricas que fraturam em serviço, apresentaram resultados bastante significativos, como pôde ser visto pelas figuras 24 e 25. Eles demonstraram que os corpos de prova apresentaram vida em fadiga na região de altíssimo ciclo, não demonstrando o comportamento assintótico sugerido pelas curvas S-N convencionais, mas sim o formato sugerido pela curva DUPLEX S-N, enfatizando que, para este caso, seria mais apropriado relacionar a resistência a fadiga a um determinado número de ciclos do que um limite de fadiga propriamente dito.

Por fim, vale ressaltar a dificuldade de se obter um formato único para as curvas S-N entre 10^6 e 10^9 ciclos, uma vez que elas se diferem de um aço para o outro, justificando a necessidade cada vez maior de realização de testes ultrassônicos nos diversos materiais que são utilizados em aplicações estruturais.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Dada a impossibilidade de acessar o campus da PUC-Rio durante a realização deste projeto, sugere-se, como forma de complemento em trabalhos posteriores, analisar as superfícies de fratura dos corpos de prova ensaiados em UHCF no Microscópio de Varredura Eletrônica (MEV) a fim de se entender melhor a competição entre as falhas superficiais e subsuperficiais. Além disso, propõe-se estudar a transição entre os regimes de alto ciclo e de altíssimo ciclo a partir da observação do acoplamento das curvas do S-N e realizar testes com razões de carregamentos com tensões médias atuantes.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] - CASTRO, J. T. P. D.; MEGGIOLARO, M. A. **Fadiga - Técnicas e Práticas de Dimensionamento Estrutural sob Cargas Reais de Serviço**. Rio de Janeiro: Copyright, v. I, 2009.
- [2] - DOWLING, N. E. **Mechanical Behavior of Materials**. 4. ed. Harlow: Pearson, 2013.
- [3] - CLIMATE Central, 2020. Disponível em: <<https://www.climatecentral.org/news/climate-change-warp-railroad-tracks-sun-kinks-17470>>. Acesso em: 12 Outubro 2020.
- [4] - SCHIJVE, J. **Fatigue of Structures and Materials**. 2. ed. Delft,: Springer, 2009.
- [5] - CASTRO, T. L. D. **Previsão da Vida em Fadiga de Eixos Virabrequim e Componentes Mecânicos Estruturais sob Carregamento Multiaxial**. PUC-Rio. Rio de Janeiro, p. 100. 2019.
- [6] - FRATURA POR FADIGA (2018), Pereira. Professor Marcos Venicius Pereira.
- [7] - TEIXEIRA, M. C. C. **Comportamento do Aço DIN 34CrNiMo6 em Fadiga de Altíssimo Ciclo**. PUC-Rio. Rio de Janeiro, p. 96. 2018.
- [8] - PYTTEL, B.; SCHWERDT, D.; BERGER, C. Very high cycle fatigue – Is there a fatigue limit? **International Journal of Fatigue**, Darmstadt, v. 33, n. 1, p. 49-58, Junho 2010.
- [9] - SCHIJVE, J. Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art. **International Journal of Fatigue**, Delft, v. 25, n. 8, p. 679-702, Agosto 2003.
- [10] - BATHIAS, C.; DROUILLAC, L.; LE FRANÇOIS, P. How and why the fatigue S-N curve does not approach a horizontal asymptote. **International Journal of Fatigue**, Paris, v. 23, n. 1, p. 143-151, 2001.
- [11] - MUGHRABI, H.; ANTOLOVICH, S. D. A tribute to Claude Bathias – Highlights of his pioneering work. **International Journal of Fatigue**, Erlangen, v. 93, n. 2, p. 217-223, Abril 2016.

- [12] - KAZYMYROVYCH, V. **Very high cycle fatigue**. Karlstad University Studies. Karlstad, p. 33. 2009.
- [13] - OTAI. Otai Special Steel. **Site da Otai Special Steel**. Disponível em: <<http://www.astmsteel.com/product/34crnimo6-steel/>>. Acesso em: 6 Novembro 2020.
- [14] - MUGHRABI, H. Specific features and mechanisms of fatigue in the ultrahigh-cycle regime. **International Journal of Fatigue**, Erlangen, v. 28, p. 1501-1508, Maio 2006.
- [15] - SHIMADZU. Shimadzu Europa GmbH. **Site da Shimadzu Europa GmbH**, 2020. Disponível em: <https://www.shimadzu.eu/sites/shimadzu.seg/files/c225e032_ultrasonic_fatigue_testing_system_with_an_average_stress_loading_mechanism.pdf>. Acesso em: 12 Novembro 2020.
- [16] - BATHIAS, C.; PARIS, P. C. **Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice**. New York: Marcel Dekker, v. I, 2005.