

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

ESTUDO PRELIMINAR COMPARATIVO DO EFEITO DA ESPESSURA NO
COMPORTAMENTO EM FADIGA DE ARAMES DE ARMADURA DE TRAÇÃO
DE RISERS FLEXÍVEIS

Claudio Javier Almirón

Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre, Dezembro de 2010

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

ESTUDO PRELIMINAR COMPARATIVO DO EFEITO DA ESPESSURA NO
COMPORTAMENTO EM FADIGA DE ARAMES DE ARMADURA DE TRAÇÃO
DE RISERS FLEXÍVEIS

Claudio Javier Almirón

Dissertação para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia

Porto Alegre, Dezembro de 2010

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre, 2010

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof. Dr Luciano Volcanoglo Biehl

Prof. Dr. Néverton Hofstadler Peixoto

Prof. Dr. Paulo Henrique Sanches Cardoso

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador do PPGE3M

Dedico esta dissertação a todos que de alguma forma contribuíram para sua conclusão.

"A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu estado original".

Albert Einstein

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
Resumo	XII
Abstract	XIII
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Risers Flexíveis	4
2.1.1 Classes de dutos flexíveis de camadas não aderentes	8
2.1.3 Detalhamento das camadas do duto de camadas não aderentes	8
2.1.3.1 Carcaça intertravada	8
2.1.3.2 Barreira à pressão interna	10
2.1.3.3 Armadura de pressão	11
2.1.3.4 Armadura de tração	12
2.2 Fadiga	15
2.2.1 Carregamento dinâmico	17
2.2.2 Iniciação e propagação da trinca	19
2.2.3 Curvas S-N	22
2.2.4 Fatores que afetam a vida em fadiga	24
2.2.5 Efeito da espessura na vida em fadiga	24
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 Seleção de amostras	30
3.2 Preparação das amostras e definição das cargas	30
3.2.1 Geometria das amostras	30
3.2.2 Flexão a três pontos	32
3.3 Caracterização do material	36
3.4 Análise da fratura	38
4.0 RESULTADOS	39
4.1 Ensaio de fadiga	39
4.2 Análise das fraturas	41
4.2.1 Imagens obtidas por lupa	41
4.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura	42
4.3 Ensaio de tração	45

5.0	DISCUSSÃO.....	47
6.0	CONCLUSÕES.....	50
7.0	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
8.0	BIBLIOGRAFIA.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Detalhamento das funções das camadas para cada família padronizada [API 17B].....	7
Tabela 2: Relação entre defeitos conseqüências e possíveis causas de falhas em armaduras de tração.	14
Tabela 3: Comparação das composições químicas do material testado e do aço SAE 1060.....	36
Tabela 4: Valores das tensões máximas e correspondentes ciclos de ruptura das amostras com 5 mm de espessura.	40
Tabela 5: Valores das tensões máximas e correspondentes ciclos de ruptura das amostras com 2,5 mm de espessura.	40
Tabela 6: Imagens de fraturas obtidas na lupa e respectivos ciclos para falha.	41
Tabela 7: Resultados dos ensaios de tração.....	46
Tabela 8: Valores estimados do Fator de Efeito da espessura e Limite de Fadiga.....	48

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação de configuração de duto flexível tipo unbonded [Padilha, 2009].	2
Figura 2: Indicação da região de rompimento da armadura de tração [Bueno, 2009].	2
Figura 3: Esquema de extração submarina [Padilha, 2009].	4
Figura 4: Riser Flexível de camada não aderente.	5
Figura 5: Principais configurações para risers flexíveis [API 17B].	6
Figura 6: Seção transversal da carcaça intertravada [Silva, 2006].	9
Figura 7: Aspecto interno da carcaça intertravada em tubo flexível [Silva 2006].	9
Figura 8: Seções típicas da armadura de pressão ⁷ .	11
Figura 9: Detalhe das camadas de armadura de tração posicionadas em sentidos opostos [Bueno, 2010].	12
Figura 10: Representação detalhada de um riser de camadas não aderentes [API 17B].	13
Figura 11: Relação entre solicitação mecânica e tempo em carregamento cíclico. [Callister, 2007].	18
Figura 12: Bandas de deslizamento em um carregamento estático [Stephens et al, 2001].	19
Figura 13: Planos de intrusão e extrusão desenvolvidos na superfície [Stephens et al 2001].	20
Figura 14: Representação do desenvolvimento dos planos de intrusão e extrusão [Stephens et al 2001].	20
Figura 15: Superfície de fadiga de um parafuso [Shigley, 2006].	21
Figura 16: Curva de fadiga levantada pelo método S-N [ASTM E468 1998].	22
Figura 17: Resultados de fadiga em soldas para diferentes espessuras, [Kihl e Sarkani, 1998].	25
Figura 18: Curvas da/dN vs deltaK para alumínio 2024 em testes realizados no vácuo, [B. Holper, et al, 2002].	26
Figura 19: Curvas da/dN vs deltaK para alumínio 2024 em testes realizados ao ar, [B. Holper, ET AL, 2002].	27
Figura 20: Curvas da/dN vs deltaK para alumínio 7075 em testes realizados ao ar, [B. Holper, ET AL, 2002].	27
Figura 21: Fluxograma mostrando as etapas do trabalho.	29
Figura 22: Dimensões em mm do arame da armadura de tração cortado.	31
Figura 23: Dimensões em mm da amostra após o corte por eletro erosão.	31
Figura 24: Amostras utilizadas para curva de fadiga.	32
Figura 25: Geometria da seção transversal do corpo de prova.	33
Figura 26: Diagrama de corpo livre para flexão a três pontos.	35
Figura 27: Equipamento servo hidráulico utilizado para realização dos ensaios.	35
Figura 28: Dispositivos para montagem do ensaio.	36
Figura 29: Microestrutura do arame direção longitudinal, 200x.	37
Figura 30: Metalografia realizada na seção transversal.	37

Figura 31: Equipamento utilizado para análise da fratura (Microscópio Eletrônico de Varredura).	38
Figura 32: Mostra o confronto dos resultados dos ensaios de fadiga para as espessuras de 2,5 e 5 mm.	39
Figura 33: Nucleação da trinca da amostra 2 na região do raio de curvatura.	42
Figura 34: Nucleação de trinca na região central da amostra 2.....	42
Figura 35: Nucleação de trinca na região do raio amostra 4.	43
Figura 36: Nucleação de trinca na região central.	43
Figura 37: Indicação da região de nucleação de trinca na amostra 5.....	44
Figura 38: Indicação da região de iniciação de trinca na amostra.....	44
Figura 39: Região de iniciação de trinca da amostra 8.	45
Figura 40: Curvas Tensão x Deformação obtidas dos arames.	45

Resumo

Este trabalho tem como objetivo realizar um estudo preliminar da influência da espessura na vida em fadiga de arames de aço deformados a frio. A espessura original dos arames é de 5mm e foi criada uma segunda condição, com diminuição dessa espessura para 2,5mm. Para avaliar o comportamento em fadiga do material, foram realizados testes de fadiga por carregamento em flexão com o intuito de comparar a diferença de desempenho entre as espessuras de 5 e 2,5mm. Os resultados mostraram que para os níveis de carregamento mais altos impostos sobre as amostras (1000 MPa) a condição com 2,5mm de espessura apresenta uma tendência de melhora na resistência à fadiga, essa tendência de aumento acentua-se à medida que os níveis de solicitação diminuem. A condição com espessura de 2,5mm apresentou também tendência de aumento do limite de fadiga.

Palavras-chave: espessura, fadiga, arames.

Abstract

The aim of this work is to make a preliminary study about the influence of thickness effect on the fatigue behavior of cold drawing steel strips. The original component's thickness is 5mm and was carried a decrease of this thickness to 2,5mm. To evaluate the fatigue performance, was obtained bending load fatigue curves to compare the performance of the samples with 5 and 2,5 mm of thickness. The results shown that for higher load levels the fatigue strength and endurance limit had presented a tendency of increase for the 2,5mm thickness condition.

Keyword: thickness, fatigue, wire.

1.0 INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações da engenharia está relacionada com a falha de componentes mecânicos. O ônus acarretado pelas falhas em componentes estruturais acaba sendo contabilizado nos mais diversos aspectos: perda de tempo na produção, multas contratuais de fornecimento, comprometimento de equipamentos, impacto ambiental, perda de vidas, etc. A maior parte das falhas observadas está relacionada à Fadiga dos materiais. Portanto, este fenômeno tem sido profundamente estudado por diversas instituições ao redor do globo terrestre, sendo incontáveis as linhas de pesquisa que podem ser geradas por essa área de conhecimento.

