

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Efeitos da sobrecarga e da espessura na vida em fadiga
de componentes de aço API 2H grau 50

por

Ricardo Feyh Ribeiro

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2011



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

Efeitos da sobrecarga e da espessura na vida em fadiga
de componentes de aço API 2H grau 50

por

Ricardo Feyh Ribeiro

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Rubén Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. **José Antônio E. Mazzaferro**

Comissão de Avaliação:

Prof. **Flavio J. Lorini**

Prof. **Heraldo José de Amorim**

Prof. **Rodrigo Rossi**

Porto Alegre, 21, novembro de 2011.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, namorada e amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a meu orientador José Antônio E. Mazzaferro, aos professores de engenharia mecânica da UFRGS e a todos os colegas de trabalho, do laboratório de Metalurgia Física (LAMEF), que tornaram a realização desse trabalho possível, em especial: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker, Charles Kuhn e Jefferson Haag.

Ribeiro, Ricardo F., **Efeitos da sobrecarga e da espessura na vida em fadiga de componentes de aço API 2H grau 50**. 2011. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

Tubulações de petróleo “*off shore*”, trens de pouso de aeronaves e chassis de automóveis são exemplos de estruturas que costumam sofrer sobrecargas mecânicas e carregamentos cíclicos de amplitudes variadas ao longo de seus ciclos de vida. Assim sendo, é importantíssimo entender corretamente o comportamento de materiais sob condições de carregamento que se aproximem da realidade em operação. O presente trabalho estudou o efeito da sobrecarga em corpos de prova de aço API 2H grau 50 de diferentes espessuras. Como metodologia experimental foi utilizada a técnica fatorial completa com dois níveis e dois fatores (magnitude da sobrecarga e espessura). Os resultados dos testes de fadiga com sobrecargas foram obtidos na forma de curvas de tamanho de trinca (a) por número de ciclos (N) e curvas de taxa de crescimento de trinca (da/dN) por tamanho de trinca (a). A influência dos fatores foi quantificada, uma equação que descreve o fenômeno foi proposta e regiões de interesse foram reveladas.

PALAVRAS-CHAVE: Fadiga, sobrecargas, espessura, técnica fatorial completa.

Ribeiro, R. F., **Overload and thickness effects on the fatigue life of API 2H grade 50 steels**. 2011. 23 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

Off shore oil pipelines, airplanes landing gear and car chassis are examples of structures that often tend to suffer mechanical overloads and cyclic loads of various amplitudes over their life cycles. Therefore, it is important to properly understand the behavior of materials under loading conditions which are closer to the reality in operation. This work studied the effect of overload on specimens of API 2H Grade 50 steel of different thicknesses. As experimental methodology was used the full factorial technique with two levels and two factors (overload magnitude and thickness). The results of fatigue tests with overloads were obtained in the form of curves of crack length (a) by number of cycles (N) and curves of crack growth rate (da/dN) by crack length (a). The influence of the factors was quantified, an equation that describes the phenomenon was proposed and areas of interest were revealed.

KEYWORDS: Fatigue, single tensile overloads, thickness, full factorial technique.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	1
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3.1 Fadiga	1
3.2 Mecânica da fratura aplicada a fadiga	2
3.3 Retardo da taxa de crescimento de trinca induzido pela sobrecarga	5
3.4 Aços API 2H grau 50	5
3.5 Projeto de experimentos - 2^k fatorial	6
4 METODOLOGIA	8
4.1 Material	8
4.2 Ensaio de taxa de propagação de trinca	8
4.3 Sobrevida em fadiga	9
4.4 Projeto de experimentos	9
5 RESULTADOS	10
5.1 Ensaio de taxa de propagação de trinca	10
5.2 Projeto de experimentos	12
5.3 Regressão linear e curva de nível	13
6 DISCUSSÃO	13
7 CONCLUSÕES	14
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
Apêndice I	17
A) Projeto de experimentos	17
B) Metalografias	18

1. INTRODUÇÃO

O estudo do comportamento de componentes submetidos a solicitações dinâmicas é muito importante no desenvolvimento de projetos e análises estruturais, visto que a fadiga é uma das principais causas de falhas de equipamentos em operação. Tal estudo, quando preciso, permite determinar e aumentar o tempo de vida segura do produto. A prática mais difundida para estudar este fenômeno, baseia-se em testes em ambientes controlados de laboratórios, onde os corpos de prova recebem carregamentos cíclicos de amplitudes constantes. Contudo, este método não é capaz de refletir a realidade observada em máquinas, cujo carregamento é variado e sobrecargas são costumeiras, por exemplo: tubulações de extração de petróleo “*off-shore*”, trens de pouso de aeronaves, cabos de aço, componentes de motores, carcaças de navios, chassis de automóveis e etc. Portanto, este trabalho visa determinar e quantificar, através de projeto de experimentos, a influência das sobrecargas e da espessura no tempo de vida em fadiga. Além disso, será recomendada uma região de parâmetros onde o efeito do retardo será mais bem identificado.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo estudar o efeito de sobrecargas e da espessura, junto com a interação entre os parâmetros em corpos de prova de aço API 2H grau 50, sujeitos a fadiga. Na análise, será utilizada uma ferramenta de projeto de experimentos, a técnica 2^k fatorial completa, onde são analisados os efeitos e a interação de maneira quantitativa. Além disso, pode-se obter uma equação que descreva o evento e gráficos que indiquem as regiões de maior e menor influência da sobrecarga no material.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. FADIGA

Fadiga é a principal modo de falhas de componentes em operação. Esse fenômeno é definido pelo trincamento progressivo de materiais sujeitos a esforços cíclicos, onde as falhas ocorrem sob a influência de cargas máximas aplicadas inferiores as tensões de ruptura ou de escoamento. É uma ciência interdisciplinar, porque envolve, por exemplo, assuntos relacionados às áreas de mecânica estrutural, propriedades metalúrgicas de materiais, manutenção e detecção de falhas [Moura Branco, 1986].

A norma ASTM E 1150-87 define fadiga como: “*o processo de mudança estrutural permanente, progressiva e localizada, produzido por tensões ou deformações flutuantes em algum ponto ou pontos do material, e que pode culminar em trincas ou fratura completa após um número suficiente de ciclos de carregamento*”.

A trinca propaga-se em três estágios bem definidos: nucleação de trinca (estágio I), propagação da trinca (estágio II) e propagação instável e ruptura final (estágio III), figura 3.1.

Durante o estágio I, de nucleação de trinca, ocorre o deslocamento de discordâncias e o deslizamento de planos cristalinos, desenvolvendo microextrusões e microintrusões na superfície do material. Em função da solicitação dinâmica, tem-se o acúmulo de concentradores de tensões, na fronteira do material com o meio, o que propicia o surgimento de microtrincas, orientadas a 45° em relação à direção da solicitação. É importante salientar que, nessa etapa, o dano ocorre somente na superfície do material, sem que haja intensa deformação plástica. Ao atingir o estágio II, o crescimento de trinca torna-se perpendicular ao carregamento aplicado. Quando a trinca atinge o estágio III, inicia-se o processo de crescimento instável da trinca, que resulta na falha catastrófica.