A Petrobras S/A possui uma quantidade considerável de Risers Flexíveis instalada, isso remete a um capital investido da ordem de bilhões de reais [Martins, 2008]. Uma etapa fundamental na produção de petróleo em águas profundas é a elevação do óleo de profundidades superiores a 1000 metros até a superfície. O principal componente de todas as tubulações envolvidas nesse transporte é um duto vertical denominado riser, de natureza rígida ou flexível, Figura 1, que conecta um trecho de tubulação submarina à plataforma [Souza, 2004]. O rompimento dos arames da armadura de tração tem sido o principal modo de falha nesses componentes, sendo que, ocorrem principalmente próximo ao conector e quando a exploração ocorre em águas profundas [Martins, 2008].



Figura 1: Representação de configuração de duto flexível tipo unbonded [Padilha, 2009].

O rompimento dos arames da armadura de tração tem sido o principal modo de falha nesses componentes, sendo que, ocorrem principalmente próximo ao conector e quando a exploração ocorre em águas profundas [Martins 2008], isso está ilustrado na Figura 2.



Figura 2: Indicação da região de rompimento da armadura de tração [Bueno, 2009].

Se considerarmos a produção científica e as bibliografias clássicas da área de Fadiga, o efeito da espessura no comportamento em Fadiga é um tema menos explorado do que deveria ser, já que espessuras menores poderiam proporcionar aumento da Vida em Fadiga e do Limite de Resistência à Fadiga. Levando-se em conta essa hipótese, não podemos desconsiderar a diminuição de custo trazido pela menor relação (quantidade de material utilizado/melhoria de desempenho). Deste modo, o

estudo do comportamento de materiais sob solicitação dinâmica é de grande importância para o desenvolvimento tecnológico e econômico atual da indústria.

O presente trabalho visa avaliar a Vida em Fadiga, modificando a espessura original dos arames da armadura de tração utilizados em Risers Flexíveis. Tais componentes são tiras de aço com seção transversal, aproximadamente retangular, com dimensões de 15x5 mm. São apresentados resultados obtidos de ensaios de fadiga considerando variações na espessura dos componentes.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Risers Flexíveis

A Petrobras é a referência mundial em exploração de petróleo em águas profundas e ultra-profundas. Essa hegemonia fez-se necessária visto que as características das reservas nacionais que, ao final de 1999, compreendiam 17,3 bilhões de barris onde: 14% em terra firme, 11% em águas rasas, 25% em águas profundas e 50% em águas ultraprofundas. Informação essa reforçada pela descoberta, em dezembro de 2002, no Espírito Santo, do campo batizado como Jubarte, perfurado a uma profundidade de 1 500 metros, com reservas avaliadas em 300 milhões de barris de petróleo [Souza, 2004]. Diante desse contexto, cada vez mais se faz necessário o desenvolvimento de tecnologias de produção de petróleo em águas profundas. A Figura 3 mostra um esquema simplificado mostra os principais elementos utilizados em um sistema de extração de petróleo em águas profundas.

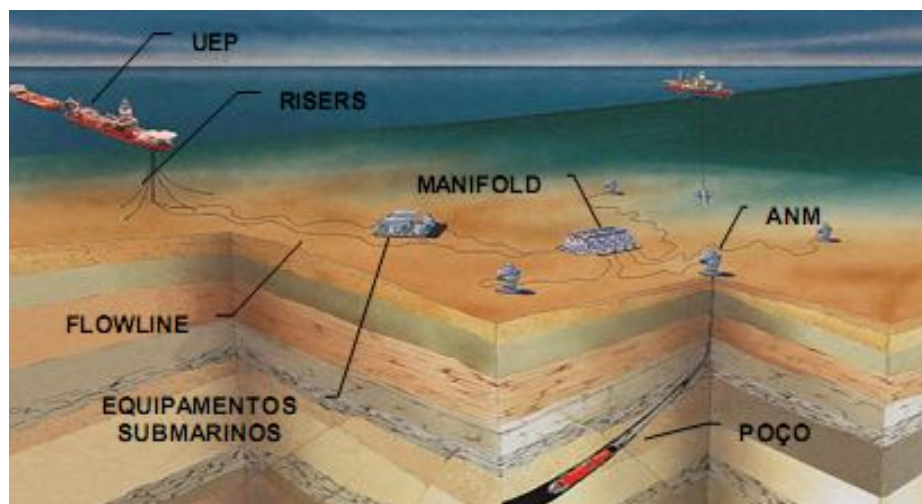


Figura 3: Esquema de extração submarina [Padilha, 2009].

Risers Flexíveis são estruturas utilizadas na indústria petrolífera para transportar petróleo do fundo do mar para uma unidade flutuante de produção. Como características gerais destas estruturas, pode-se considerar a alta flexibilidade, o que justifica o seu uso acoplado a estruturas complacentes e capacidade de ser armazenada em rolos, que diminui o custo de transporte e instalação.

Fabricados em comprimentos que podem ultrapassar 3000 metros, permitem a instalação de longas linhas, evitando a utilização de flanges intermediárias. Em geral, a instalação de flanges aumenta o risco de falha da linha [Xavier, 2009].

Um Riser Flexível é composto por enumeras camadas de diferentes materiais, que interagem entre si. Podem ser divididas em dois grupos: linhas de camadas não-aderentes (unbonded) e linhas de camada aderente (bonded). A diferença está baseada na liberdade de movimento das camadas, umas em relação às outras. A Figura 4 ilustra uma típica linha flexível não aderente [Costa, 2003].

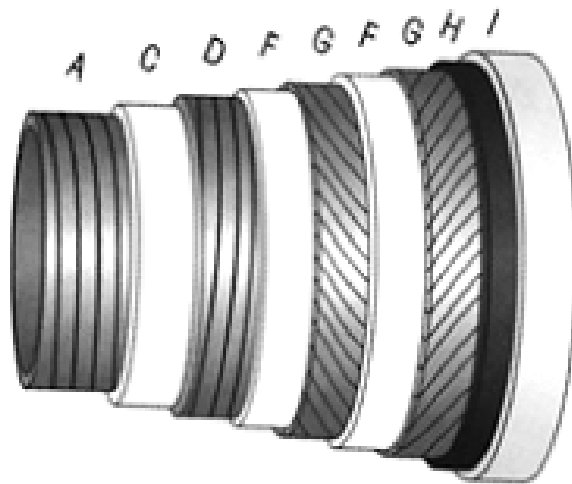


Figura 4: Riser Flexível de camada não aderente.

As camadas ilustradas na Figura 4 **Figura 4** são compostas por materiais metálicos e poliméricos.

Existem diferentes configurações de risers e suas aplicações dependem das condições de utilização. A Figura 5 mostra as diferentes configurações de aplicação dos risers flexíveis [API 17B].

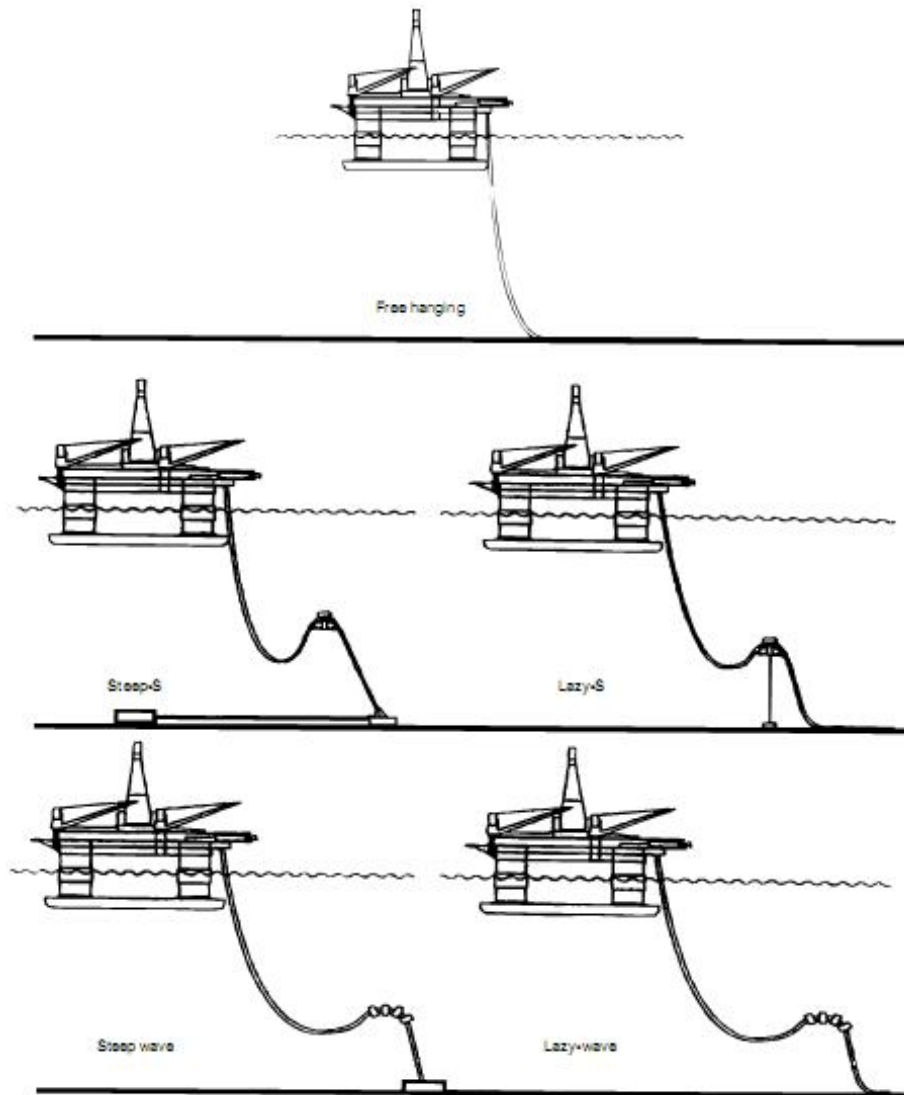


Figura 5: Principais configurações para risers flexíveis [API 17B].

Para diferentes condições de aplicação dos risers flexíveis de camadas não aderentes, temos diferentes configurações denominadas de famílias de dutos flexíveis. A

Tabela 1 mostra as principais camadas para as diferentes famílias. Não foram colocadas as camadas secundárias que têm a função de diminuir o atrito.

Tabela 1: Detalhamento das funções das camadas para cada família padronizada [API 17B].

Camada Nº	Função da camada	Família 1	Família 2	Família 3
		Dutos de Parede Lisa	Duto de Parede Rugosa	Duto de parede rugosa reforçado
1	Previne o colapso		Carcaça	Carcaça
2	Integridade do fluido interno	Barreira a pressão interna	Barreira a pressão interna	Barreira a pressão interna
3	Resistência ao esforço de pressão	Camada da armadura de pressão		Camada da armadura de pressão
4	Integridade quanto ao fluido externo	Barreira intermediária		
5	Resistencia ao esforço de tração	Camada de armadura de tração	Camada de armadura de tração	Camada de armadura de tração
6	Integridade quanto ao fluido externo	Revestimento externo	Revestimento externo	Revestimento externo

Atualmente, o diâmetro dos dutos flexíveis varia entre 2” e 19”, levando-se em consideração o diâmetro interno, diferente dos dutos rígidos que são referenciados pelo diâmetro externo. Conforme o seu diâmetro, a profundidade de trabalho e sua função, a pressão interna pode variar de 70 a 700 bar. As temperaturas podem chegar a 130 °C e as profundidades de trabalho podem variar de 1500 a mais de 3000 metros [Xavier, 2009].

2.1.1 Classes de dutos flexíveis de camadas não aderentes

Os dutos flexíveis de camada não aderente também podem ser classificados como: dutos de parede rugosa e de parede lisa. Nos dutos de parede rugosa é utilizada uma carcaça intertravada como parede mais interna e são utilizadas para efetuar o transporte de gases ou de fluidos que contenham gases. O propósito da utilização da carcaça intertravada é a possibilidade de uma queda brusca de pressão internada linha causar um colapso da estrutura, isso pode ser evitado pelo uso da carcaça. Os dutos de parede rugosa podem possuir uma camada de reforço à pressão, sendo caracterizados como dutos de parede rugosa com reforço à pressão. Dessa maneira, possuem as seguintes camadas (da mais interna para a mais externa): carcaça intertravada, camada plástica interna, armadura de pressão (opcional), um par de armaduras de tração e uma camada plástica externa. Os dutos de parede lisa não possuem carcaça intertravada, sua aplicação se dá no transporte de fluidos que não apresentem difusão de gases através da camada plástica que, neste tipo de duto, é a camada mais interna. Eles possuem as seguintes camadas: cada plástica interna, armadura de pressão, um par de armaduras de tração e uma camada plástica externa [Xavier, 2009].

O limite do desenvolvimento tecnológico e de conhecimento da exploração de petróleo em águas profundas é proporcional à distância entre a plataforma flutuante e o poço de extração no fundo do mar.

Conforme aumentam as profundidades das reservas de petróleo, as linhas flexíveis sofrem maior solicitação mecânica. Os custos de manutenção e instalação estão intimamente relacionados com essa solicitação mecânica. Diante desse cenário, é de fundamental importância o conhecimento minucioso dos materiais empregados nessa atividade.

2.1.3 Detalhamento das camadas do duto de camadas não aderentes

2.1.3.1 Carcaça intertravada

Fica localizada na parte mais interna do tubo flexível, possuindo alta flexibilidade devido a configuração geométrica adotada para sua construção, na qual as fitas são

intertravadas com pequeno passo (grande ângulo de enrolamento] e com folga no intertravamento [Xavier, 2009 e Moussa, 2006]. Conforme a Figura 6, a camada consiste em elementos perfilados em forma de “S” de aço inoxidável enrolada na forma de uma hélice com pequeno passo com intertravamento não estanque. a camada mais interna do duto e têm como principal objetivo resistir aos esforços de compressão diametral provocados durante o lançamento da linha, à pressão externa, prevenindo também, o colapso do duto provocado pelas camadas helicoidais quando submetidos a uma carga de tração ou quando há uma queda de pressão interna, ou seja, sustentar as cargas radiais.



Figura 6: Seção transversal da carcaça intertravada [Silva, 2006].

O intertravamento da fita de aço é fundamental para garantir a resistência ao colapso por pressão externa, porém restringe as deformações axiais e a curvatura do duto flexível em função do pequeno deslocamento permitido pelas folgas entre as fitas da camada [Silva, 2006], a Figura 7 mostra o aspecto interno da carcaça intertravada.



Figura 7: Aspecto interno da carcaça intertravada em tubo flexível [Silva 2006].

Os aços empregados em sua construção devem ter boa resistência à corrosão por hidrocarbonetos e água. Segundo a API RP 17B, 2002, os materiais utilizados podem ser:

- Aços carbono.
- Aços inoxidáveis ferríticos (AISI 409 e AISI 430).
- Aços inoxidáveis austeníticos (AISI 304, 304L, 316 e 316L).
- Aços inoxidáveis Duplex (UNS S31830).
- Aços-liga com alto teor de níquel (N08825).

A seleção do tipo de aço para a carcaça intertravada está relacionada à composição do fluido interno (presença de hidrocarbonetos, agentes corrosivos, gases, partículas sólidas, etc) e os carregamentos a que serão submetidas esta camada. A medida que o meio torna-se mais agressivo, o material a ser adequado vai de um Aço carbono a um com alto teor de níquel [API 17B].

2.1.3.2 Barreira à pressão interna.

É uma camada plástica, homogênea, extrudada, esbelta e composta por materiais elásticos, localiza-se sobre a carcaça intertravada. Tem como objetivo principal garantir a estanqueidade dos fluidos transportados pelo duto flexível e permitir uma distribuição de pressão uniforme sobre a carcaça intertravada e camada zeta. Reduz o atrito entre a carcaça intertravada e a camada zeta, também é responsável pela resistência à corrosão e aos ataques químicos dos fluidos conduzidos. Precisam ser quimicamente e termicamente compatíveis à natureza do fluido transportado [Silva 2006].

Geralmente utiliza-se nylon 11 ou poliamida (PA 11) em sua fabricação. Também pode ser feito de (HDPE) em condições de serviço menos severas. Nos casos em que a temperatura de serviço ultrapassar a suportada pelo PA 11, utiliza-se o Poli fluoreto de vinilideno (PVDF) [Xavier, 2009].

2.1.3.3 Armadura de pressão

Esta camada foi desenvolvida com o intuito de dar auxílio a camada plástica interna a manter a sua integridade estrutural sustentando a pressão interna, ou seja, resistir à expansão radial da camada plástica. Também auxilia nos efeitos de esmagamento provocados pelas armaduras de tração quando submetidas ao carregamento axial [API 17B]. São constituídas por reforçadores na forma de uma hélice com pequeno passo de assentamento. Nos locais onde as condições de pressão interna do duto são baixas, esta camada torna-se desnecessária, pois sua atividade funcional pode ser substituída pelas armaduras de tração. É considerada uma camada opcional, pois é fundamental apenas em regiões onde a pressão interna do duto é muito alta [Silva, 2006]. A Figura 8 mostra seções típicas utilizadas na armadura de pressão.