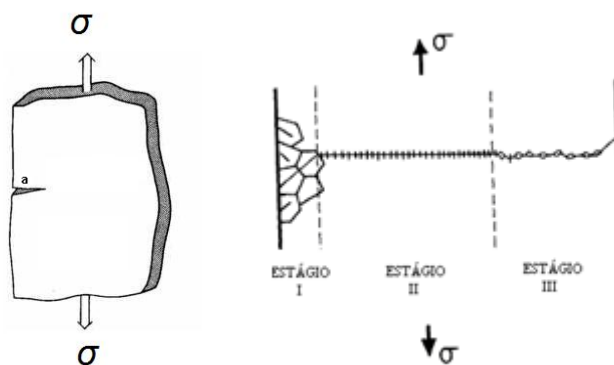


Figura 3.1: Material com trinca de tamanho “a” (esquerda) e estágios da propagação da trinca de fadiga (direita).

3.2. MECÂNICA DA FRATURA APLICADA À FADIGA

A abordagem de fadiga pela mecânica da fratura parte da premissa de tolerância ao defeito. Em outras palavras, afirma-se que todos os componentes de engenharia, inerentemente, possuem falhas. O tamanho inicial das trincas estudadas geralmente depende do tipo de técnica de detecção de falhas não destrutiva empregada.

O estudo inicia-se com conceitos relacionados ao fator de intensidade de tensões (K_I), no modo I (figura 3.2), pois descreve o campo de tensões atuantes na ponta de trinca. É definido, para corpos de prova do tipo “Compact Tension”, de acordo com a equação 3.1.a ou 3.1.b mostradas abaixo.

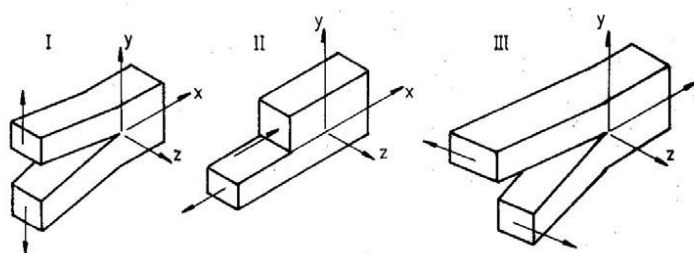


Figura 3.2: Modos de carregamento básicos de uma trinca.

$$K_I = \sigma f \sqrt{\pi a} \quad (3.1.a)$$

$$K_I = \frac{P f}{B \sqrt{W}} \quad (3.1.b)$$

Onde:

K_I é o fator de intensidade de tensões (MPa m);

$f=f(a/W)$ é um parâmetro que depende da geometria da peça, condições de carregamento; forma e orientação da trinca;

σ é a tensão uniaxial atuante perpendicular ao plano da trinca (MPa);

P é a carga aplicada (N);

a é o comprimento da trinca (m);

B é a espessura da amostra (m);

W é a largura do corpo de prova (m).

A dimensão do raio de deformação plástica é dada pela equação 3.2.a, para a condição de estado plano de tensões (EPT), e por 3.2.b para o estado plano de deformações (EPD), no modo I de carregamento, ver figura 3.3.

$$R_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \quad (3.2.a)$$

$$R_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_e} \right)^2 \quad (3.2.b)$$

Onde:

R_p é o raio de deformação plástica (m);

K_I é o fator de intensidade de tensões, no modo I de carregamento (MPam^{1/2});

σ_e é a tensão de escoamento do material (MPa).

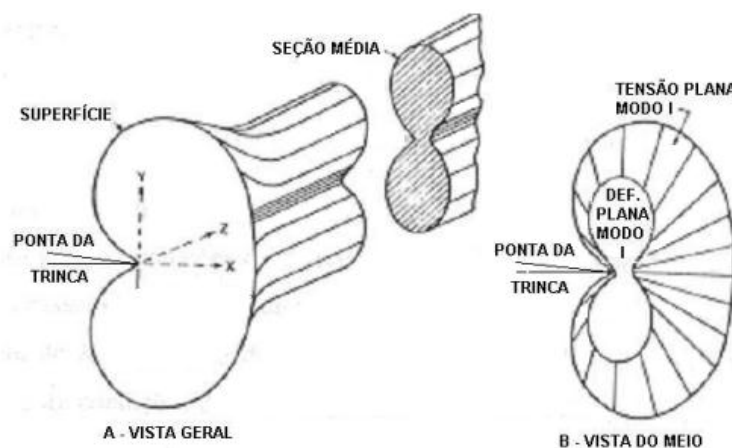


Figura 3.3: Zona plástica na ponta de uma trinca.

Estes conceitos são aplicados no estudo de diagramas baseados na velocidade de crescimento da trinca, ou taxa de crescimento de trinca (da/dN) e amplitude do fator de intensidade de tensões (ΔK) do componente em estudo. ΔK é dado pela equação 3.3 abaixo.

$$\Delta K = K_{Máx} - K_{Mín} \quad (3.3)$$

Onde:

$K_{Máx}$ e $K_{Mín}$ são os valores máximos e mínimos do fator de intensidade de tensões no ciclo de carga.

As equações são mostradas em 3.4.a e 3.4.b respectivamente, ambas oriundas da equação 3.1.a.

$$K_{Máx} = \sigma_{Máx} f \sqrt{\pi a} \quad (3.4.a)$$

$$K_{Mín} = \sigma_{Mín} f \sqrt{\pi a} \quad (3.4.b)$$

Onde:

$\sigma_{Máx}$ e $\sigma_{Mín}$ são as tensões máximas e mínimas respectivamente.

A relação entre da/dN e ΔK é mostrada na equação 3.5.

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \quad (3.5)$$

Onde, da/dN é a taxa de crescimento da trinca de fadiga; C e m são constantes de ajuste de curva que dependem do material, da razão de carregamento e das condições ambientais.

A taxa de crescimento de trinca pode ser calculada tomando a derivada em cada ponto da curva do tamanho de trinca (a) pelo número de ciclos (N) (figura 3.4). Além disso, o da/dN depende de “ a ”, ou seja, o valor da taxa de propagação da trinca aumenta juntamente com o tamanho da trinca, pois o valor do fator de intensidade de tensões (K) aumenta com o valor do tamanho da trinca. Portanto, ao cruzar os dados de da/dN e de ΔK obtém-se o gráfico mostrado na figura 3.5, onde a equação 3.5 descreve a região de crescimento estável (região II).

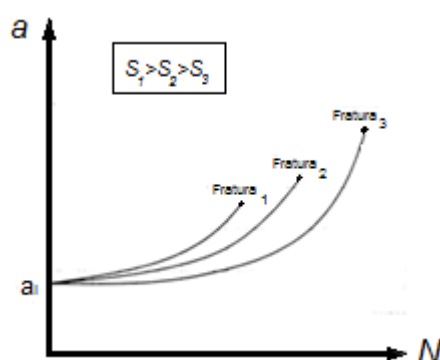


Figura 3.4: Representação esquemática do crescimento de uma trinca de fadiga considerando três tensões cíclicas (S) sendo aplicadas.

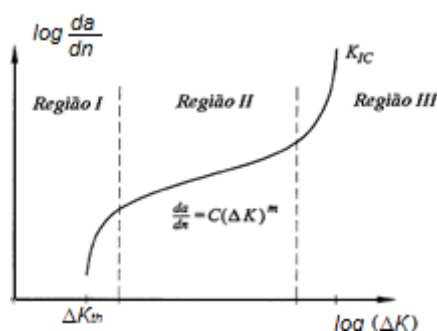


Figura 3.5: Diagrama esquemático da/dN , ΔK mostrando os 3 regimes de propagação.

A curva mostrada na figura 3.4 apresenta três regiões bem distintas. A região I revela o valor de ΔK_{th} (“*threshold*”), abaixo do qual não há propagação da trinca de fadiga. A região II, que é a de maior relevância nos estudos de fadiga, porque descreve a região de crescimento estável. A região III indica a região de crescimento instável.