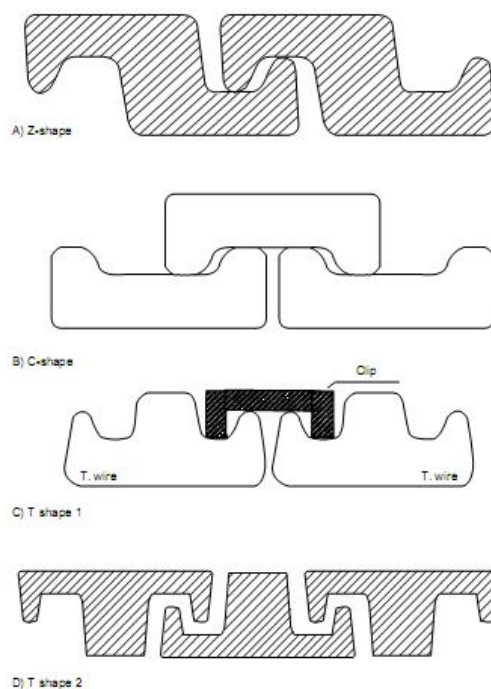


Figura 8: Seções típicas da armadura de pressão⁷.

Existem outras configurações de riser flexível em que empregadas em condições mais severas em que é utilizada uma segunda armadura de pressão para que sejam diminuídos os esforços nas camadas contíguas [API 17B].

2.1.3.4 Armadura de tração

A armadura de tração consiste em um par de camadas, geralmente duas, enroladas ao redor das camadas mais internas. As tiras ficam dispostas de maneira que as duas camadas tenham sentidos opostos como mostra a Figura 9.



Figura 9: Detalhe das camadas de armadura de tração posicionadas em sentidos opostos [Bueno, 2010].

Tipicamente, a camada mais interna chama-se armadura interna de tração, a segunda camada, mais externa, chama-se armadura externa de tração.

A função dessas armaduras é resistir às cargas axiais e à pressão interna, também conferem à linha flexível, rigidez à torção. Por ter um ângulo de assentamento

relativamente baixo, entre 20° e 55° , a armadura de tração não interfere na alta flexibilidade que caracteriza o riser, pois as tiras podem deslocar-se quando é imposta alguma flexão [Xavier, 2009].

O balanço entre a rigidez radial e axial da armadura de tração é determinada pelo ângulo de assentamento destas camadas. Nas situações em que os níveis de solicitação é pouco severa e o ângulo de assentamento é da ordem de 55° . Além do nível de solicitação, a natureza estática ou dinâmica do serviço e a presença de camadas de reforço à pressão influenciam no ângulo da armadura de tração.

A Figura 10 mostra mais detalhadamente a disposição de cada uma das camadas de um riser flexível de camadas não aderentes.

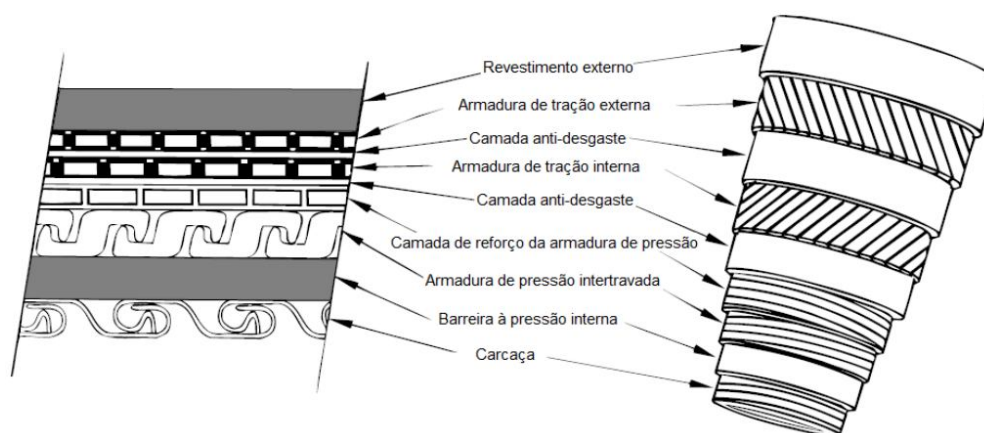


Figura 10: Representação detalhada de um riser de camadas não aderentes [API 17B].

Mais de 5% das tiras de armadura de tração rompe-se em alguma das duas camadas, isso motivou a escolha desse componente como tema de estudo deste trabalho. Vários são os modos de falha da armadura de tração, a Tabela 2 enumera os mecanismos de falha das armaduras de tração de um duto flexível de camadas não-aderentes segundo API RP 17B.

Tabela 2: Relação entre defeitos conseqüências e possíveis causas de falhas em armaduras de tração.

Defeito	Conseqüência	Possíveis causas
Ruptura múltipla ou individual dos arames.	Redução da capacidade estrutural do duto ou ruptura do duto flexível	<ol style="list-style-type: none"> 1. Corrosão 2. Fissuração por ação de sulfetos (SSC). 3. Fissuração por ação de hidrogênio (HIC). 4. Tração ou pressão excessivas. 5. Desgaste entre arames. 6. Fadiga por fretagem. 7. Fadiga. 8. Formação de nós. 9. Defeito de fabricação. 10. Impacto acidental.
Birdcaging ou Agrupamento	Redução da resistência a tração	<ol style="list-style-type: none"> 1. Torção excessiva. 2. Compressão
Formação de laços (kinking)	Redução da resistência a tração	<ol style="list-style-type: none"> 1. Impacto lateral. 2. Contato pontual. 3. Erro na instalação. 4. Defeito de fabricação
Corrosão	Ruptura da camada	Fluidos, interno e ou externo Agressivos

2.2 Fadiga

Falhas mecânicas causam inúmeros transtornos e altas perdas financeiras. Mesmo considerando o grande número de projetos de componente e estruturas bem sucedidos em relação aos falhos, as perdas são muito altas. Ressalta-se que envolvem uma complexa interação entre nível de carregamento, tempo e ambiente. O ambiente é um fator que considera temperatura, corrosão e movimentos relativos entre os fluidos e o material envolvido [Stephens ET AL., 2001].

Segundo Dieter, existem três maneiras de falha de um componente: deformação elástica excessiva, deformação plástica excessiva e fratura. Estes três modos de falha contemplam aspectos físicos da análise de falha.

A maior parte das fraturas ocorre devido à fadiga [Dieter, 1988]. Falhas por fadiga ocorrem em componentes submetidos a carregamentos alternados ou flutuantes [Shigley, 2006; Stephens ET AL., 2001; ASM vol. 11, 2002; ASM vol. 19, 1996; Dieter, 1988].

Desde meados 1800, têm sido registradas e assim reconhecidas, as falhas por fadiga [Shigley, 2006; ASM vol. 11, 2002; ASM vol. 19, 1996]. Inicialmente, foram verificadas em pontes e rodas de trem [ASM vol. 19, 1996]. O termo “fadiga” é utilizado, pois este tipo falha ocorre após um longo período de tempo, em que são impostas ao componente, repetidos ciclos de tensão mecânica ou deformação. Estima-se que mais de 90% da falhas em componentes metálicos deve-se à fadiga [Stephens ET AL., 2001; Calliter, 2007; Dieter, 1988]. Além dos metais, polímeros e cerâmicos (exceto o vidro) estão sujeitos a esse tipo de falha. Quase sempre, as falhas por fadiga são catastróficas de difícil detecção e ocorrem repentinamente.

Castro e Meggiolaro, 2002, falam sobre a história da fadiga, que é colocada resumidamente a seguir:

- 1829 – Albert (Alemanha): Faz os primeiros registros de falhas por cargas repetidas;
- 1839 – Poncelet (França): Cria o termo fadiga;

- 1843 – Rankine (Grã Bretanha): Abre discussões sobre o efeito dos cantos vivos em componentes sujeitos a carregamentos dinâmicos;
- 1849 – McConnell (G.B.): Fez estudos em falhas de eixos rodoviários;
- 1864 – Fairbairn (G.B.): Com o intuito de projetar pontes metálicas, realizou testes de fadiga em escala real.
- 1858 – Wöhler (AI): É considerado o pioneiro no estudo da fadiga, realizando experimentos que até hoje influenciam os estudos de fadiga. Entre eles: projetou e construiu várias máquinas para testar corpos de prova (CP) em vez de peças, utilizou CP's de flexão rotativa para levantar curvas S-N, fez testes de tração e torção, descobriu que a vida à fadiga era relacionada com o número de ciclos da carga e dependia muito de $\Delta\sigma$ e do efeito de entalhes, identificou o limite de fadiga e as tensões residuais, chegou até a medir cargas reais de serviço;
- 1874 – Gerber (AI): Propôs métodos de projeto à fadiga e estudou os efeitos da carga média;
- 1886 – Baushinger (AI): Descobriu os laços da histerese elásto-plástica e mediu de formações com uma precisão de 1 $\mu\text{m}/\text{m}$, precisão surpreendente para a época;
- 1898 – Kirsh (AI): Fez o primeiro cálculo analítico do campo de tensões e do fator de concentração de tensões K_t numa placa infinita tracionada com um furo circular;
- 1899 – Goodman (G.B.): Estudou os efeitos da carga média e propôs regras de projeto à fadiga;
- 1903 – Ewing & Humfrey (G.B.): Deram início à fractografia usando a microscopia na análise de falhas;
- 1912 – Bragg (G.B.): Descobriu a difração de Raio-X, provando que os metais são cristalinos;
- 1913 - Inglis (G.B.): Calculou o K_t de um furo elíptico numa placa infinita tracionada e provou a necessidade da análise de tensões locais, especialmente em fadiga;

- 1920 – Griffith (G.B.): Mostrou que apesar das tensões na ponta da trinca serem muito altas, elas não eram suficientes para propagá-la, e calculou a energia necessária para o avanço da trinca, dando início à Mecânica da Fratura;
- 1927 – Palmgren (Suécia): Introduziu o acúmulo de dano sob carga complexa;
- 1934 – Taylor, Orowan (G.B.), Polanyi (Polônia): Postularam a existência das discordâncias, fazendo isso de maneira independente;
- 1936 – Gough (G.B.): Usando difração de Raio-X, estudou o deslizamento cíclico em redes cristalinas;
- 1955 – Coffin, Manson (E.U.): Deram início ao método ϵ -N de projeto de iniciação à uma trinca por fadiga;
- 1957 – Irwin (E.U.): Introduziu o fator de intensidade de tensões K_t , introduzindo a mecânica da fratura moderna;
- 1961 – Paris (E.U.): Provou que a propagação de trincas por fadiga é controlada por ΔK , isso permitiu a estimativa da vida residual de componentes trincados;
- 1968 – Elber (Austrália): Descobriu o fechamento das trincas de fadiga.

2.2.1 Carregamento dinâmico

O carregamento dinâmico envolve a relação entre a tensão aplicada e o tempo. Em ambientes marítimos, os movimentos das correntes marítimas e das ondas são exemplos de elementos que aplicam carregamento dinâmico às estruturas das plataformas. A Figura 11 traz uma ilustração que exemplifica o carregamento dinâmico.

No eixo das ordenadas estão colocadas as solicitações de tração e compressão. No eixo das abscissas é colocado o tempo. A Figura 11 também introduz algumas variáveis para que possa ser parametrizado o carregamento dinâmico. A tensão média (σ_m) é definida como a média entre a tensão máxima ($\sigma_{m\acute{a}x}$) e a tensão mínima ($\sigma_{m\acute{i}n}$). A curva alterna-se com referência na tensão média. A equação 1 define a relação entre esses três parâmetros.

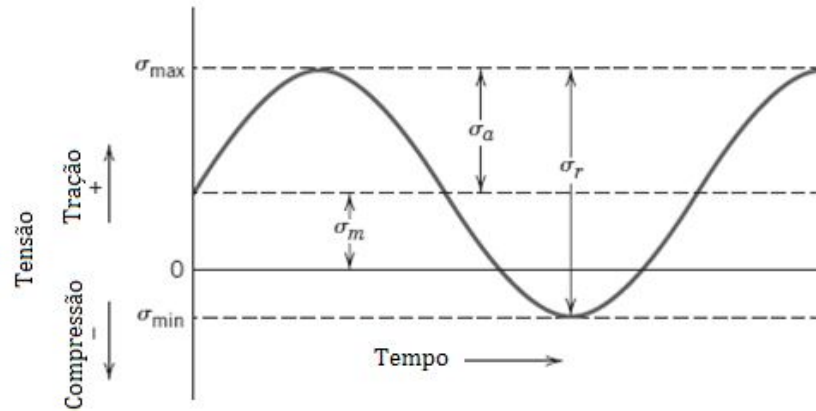


Figura 11: Relação entre solitação mecânica e tempo em carregamento cíclico. [Callister, 2007].

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \text{Equação 1}$$

Outro parâmetro importante é a variação da tensão (σ_r), que é a diferença entre a tensão máxima e a tensão mínima.

$$\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad \text{Equação 2}$$

A amplitude de tensão (σ_a) é a metade da variação total representada por:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma - (-\sigma)}{2} \quad \text{Equação 3}$$

Também é importante a razão de fadiga (R) que é a razão entre a tensão máxima e mínima:

$$R = \frac{\sigma_{\text{máx}}}{\sigma_{\text{mín}}} \quad \text{Equação 4}$$

Por convenção, utiliza-se a tração com sinal positivo e a compressão com sinal negativo [Callister, 2007].

2.2.2 Iniciação e propagação da trinca

Segundo Castro e Meggiolaro [2002], o trincamento que consiste na propagação paulatina e estável de uma trinca por fadiga é um fenômeno causado pela aplicação repetida de cargas alternadas.

A maior amplitude de $\Delta\sigma$ das tensões alternadas ou a maior amplitude de $\Delta\varepsilon$ das deformações correspondentes, controlam a iniciação das trincas. Isto pode ocorrer mesmo que a estrutura esteja inicialmente isenta de defeitos. Sendo assim, as trincas de fadiga iniciam no ponto mais solicitado da estrutura, quase sempre na raiz de um entalhe que concentra as tensões que lá atuam.

O mecanismo de iniciação das trincas por fadiga nos metais consiste no movimento das discordâncias, Figura 12, numa direção em geral paralela à máxima tensão cisalhante $\tau_{\text{máx}}$ atuante no ponto crítico da peça.

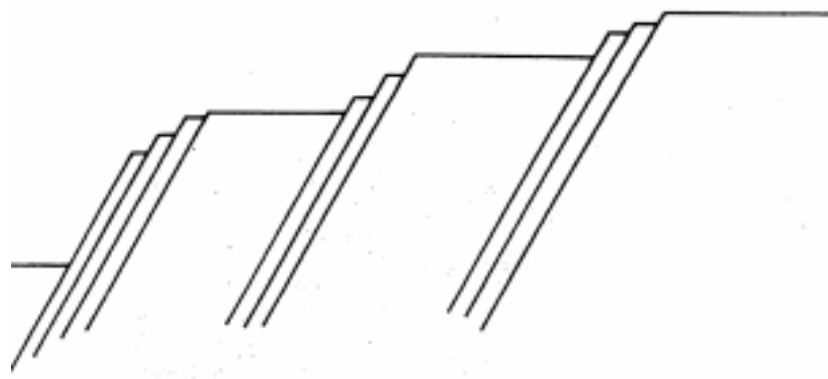


Figura 12: Bandas de deslizamento em um carregamento estático [Stephens et al, 2001].

O movimento cíclico das discordâncias tende a agrupá-las em células, as quais formam com o decorrer dos ciclos, bandas de deslizamento na superfície da peça. Como mostra a Figura 13, essas bandas de deslizamento podem ser consideradas como defeitos e, à medida que vão crescendo, transformam-se em micro intrusões e extrusões, com ocorre a transformação de sítios iniciais para micro trincas de fadiga [Stephens et al, 2001].

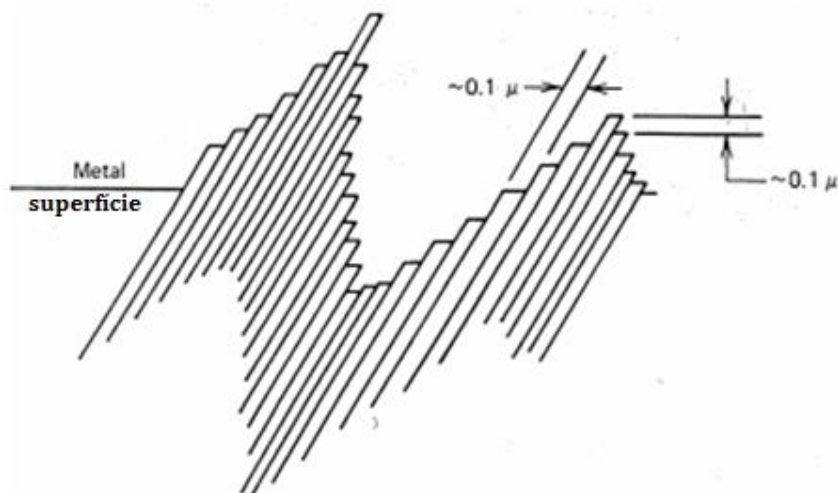


Figura 13: Planos de intrusão e extrusão desenvolvidos na superfície [Stephens et al 2001].

A Figura 14, representa uma visão mais geral do fenômeno de extrusão e intrusão provenientes de carregamento cíclicos, as trincas podem nuclear de diferentes pontos.

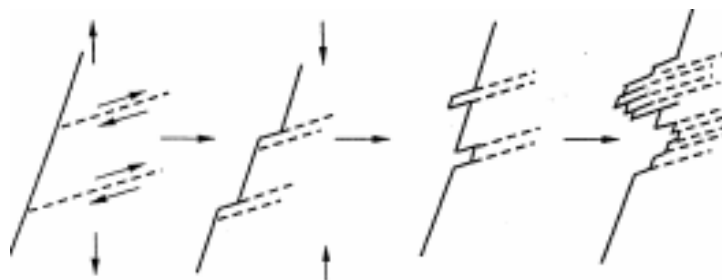


Figura 14: Representação do desenvolvimento dos planos de intrusão e extrusão [Stephens et al 2001].