3.3. RETARDO DA TAXA DE CRESCIMENTO DE TRINCA INDUZIDO PELA SOBRECARGA

O retardo da taxa de crescimento de trinca devido ao efeito das sobrecargas foi determinado empiricamente no início dos anos 60. A razão para este fenômeno é revelada examinando o comportamento da zona plástica à frente da ponta da trinca. A sobrecarga influencia deixando uma maior zona plástica à frente da trinca que a obtida pelo carregamento usual. Durante o alívio do sobrecarregamento, o material que se encontra no regime elástico, nos arredores dessa zona plástica tenta retornar a sua localização inicial resultando em esforços residuais compressivos que tendem a fechar a trinca. Assim sendo, a trinca propaga-se mais lentamente nesta zona residual compressiva. Finalmente, a velocidade de propagação de trinca retorna ao seu patamar inicial assim que a trinca ultrapassa a região de esforços residuais compressivos [Gdoutos, 2005]. As figuras 3.6 e 3.7 mostram este comportamento.

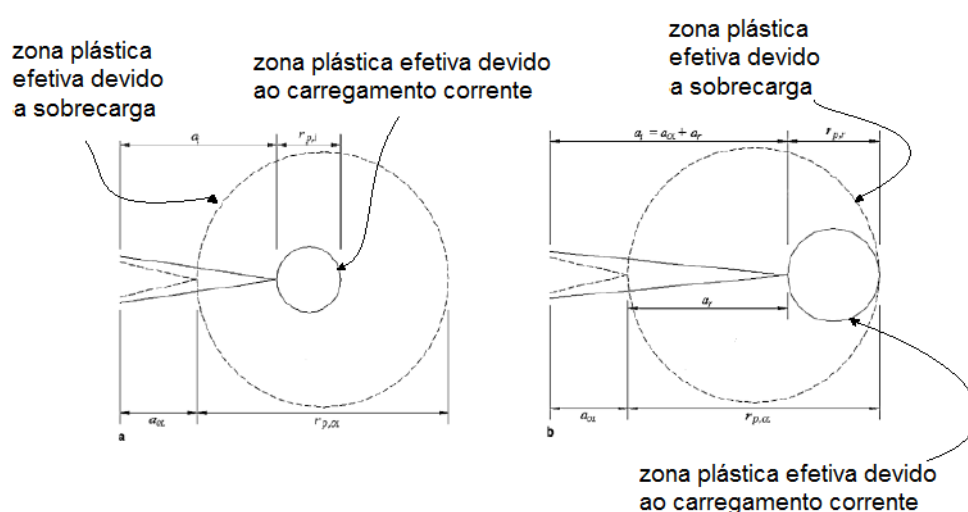


Figura 3.6: Figura mostrando raios plásticos de carregamento usual e devido à sobrecarga.

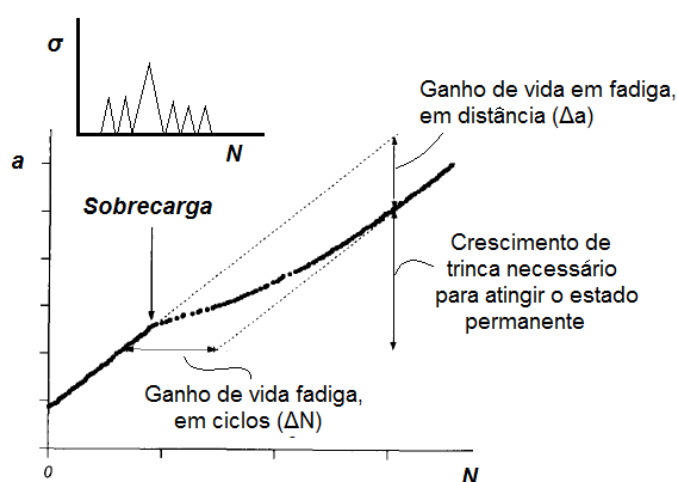


Figura 3.7: Gráfico do número de ciclos por comprimento de trinca mostrando o comportamento de um material devido ao efeito de uma sobrecarga, sobre regime de ΔK constante.

3.4. AÇOS API 2H GRAU 50

O material empregado neste trabalho é o aço estrutural API 2H grau 50. A nona edição da especificação API, que regulamenta esse material, recomenda que esse aço seja utilizado principalmente em estruturas soldadas de alto mar, em intersecções e para conformação a frio.

Este aço distingue-se dos demais por necessitar de menos potência no pré-aquecimento durante a soldagem. O resultado dessa melhoria permite melhor controle na composição química e um refinamento do grão através de tratamento térmico de normalização. A composição química recomendada é apresentada na tabela 3.1 [SSAB, 2005].

Tabela 3.1 – Composição química recomendada dos aços API 2H grau 50.

Elemento	C máx	Mn	P máx	S	Ni máx	Si	Cb	Ti máx	Al
% em peso	0,18	1,50 - 1,60	0,03	0,010 - 0,015	0,012	0,05 - 0,40	0,01-0,04	0,02	0,02-0,06

As propriedades mecânicas esperadas são em função da espessura (ver tabela 3.2) [SSAB, 2005].

Tabela 3.2 – Propriedades mecânicas do aço API 2H grau 50.

Espessura	σ_{esc} (MPa)	σ_{rup} (MPa)
$t \leq 2,5''$	345	483 – 620
$t > 2,5''$	324	483 – 620

Os valores das constantes da equação 3.5 para o aço API 2H grau 50 são apresentados na tabela 3.3, considerando duas razões de carregamento (R) [dos Santos, 2010].

Tabela 3.3 – Constantes da equação de Paris do aço API 2H grau 50.

Região	R=0,1		R=0,5	
	c	m	c	m
Metal Base	6×10^{-13}	2,811	3×10^{-12}	2,576

3.5. PROJETO DE EXPERIMENTOS – 2^k FATORIAL

Técnicas de projeto fatorial de experimentos se mostram maneiras eficientes e seguras para conduzir experimentos com dois ou mais fatores. Dentre elas, destaca-se o método fatorial completo em dois níveis e “ k ” parâmetros, devido à sua eficácia e sua simplicidade. Os objetivos são: aperfeiçoar o valor da resposta média e minimizar a variabilidade no processo ou no desempenho do produto [Lochner e Matar, 1990]. Além disso, o método, também, pode ser aplicado quando se deseja quantificar o comportamento do processo e a influência dos fatores, destacando quais são as regiões de interesse e avaliar a relevância dos parâmetros [Montgomery, 2005].

Calcula-se o número mínimo de ensaios, elevando-se o número de níveis, nesse caso 2, a “ k ” potência, onde “ k ” é o número de fatores estudados (parâmetros). Na tabela A1 do apêndice é possível encontrar um exemplo de uma matriz fatorial completa de 2 níveis, 2 fatores e 3 réplicas.

Dependendo do objetivo do trabalho, é possível realizar análises com ou sem réplicas. Pode-se, então, dizer que a técnica apresenta bom desempenho quando são considerados entre 2 e 5 parâmetros, devido à quantidade total de observações. Ao considerar acima de 5 fatores, o número de observações mínimas torna-se elevado demais. Por exemplo, ao considerar um experimento baseado no estudo de 2 níveis, 6 fatores e 3 réplicas tem-se um total de 192 observações. Na maior parte dos casos de engenharia, esse número é demasiadamente elevado.