A Figura 15 mostra a superfície de fratura de um parafuso submetido à flexão através de carregamento dinâmico. Na região A está o ponto de iniciação da trinca. Na região B ocorreu a propagação da trinca até o rompimento na região C.

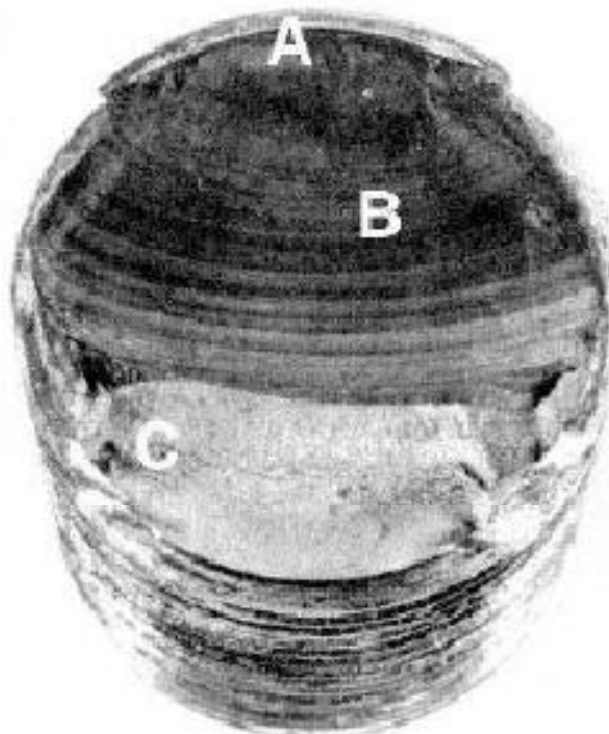


Figura 15: Superfície de fadiga de um parafuso [Shigley, 2006].

A primeira vista, a falha por fadiga tem uma aparência similar à fratura frágil, assim como a fratura frágil, suas superfícies são perpendiculares à direção da carga aplicada. Porém, observando com mais cuidado pode-se perceber as três regiões encontradas na superfície da falha.

2.2.3 Curvas S-N

Existem três abordagens de estudo do comportamento em fadiga de materiais [ASM Metals HandBook Vol 11 2000]:

- S-N: Registra-se o número de ciclos até a falha aplicando-se um nível de tensões constante ou variável
- ϵ -N: São aplicadas deformações elasto-plásticas cíclicas atuantes no ponto crítico da peça correlacionando com a vida do material testado;
- da/dN: Mecânica da fratura aplicada a fadiga é utilizado para prever vida de componentes com uma trinca conhecidas [Strohaecker, 2009].

O método S-N consiste na construção de uma curva, mostrada na Figura 16, que é plotada em termos de Tensão aplicada (S) por número de ciclos (N). Quase sempre os eixos do gráfico são colocados em escala logarítmica [Dieter 1988].

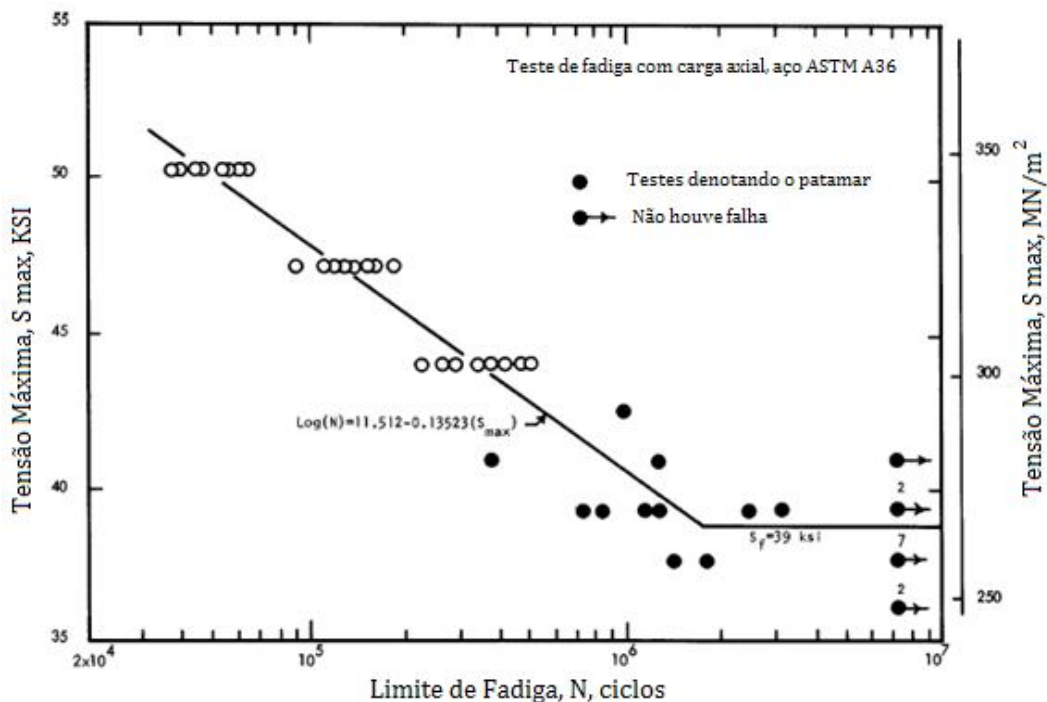


Figura 16: Curva de fadiga levantada pelo método S-N [ASTM E468 1998].

O eixo das coordenadas, que está em ordem logarítmica, indica o número de ciclos até a falha. O eixo das abscissas mostra a tensão máxima que foi aplicada ao corpo de prova. A distribuição dos pontos no gráfico sugere que existe uma tensão máxima em que a vida é infinita. Ou seja, se for colocada uma linha de tendência, essa linha terá um comportamento assintótico com um limite inferior, esse limite inferior é considerado o limite de fadiga [ASTM E468 1998; ASTM E 466 1996].

O método S-N não quantifica explicitamente nenhum dos efeitos plásticos que podem atuar nos pontos críticos da estrutura, nem reconhece a presença de trincas, logo, só é apropriado para prever a iniciação de trincas por fadiga em vidas longas. Mas como a maioria das estruturas de engenharia é projetada para trabalhar sob tensões elásticas, o S-N é o mais utilizado na prática [Stephens et al 2001].

Apesar de suas limitações o método S-N tem várias vantagens, algumas delas listadas a seguir [Castro e Meggiolaro 2002]:

É baseado numa análise linear elástica de tensões, preservando o princípio das superposições;

- É computacionalmente muito mais simples e rápido que o método ϵ -N, que deve ser usado quando os efeitos plásticos cíclicos do ponto crítico não são desprezíveis;
- Conta com um vasto banco de dados sobre os efeitos quantitativos dos diversos parâmetros que podem afetar a iniciação da trinca;
- Como é utilizado desde a segunda metade do século XIX, há uma grande experiência acumulada com seu uso em casos reais de projeto;
- Pode ser sintetizado numa única equação facilmente automatizável, a qual engloba todas as informações necessárias ao dimensionamento mecânico.

Como regra geral, o método S-N de dimensionamento à iniciação de trinca por fadiga só deve ser aplicado quando as máximas tensões atuantes nos pontos críticos da peça forem menores que a resistência ao escoamento cíclico do seu material, pois a análise de tensões usada neste método é linear elástica [Castro e Meggiolaro 2002].

2.2.4 Fatores que afetam a vida em fadiga

A vida em fadiga é um fenômeno estatístico [Dieter, 1988]. No entanto, sua tendência pode ser modificada por fatores controláveis [Shigley, 2006; Stephens et al 2001], entre esses efeitos estão:

- Microestrutura;
- Acabamento superficial;
- Tipo de carregamento;
- Temperatura;
- Espessura.

O presente trabalho visa avaliar do efeito da espessura na vida em fadiga.

2.2.5 Efeito da espessura na vida em fadiga

Considerando um carregamento de flexão, se o diâmetro ou espessura do corpo de prova é menor que 10 mm, o comportamento da curva S-N é praticamente independente do diâmetro ou espessura. Para tamanhos maiores a vida em fadiga diminui [Stephens et al, 2001]. Conforme a espessura aumenta, se aproximando de 50 mm, o limite de fadiga diminui para 70 a 80% daquele verificado em corpos de prova com menos de 10 mm. Quanto maior a espessura da amostra em flexão, menor é o gradiente de tensão. ao longo do sólido. Isso acarreta uma tensão média maior na região mais solicitada. A tensão média aplicada, bem como a tensão máxima, governa a vida em fadiga do material. Para carregamentos axiais, o gradiente de tensões não existe e a tensão máxima e média têm a mesma magnitude. Isso resulta em um menor efeito da espessura do que no caso da flexão. Na flexão e carregamento axial amostras maiores têm maior probabilidade de descontinuidades microestruturais, o que contribui para diminuir a resistência à fadiga [Stephens et al, 2001].

Shigley considerou relevante o efeito da espessura para amostras com espessura entre 2,79 e 11 mm. Na Equação 5 é mostrada a relação entre o fator de espessura (K_b) e a espessura (d).

$$K_b = 0,879 d^{-0,107} \text{Equação 5}$$

O autor define um fator para espessuras ou diâmetros em diferentes intervalos. Sendo que foi demonstrada uma relação que define um fator que afeta o limite de fadiga para componentes para espessuras de interesse neste trabalho. O autor também deixa registrado que os dados foram obtidos a partir de um aço SAE 4340 obtido em forno elétrico aplicado à construção aeronáutica.

O fator é aplicado considerando que o limite de fadiga é a metade da tensão máxima. Tal valor multiplicado pelo fator calculado resulta no limite de fadiga que considera o efeito da espessura.

Kihl e Sarkani, [1998] fizeram estudos em chapas soldadas cruciformes com chapas de HSLA-80 de várias espessuras, que são 25,4, 19,05, 11,11 e 6,35 mm. Foram submetidos fadiga por tração para avaliar o efeito da espessura na Resistência à Fadiga. Os testes mostraram de maneira consistente que as chapas com menores espessuras apresentaram maior vida em fadiga que as mais espessas. A Figura 17 mostra os resultados dos testes realizados. As variações no comportamento em fadiga verificada nos testes foram atribuídas à concentração de tensões devido à geometria das juntas e tensões residuais decorrentes da solda.

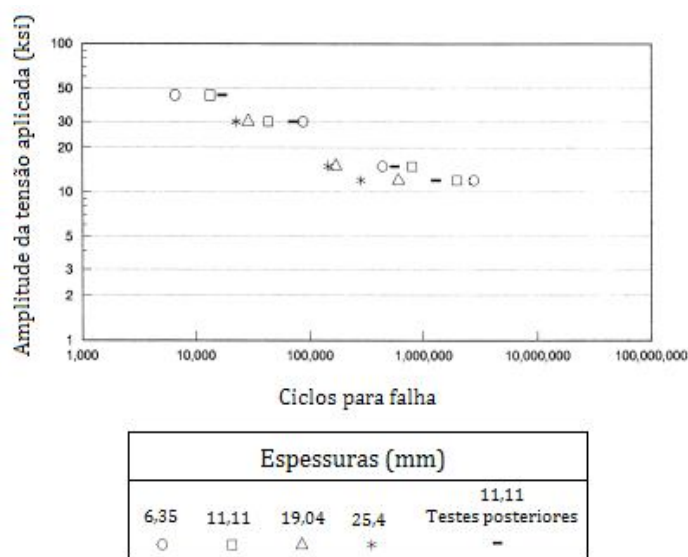


Figura 17: Resultados de fadiga em soldas para diferentes espessuras, [Kihl e Sarkani, 1998].

Citando outro exemplo de estudo realizado no campo da fadiga e como ela é influenciada pela espessura, B. Holper, et al [2002], avaliaram, entre outros, o efeito da espessura na taxa de crescimento de trincas em ligas de alumínio 2024 e 7075. Para tanto, foram construídas curvas de da/dN vs ΔK dos respectivos materiais em diferentes espessuras. Segundo os autores, a diferença no comportamento para diferentes espessuras deve-se principalmente ao efeito de fechamento de trinca que ocorre na superfície das amostras. As Figuras 18 a 20 mostram os gráficos de da/dN vs ΔK para os materiais e espessuras estudadas.

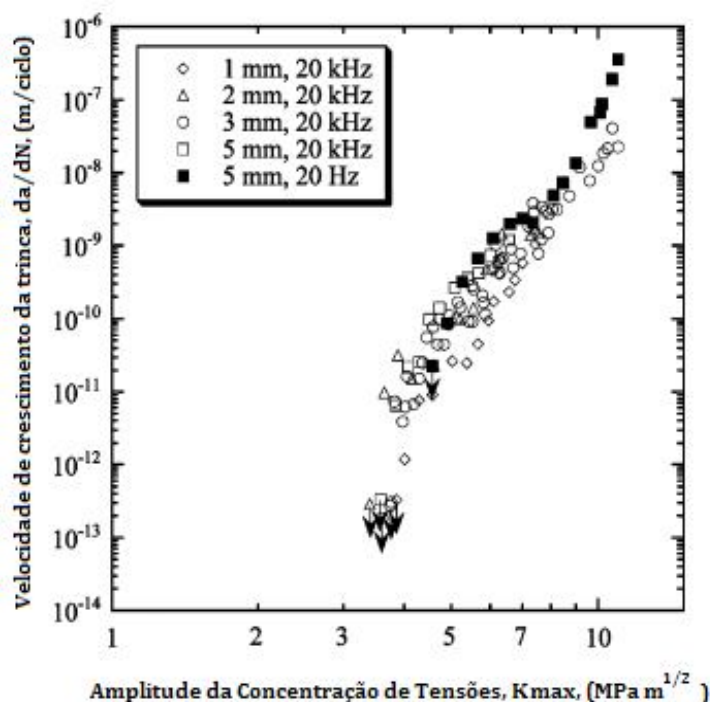


Figura 18: Curvas da/dN vs ΔK para alumínio 2024 em testes realizados no vácuo, [B. Holper, et al, 2002].

M. Makonnen, [2000], desenvolveu uma função estatística que estima com erro de -3 a 6% o limite de fadiga de um aço 34CrNiMo8. Em seu trabalho, faz considerações sobre os defeitos microscópicos prévios que os materiais apresentam e o fator probabilístico que está ligado à área superficial, que por sua vez está relacionada com a geometria da amostra. Parte-se do princípio de que quanto maior a área superficial, maior a quantidade e variedade de tamanho de defeitos.

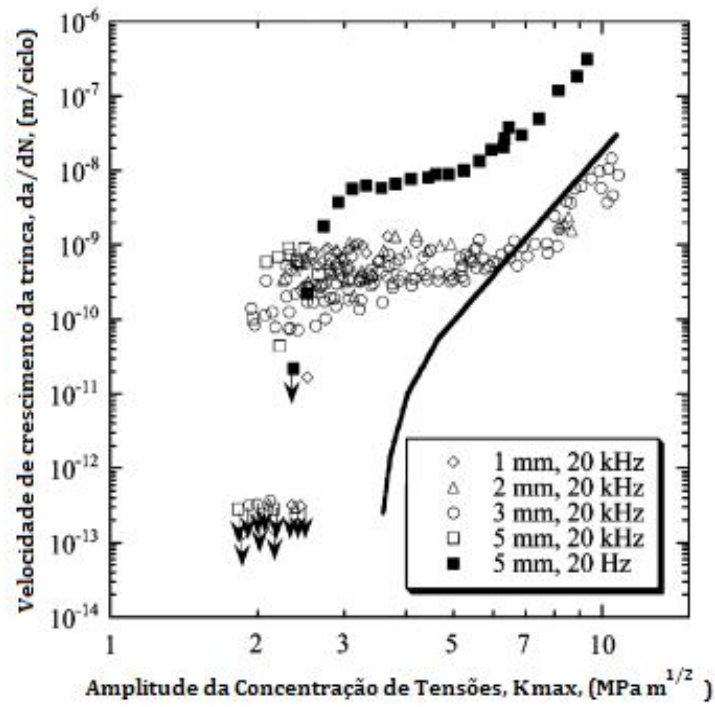


Figura 19: Curvas da/dN vs ΔK para alumínio 2024 em testes realizados ao ar, [B. Holper, ET AL, 2002]

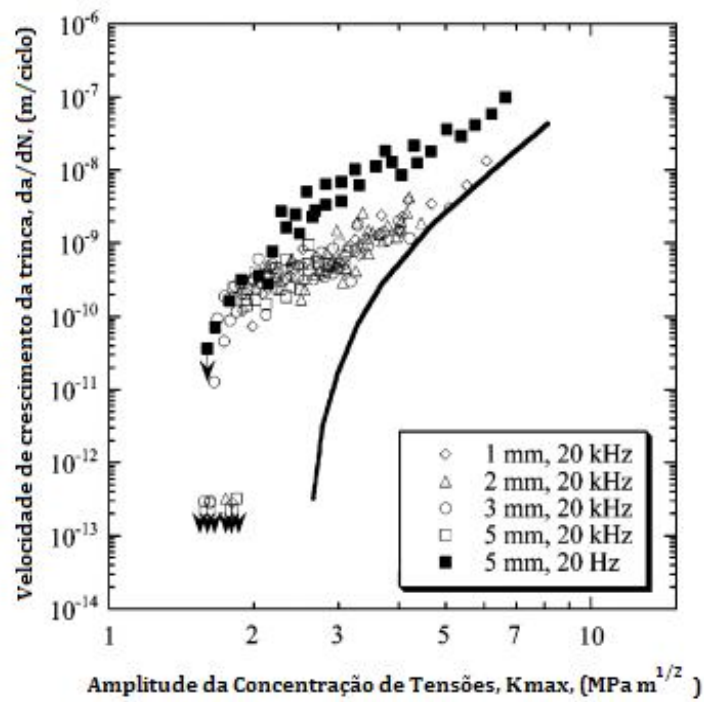


Figura 20: Curvas da/dN vs ΔK para alumínio 7075 em testes realizados ao ar, [B. Holper, ET AL, 2002].