Os dois níveis podem ser tanto quantitativos, como valores de distância, velocidade, pressão ou tempo, quanto qualitativos, como tipos de máquinas ou tipos de materiais. Aconselha-se que as observações sejam tomadas de maneira randômica de forma que os efeitos de fatores desconhecidos nos resultados sejam minimizados [Lochner e Matar, 1990]

A figura 3.8 revela todas as possíveis combinações de 2 fatores em 2 níveis. Onde, a letra “ a ” corresponde à soma dos resultados obtidos pelo parâmetro “ A ” no nível mais alto e o

parâmetro “B” no mais baixo. A letra “b” corresponde à soma dos resultados obtidos pelo parâmetro “B” no nível mais alto e o parâmetro “A” no mais baixo. A combinação de letras “ab” corresponde à soma dos resultados obtidos pelos parâmetros “A” e “B” nos níveis mais altos. O numeral entre parênteses “(1)” representa à soma dos resultados obtidos por ambos os níveis “A” e “B” nos níveis mais baixos.

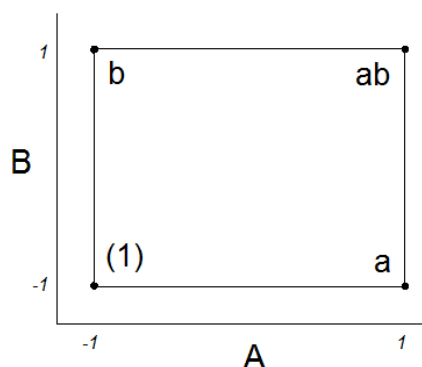


Figura 3.8: Combinação de parâmetros no desenho 2^2 fatorial.

Os efeitos são calculados através do conceito de contrastes ortogonais [Montgomery, 2005]. Os equacionamentos para o cálculo dos contrastes encontram-se nas equações 3.6, 3.7 e 3.8. As equações para determinar o valor dos efeitos são dadas pelas equações 3.9, 3.10 e 3.11.

$$\text{Contraste}_A = ab + a - b - (1) \quad (3.6)$$

$$\text{Contraste}_B = ab + b - a - (1) \quad (3.7)$$

$$\text{Contraste}_{AB} = ab + (1) - a - b \quad (3.8)$$

$$EA = \frac{[\text{Contraste}_A]}{2n} \quad (3.9)$$

$$EB = \frac{[\text{Contraste}_B]}{2n} \quad (3.10)$$

$$EAB = \frac{[\text{Contraste}_{AB}]}{2n} \quad (3.11)$$

Na figura 3.8 é possível observar a representação geométrica dos contrastes (áreas hachuradas) usados para o cálculo dos efeitos, onde são mostrados para os fatores principais (3.9.a), interações de segunda e terceira ordem (3.9.b e 3.9.c, respectivamente) [Montgomery, 2005].

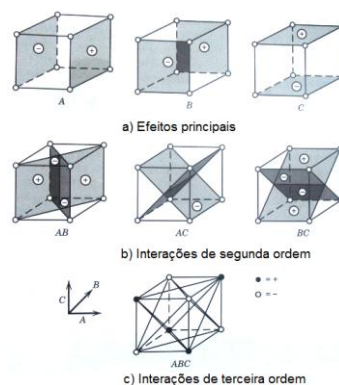


Figura 3.9: Representação geométrica dos contrastes correspondendo os efeitos principais e as interações.

4. METODOLOGIA

4.1. MATERIAL

Este trabalho utilizou barras de aço API 2H grau 50 com 65 mm de espessura como mostra a figura 4.1. Quatro corpos de prova do tipo “*Compact Tension (CT)*” foram usinados, em uma máquina de eletroerosão, na região de metal base, conforme a norma ASTM E647. 2008, figura 4.2. Dois corpos de prova foram usinados com espessura de 10 mm e outros dois com espessura de 20 mm. Todos receberam pré-trincas, com um ΔK final de $380 \text{ MPa mm}^{1/2}$, razão de carregamento (R) igual a 0,1 e de relação de comprimento de trinca (a/w) igual a 0,2, superior ao mínimo exigido pela norma ASTM E647.

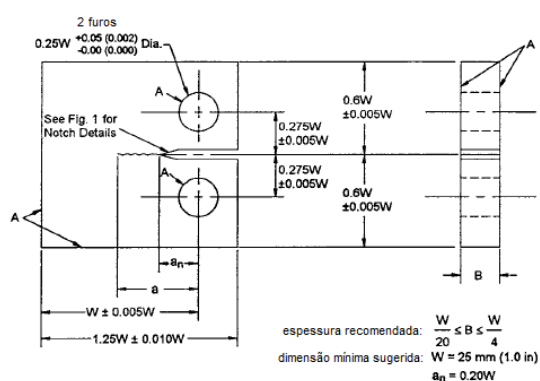


Figura 4.1: Barra do aço API 2H grau 50. Figura 4.2: Desenho do corpo de prova do tipo CT.

4.2. ENSAIOS DE TAXA DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA

Ensaio de propagação de trinca foram conduzidos, com uma máquina de ensaios servo-hidráulica, do modelo “*MTS 810*” com capacidade máxima de 100 kN (ver figura 4.3), à temperatura ambiente, com razão de carregamento 0,5, frequência de 12 Hz, controle de ΔK constante, igual a $350 \text{ MPa mm}^{1/2}$. Nestes ensaios foram aplicadas sobrecargas correspondendo a 1,5 e 2,0 vezes o $K_{m\acute{a}x}$ aplicado em fadiga. Foi utilizado o método “compliance”, com um extensômetro da marca “*MTS*” para o monitoramento do comprimento de trinca, conforme mostra figura 4.3. Assim, é possível obter os seguintes gráficos: da/dn por tamanho de trinca (a) e tamanho de trinca (a) por número de ciclos.



Figura 4.3: A esquerda, A MTS 810, com capacidade de 100kN, utilizada nos testes, e, a direita, o corpo de prova do tipo “CT” utilizado nos ensaios.

O fator de intensidade de tensões utilizado nos ensaios de fadiga foi calculado a partir da equação apresentada pela norma ISO 12108-2002 para o corpo de prova tipo “CT” de acordo com as equações 4.1 e 4.2.

$$K = \frac{P}{BW^{0,5}} f\left(\frac{a}{W}\right) 10^{3/2} \quad (4.1)$$

mas,

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \left[\frac{6\alpha^{0,5}}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{1,5}} \right] \left[1,99 - \alpha(1-\alpha)(2,15 - 3,93\alpha + 2,7\alpha^2) \right] \quad (4.2)$$

Onde, K é o fator de intensidade de tensões (MPamm^{0,5}); P é a carga aplicada (N); $f=f(a/W)$ é um parâmetro que depende da geometria da peça, das condições de carregamento, forma e orientação da trinca; a é o comprimento da trinca (mm); α é igual a (a/W) ; "a" é o comprimento de trinca (medido do início do entalhe até o centro de aplicação da carga); W é a distância do final do corpo de prova até o centro de aplicação da carga (ver figura 4.2); B é a espessura da amostra (mm);

4.3. SOBREVIDA EM FADIGA

O ganho de vida em fadiga em ciclos (ΔN), ou o número de ciclos necessários para o retorno do regime inicial de da/dN , foi calculado considerando a média de 3 observações na diferença do número de ciclos após a sobrecarga, entre a curva de tendência (sem sobrecarga) e a curva real (com sobrecarga), dentro do regime estável de velocidade da trinca, ver figura 4.4.

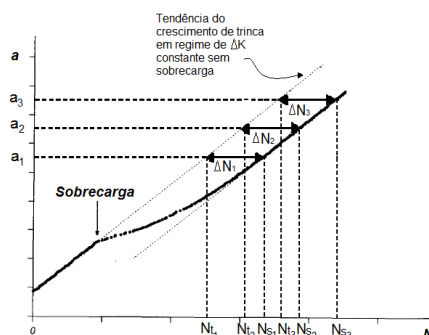


Figura 4.4: Esboço de uma curva $a \times N$, ilustrando o cálculo de ΔN .

4.4. PROJETO DE EXPERIMENTOS

A análise baseou-se em experimentos fatoriais completos, com dois parâmetros: magnitude da sobrecarga e espessura do corpo de prova; na qual cada fator varia em dois níveis, ver tabela 4.1. A matriz de experimentos utilizada encontra-se no apêndice, tabela A2. Este trabalho estimou os efeitos com o auxílio do "software" "Minitab 16". Através de um gráfico de Pareto é possível ordenar a importância dos fatores com base nos efeitos.

Tabela 4.1: Níveis dos fatores abordados no trabalho.

Fatores	Nível baixo	Nível alto
Sobrecarga	1,5 X Kmáx	2 X Kmáx
Espessura	10 mm	20 mm

Assim sendo, é possível fornecer uma equação que descreva o fenômeno através de regressão linear e, então, criar uma superfície de resposta esperada do sistema. Nesse trabalho foi utilizado um modelo de regressão baseado em efeitos, conforme a equação 4.3.

$$\Delta N = \beta_4 + \beta_3 S E + \beta_2 S - \beta_1 E \quad (4.3)$$

Onde ΔN é o ganho de vida em fadiga esperado em ciclos, S é o valor da magnitude da sobrecarga, " E " é o valor da espessura, β_1, β_2 e β_3 são coeficientes lineares e β_4 é a média do ganho de vida em fadiga em ciclos de todas as observações.

5. RESULTADOS

5.1. ENSAIOS DE TAXA DE PROPAGAÇÃO DE TRINCA

A tabela 5.1 mostra os resultados encontrados do tamanho da pré-trinca de fadiga, o comprimento da trinca onde ocorreu a sobrecarga, o crescimento necessário para que a trinca atinja o estado permanente, o comprimento de trinca ganho devido a sobrecarga e os resultados dos cálculos dos raios de deformação plástica, considerando estado plano de tensões (EPT) e estado plano de deformações (EPD).

Tabela 5.1: Comprimento das trincas em que foram aplicadas as sobrecargas, das zonas afetadas e resultado dos cálculos de raios plásticos.

Identificação	S^* [x $K_{máx}$]	E^{**} [mm]	Razão de carregamento	Pré-trinca de fadiga [mm]	Valor de "a" onde ocorreu a sobrecarga [mm]	Crescimento até atingir o estado permanente [mm]	Ganho de vida em fadiga em tamanho de trinca [mm]	Raio de deformação Plástica para EPT [mm]	Raio de deformação Plástica para EPD [mm]
1-00	1,5	10	0,5	9,9	12,1	0,7	0,1	1,5	0,5
2-10	2	10	0,5	9,5	12,6	1,7	0,6	2,6	0,9
3-01	1,5	20	0,5	9,9	18,5	0,5	-0,2***	1,5	0,5
4-11	2	20	0,5	9,7	17,4	1,0	0,3	2,6	0,9

* " S " é a magnitude da sobrecarga,

** " E " é a espessura do corpo de prova,

*** o sinal negativo em frente ao tamanho da zona afetada do corpo de prova 3-01 indica que ocorreu aceleração da trinca, ao contrário dos demais corpos de prova.

As figuras 5.1 até 5.4 mostram gráficos do comprimento da trinca em função do número de ciclos. É possível observar o comportamento típico de amostras submetidas a ciclos de ΔK constante, em que são aplicados picos de sobrecargas. A amostra 3-01 apresentou perda na vida em fadiga quando aplicada a sobrecarga de $1,5x K_{máx}$. Todas as outras amostras apresentaram ganho de vida em fadiga com o efeito da aplicação da sobrecarga.

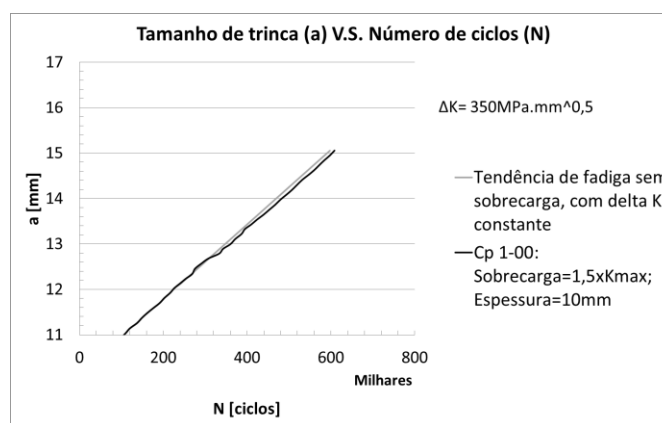


Figura 5.1: Gráfico de tamanho de trinca versus o número de ciclos, com ΔK constante, para a amostra 1-00, indicando ganho de vida em fadiga.

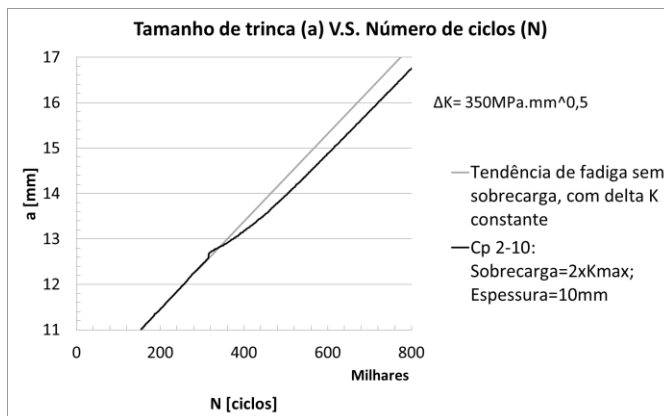


Figura 5.2: Gráfico de tamanho de trinca versus o número de ciclos, com ΔK constante, para a amostra 2-10, indicando ganho de vida em fadiga.

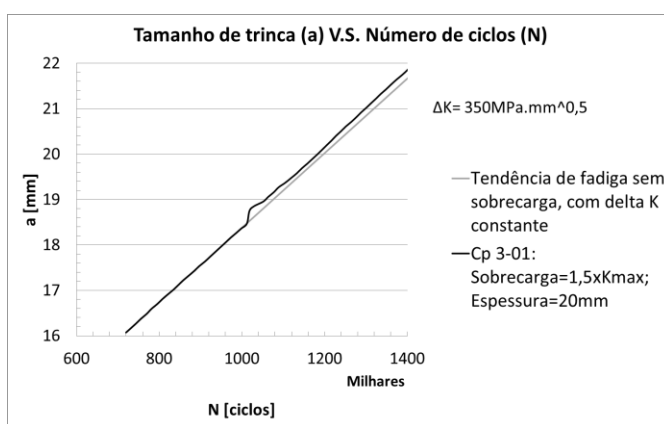


Figura 5.3: Gráfico de tamanho de trinca versus o número de ciclos, com ΔK constante, para a amostra 3-01, indicando perda de vida em fadiga.

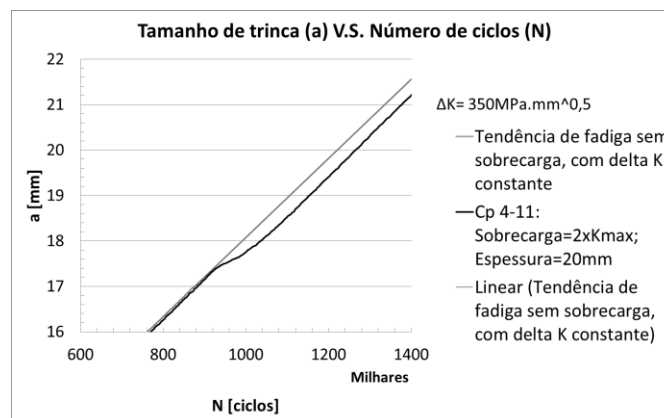


Figura 5.4: Gráfico de tamanho de trinca versus o número de ciclos, com ΔK constante, para a amostra 4-11, indicando ganho de vida em fadiga.

A figura 5.5 mostra a variação de da/dN em relação ao tamanho de trinca (a) quando aplicada a sobrecarga na condição 2-10. É possível observar 4 estágios: (i) breve aumento na taxa de crescimento de trinca imediatamente após aplicada a sobrecarga; (ii) intensa desaceleração na velocidade de crescimento da trinca, até atingir um ponto mínimo; (iii) aumento gradual da taxa de crescimento de trinca; (iv) restabelecimento do regime de velocidade de trinca anterior a sobrecarga.

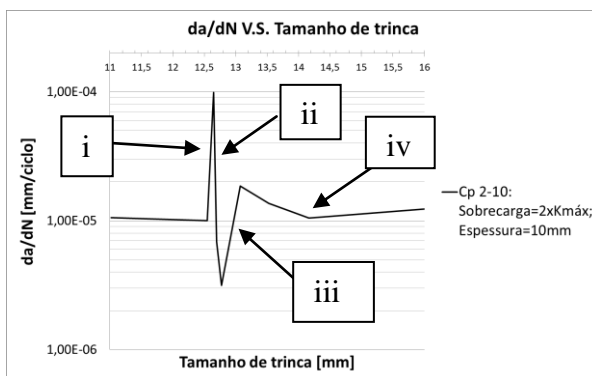


Figura 5.5: Tendência do comportamento da velocidade de crescimento da trinca (da/dN) quando aplicada a sobrecarga.

5.2. PROJETO DE EXPERIMENTOS

A análise da influência das sobrecargas e da espessura no ganho de vida em fadiga parte da observação do ganho em ciclos das 4 condições básicas estudadas. A tabela 5.2 mostra a matriz fatorial completa, junto com o ganho de vida em fadiga em ciclos observado em cada condição.

A tabela A.2, encontrada no apêndice, mostra os efeitos principais e as interações entre os fatores, o sinal negativo no resultado do efeito da espessura indica que o ganho de vida em fadiga decresce em relação ao aumento da espessura. As figuras 5.6.a e 5.6.b mostram a relação entre o ganho médio de vida em fadiga e os efeitos principais e a interação. Na figura 5.6.a observa-se que ao aumentar a magnitude da sobrecarga, aumenta-se a vida em fadiga. Por outro lado, ao aumentar a espessura diminui-se a vida em fadiga. Na figura 5.6.b não há paralelismo entre as retas, isso indica que a interação entre os fatores deve ser considerada. Além disso, revela indícios de que o ganho de vida em fadiga é mais sensível à espessura quando a sobrecarga encontra-se em seu nível mais baixo, porque mostra a maior variação na média de vida em fadiga. No diagrama de Pareto, figura 5.7 pode-se verificar que o fator dominante é a sobrecarga (59%), seguido da espessura (28%) e da interação entre os fatores (13%).

Tabela 5.2: Matriz do projeto fatorial completo.

#	KI Sobrecarga	Espessura [mm]	ΔN [ciclos]
1-00	1,5 x Kmax	10	12529
2-10	2 x kmax	10	49434
3-01	1,5 x Kmax	20	-20751
4-11	2 x kmax	20	37127

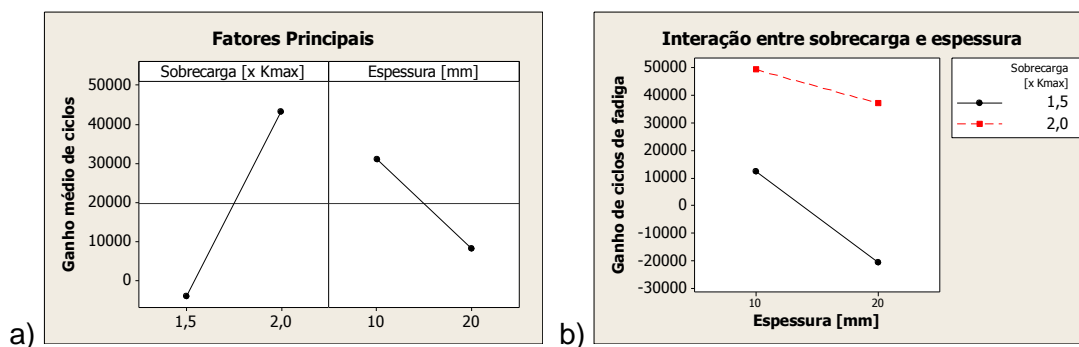


Figura 5.6: Ganho de vida em fadiga em relação aos fatores principais (a) e a interação (b).

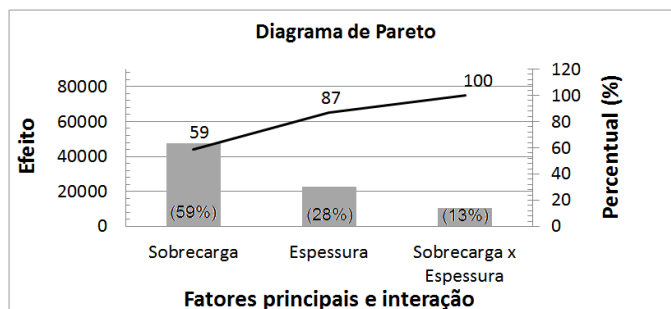


Figura 5.7: Diagrama de Pareto.

5.2. REGRESSÃO LINEAR E CURVA DE NÍVEL

A regressão linear resultou na equação 5.1, correlacionando o ganho de vida em fadiga em ciclos (ΔN), com a sobrecarga (S) e a espessura (E). Com base nessa equação extrapolam-se valores e obtém-se a figura 5.8. Dessa maneira, pode-se identificar que o maior ganho de vida em fadiga se dá com sobrecargas altas e pequenas espessuras. Além disso, é possível identificar uma região em que o ganho de vida em fadiga será nulo e outra que será negativo (quando utilizadas sobrecargas de baixas magnitudes e grandes espessuras).

$$\Delta N = 19585 + 5243 \times S \times E + 23696 \times S - 11397 \times E \quad (5.1)$$

Onde, ΔN corresponde ao ganho de vida em fadiga em ciclos, S corresponde ao valor da sobrecarga, E corresponde a espessura.

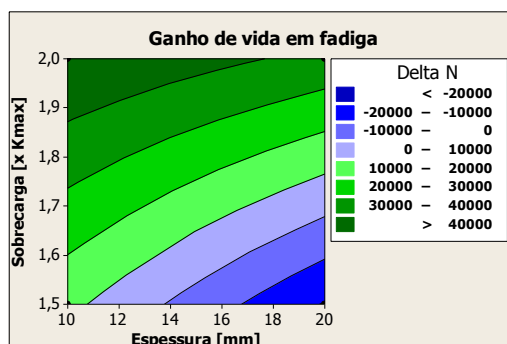


Figura 5.8: Curva de nível gerada pelo "software" "Minitab 16".

6. DISCUSSÃO

A partir dos ensaios realizados, notou-se que, após a aplicação da sobrecarga, ocorre cegamento na ponta da trinca e o surgimento de uma zona residual compressiva, a qual retarda a velocidade de crescimento de trinca. Além disso, o tamanho da zona compressiva está relacionado com o tamanho do raio de deformação plástica, visto que, quando a magnitude da sobrecarga aumenta, é possível observar, também, aumento na região afetada pela sobrecarga, no raio plástico e no ganho de vida em fadiga em ciclos.

Por outro lado, quando a espessura aumenta, tem-se a diminuição do ganho de vida em fadiga. Isso ocorre, porque a proporção do corpo de prova que permanece no estado plano de deformações aumenta, e assim, uma maior proporção do raio de deformação plástica gerado a frente da trinca é governado pelo efeito estado plano de deformações, que é 3 vezes menor.

Os corpos de prova de maiores espessuras encontraram valores de crescimento de trinca necessários para que as trincas retornem ao regime inicial de da/dN próximos ao tamanho do raio de deformação plástica para o EPD . Isso indica coerência entre os dados obtidos e a teoria de que o tamanho da zona compressiva esteja relacionado com o tamanho

do raio de deformação plástica e, conseqüentemente, com o ganho de vida em fadiga. Por outro lado, observa-se que os valores, para os corpos de prova de espessura igual a 10 mm, encontram-se entre os valores calculados de raio de deformação plástica para o *EPT* e para o *EPD*. Isso indica que nesses corpos de prova atuam estados de tensões mistos.

7. CONCLUSÕES

A partir do estudo dos parâmetros foi comprovado que a sobrecarga e a espessura apresentam influência na vida em fadiga. A importância dos fatores foi quantificada. O fator dominante é a magnitude da sobrecarga (59% do efeito total). Em segundo lugar, observa-se a influência da espessura (28% do efeito total). Também, deve-se considerar a influência da interação entre a sobrecarga e a espessura (13% do efeito total). Além disso, observa-se que ao aumentar a magnitude da sobrecarga, aumenta-se o ganho de vida em fadiga em ciclos. Por outro lado, ao aumentar a espessura, tem-se efeito contrário, ou seja, perda de vida em fadiga. Assim sendo, deve-se optar por sobrecargas altas e pequenas espessuras para obter ganho de vida em fadiga máximo.

Além disso, a aplicação da sobrecarga não resultou sempre em ganho de vida em fadiga, visto que, o retardo da taxa de crescimento de trinca, também, depende da espessura do material e da interação entre a sobrecarga e a espessura.

Foi possível observar o comportamento típico de corpos de prova fadigados, com ΔK constante e sujeitos a picos de sobrecargas. Onde quatro estágios de variação da taxa de crescimento de trinca foram identificados. Além disso, as sobrecargas nem sempre resultaram em ganho de vida em fadiga, porque este fenômeno, também, depende consideravelmente da espessura do material e da interação entre a sobrecarga e a espessura.

Foi possível identificar estados de tensões mistos nos corpos de prova de espessura igual a 10 mm e boa aproximação para o *EPD* para os corpos de prova de espessura igual a 20 mm.

Devido ao número reduzido de observações, não foi possível determinar a variabilidade do fenômeno, nem a hipótese de linearidade e tampouco os intervalos de confiança.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para entender melhor a influência da sobrecarga e da espessura no aço API 2H grau 50 sugere-se que se obtenham mais observações para cada condição, a fim de que seja possível aplicar análise de variância e outros métodos de comprovação estatística.

Além disso, pode-se aplicar a técnica de ponto central, junto com a análise de resíduos para confirmar as hipóteses impostas pelo método experimental utilizado neste trabalho.

Finalmente, pode-se estudar o efeito da razão de carregamento (*R*) na vida em fadiga e encontrar o fator de intensidade de tensões crítico do material, para poder aplicar sobrecargas de maiores magnitudes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API; “**Specification for carbon manganese steel plate for offshore structures**”, Julho de 2006.

ASTM E647-08; “**Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates**”, 2008.

ASTM E1150-87; “**Definitions of Terms Relating to Fatigue**”, 1993.

BS ISO 12108:2002; “**Metallic materials. Fatigue testing. Fatigue crack growth method**”, 2008.

Branco M. C.; Fernandes A. A.; Tavares P. M. S.; “**Fadiga de estruturas soldadas**”, Fundação Calouste Gulbenkian, Springer, 1ª edição, 1986.

Santos, J P. “**Avaliação do Comportamento a Fadiga de uma Junta Soldada do Aço API 2H Grau 50**”, Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

Minitab Inc., “**Minitab 16**”, 16.1.1, 2010.

Montgomery D. C.; “**Design and Analysis of experiments**”, John Wiley & Sons, 7ª edição, 2005.

Gdoutos E.E.; “**Fracture Mechanics: An Introduction**”, 2ª edição, 2005.

Lochner R. H. e Matar J. E.; “**Designing for quality: An introduction to the best of Taguchi and western methods of statistical experimental design**”, Quality Resources, 1ª edição, 1990.

Mahagaonkar S.B.; Brahmenkar P.K.; Seemikeri C.Y.; “**Effect on fatigue performance of shot peened componentes: An analysis using DOE technique**”, International Journal of Fatigue, pp 693-702, 2009.

SSAB, “**API 2H Grade 50 Steel Plate**”, http://www.ssab.com/Global/SSAB/SSAB_Americas/API%20H-50%20Brochure%20%2007-10-08.pdf. Acessado em 15/10/2005.

Zanon, G.; “**Estudo sobre retardo no crescimento de trincas por sobrecargas mecânicas em aço Apl 5L X65**”, Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Metalúrgica) – Departamento de Metalurgia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

APÊNDICE I

A) PROJETO DE EXPERIMENTOS:

Tabela A1: matriz de fatorial completa, 3×2^2 .

Ordem padrão	Ordem randômica	Fator A	Fator B	Respostas (y)
3	1	-1	1	Y_1
8	2	1	1	Y_2
6	3	1	-1	Y_3
9	4	-1	-1	Y_4
12	5	1	1	Y_5
1	6	-1	-1	Y_6
5	7	-1	-1	Y_7
10	8	1	-1	Y_8
11	9	-1	1	Y_9
7	10	-1	1	Y_{10}
2	11	1	-1	Y_{11}
4	12	1	1	Y_{12}

Tabela A.2: Efeitos dos fatores principais e da interação de segunda ordem.

Fatores principais	Efeitos
Sobrecarga	47392
Espessura	-22793
Interação	
Sobrecarga x Espessura	10486

B) METALOGRAFIAS

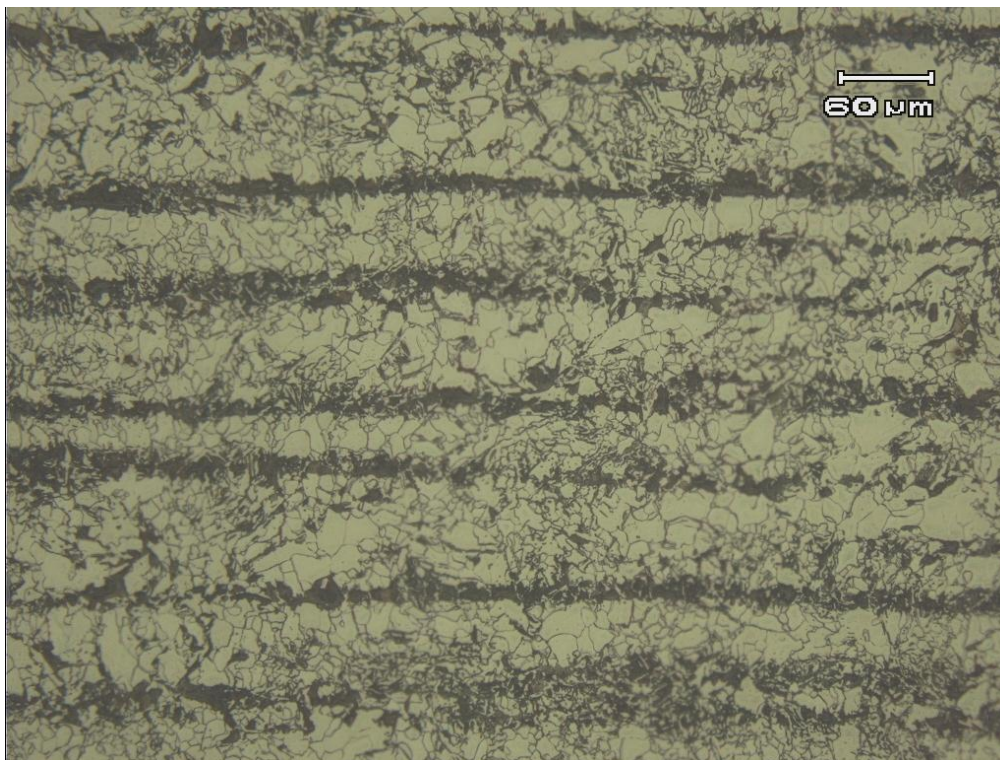


Figura B.1: Metalografia do aço API 2H grau 50, com aumento de 200x, atacado com solução de Nital 2%. É possível identificar um sentido longitudinal de laminação, pequeno tamanho de grão. A região clara consiste de ferrita e a escura de perlita.

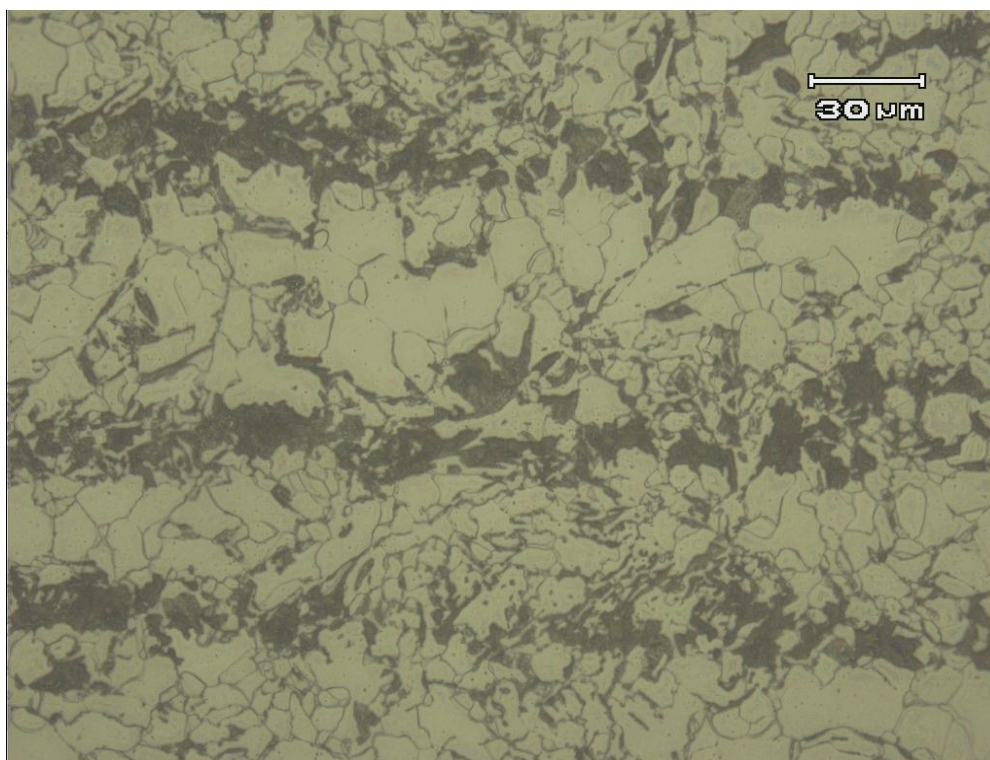


Figura B2: Metalografia do aço API 2H grau 50, com aumento de 500x, atacado com solução de Nital 2%. É possível identificar perlita no contorno de grão.

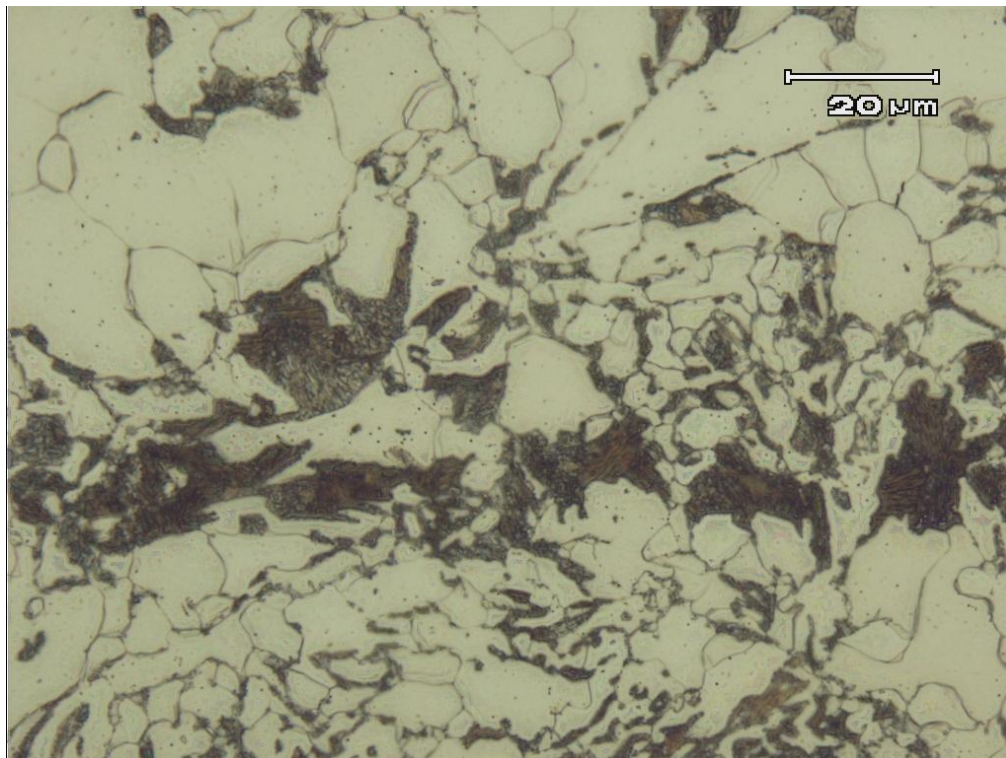


Figura B3: Metalografia do aço API 2H grau 50, com aumento de 1000x, atacado com solução de Nital 2%. É possível visualizar as lamelas de perlita.