Lund e Byrne, [2000], abordam um experimento traduzido das anotações de Leonardo Da Vinci em que é realizado um teste de resistência em fios de aço que suportam o peso de um cesta que é abastecida com areia. O experimento foi realizado várias vezes com fios de três comprimentos diferentes e mostrou que os fios mais longos rompiam com uma quantidade de areia menor que os fios mais curtos. Nesse artigo, Lund e Byne [2000], assim como M. Makonnen [2000], abordam aspectos estatísticos que modelam a distribuição de defeitos dos materiais, neste caso, dos fios. Por muitos anos os resultados desse experimento foram controversos à Mecânica Clássica, pois ela consideraria apenas a área da seção transversal do fio como fator geométrico relevante, pois a tensão nominal seria a mesma ao longo do comprimento do fio. À partir dessas observações foram consideradas distribuições estatísticas relativas ao tamanho de pequenos defeitos ao longo do fio, o que repercute em variações do seu diâmetro.

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Para maior clareza das ações adotadas na realização deste trabalho, foi elaborado um fluxograma mostrando suas etapas principais. Na Figura 21 abaixo pode ser verificado o fluxograma.

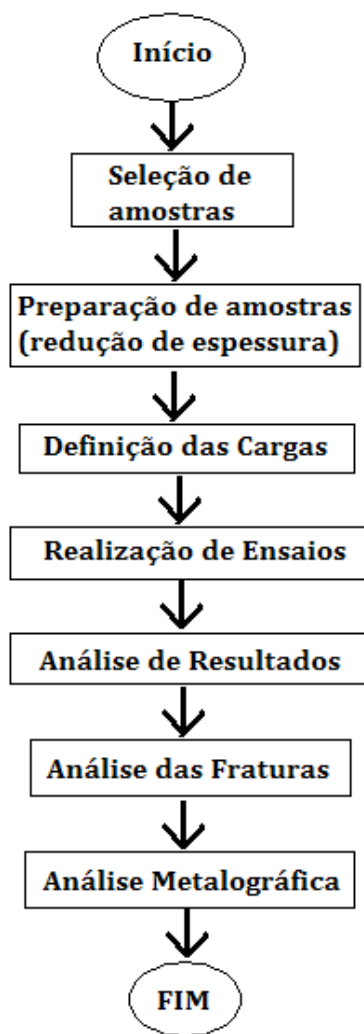


Figura 21: Fluxograma mostrando as etapas do trabalho.

3.1 Seleção de amostras

As amostras foram retiradas de risers que ainda não haviam sido utilizados, ou seja, sem danos acumulados. Cada amostra retirada do componente tinha um fim específico de estudo de um projeto que envolvia várias áreas de conhecimento. Para este trabalho, que foi realizado na sequência e como complemento de outros, foi destinada um arame de 400 mm de comprimento com seção transversal aproximadamente retangular de 15x5 mm.

3.2 Preparação das amostras e definição das cargas

Após a seleção de amostras foi definida uma geometria que respeitasse os seguintes critérios:

- a) Espessura com boa diferença para a original que era de 5 mm;
- b) A tensão foi aplicada por flexão a três pontos, por isso foi estudado um comprimento que permitisse uma distância entre pontos que nos remetesse a uma carga considerável. Com isso, precisão da carga aplicada estaria dentro dos limites do equipamento de ensaio;
- c) Um bom número de amostras fosse utilizado.

3.2.1 Geometria das amostras

O material foi fornecido na forma de arames de seção retangular de 15x5mm em comprimentos 400 mm. Os arames foram cortados em comprimentos nominais de 45 mm, como mostra a Figura 22.

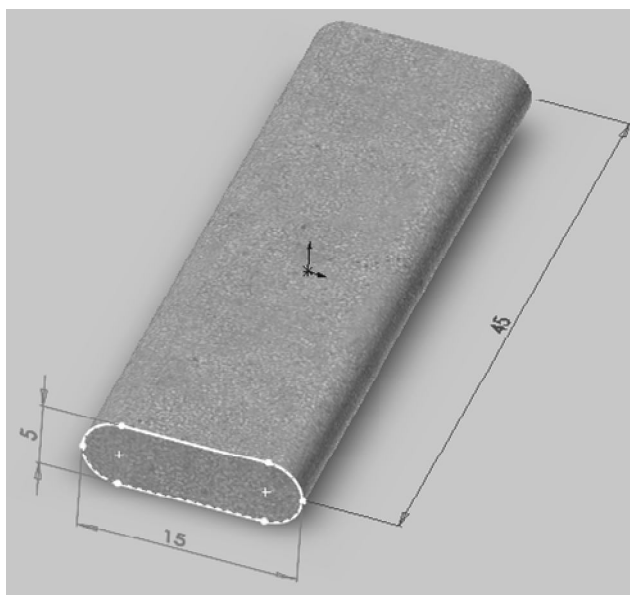


Figura 22: Dimensões em mm do arame da armadura de tração cortado.

Para diminuir a espessura do arame foi utilizado corte por eletroerosão. A espessura nominal pretendida com o corte foi de 2,5mm, que é a metade da espessura original. As dimensões são mostradas na Figura 23.

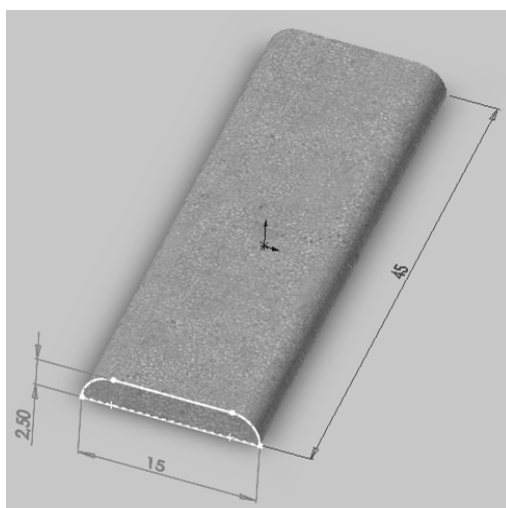


Figura 23: Dimensões em mm da amostra após o corte por eletro erosão.

Oito amostras foram produzidas com as dimensões da figura acima. O conjunto de amostras é mostrado na Figura 24.

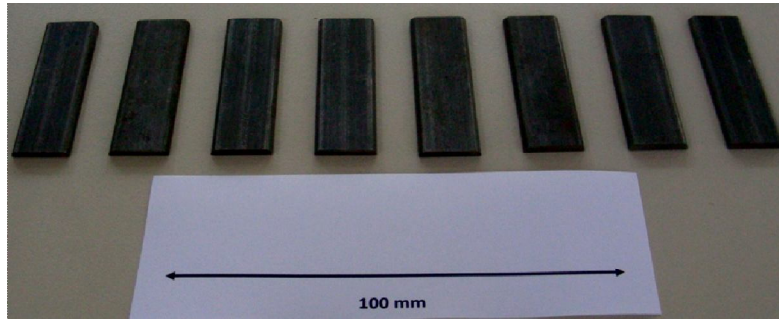


Figura 24: Amostras utilizadas para curva de fadiga.

Após o dimensionamento, as amostras foram submetidas à Fadiga por Flexão em três pontos.

3.2.2 Flexão a três pontos

A curva de fadiga realizada neste trabalho foi obtida por flexão a três pontos. A distância entre pinos (L) foi de 30 mm.

No caso da flexão a três pontos, a tensão máxima é calculada pela Equação 6 [Groehs, 2002]:

$$\sigma = \frac{M Y_m}{I} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

σ : É a tensão aplicada ao corpo de prova.

M: Momento fletor aplicado.

Y_m : É distância entre o centro de massa da figura formada pela seção transversal até a face superior da tira.

I: É o momento de inércia da figura formada seção transversal com relação a um eixo horizontal contido no plano da página que passa no centro de gravidade Figura 25.



Figura 25: Geometria da seção transversal do corpo de prova.

O momento fletor (M) é definido em termos de força (F) e distância entre apoios (L), como na Equação 7.

$$M = \frac{F}{2} \frac{L}{2} = \frac{F L}{4} \quad \text{Equação 7}$$

A distância entre o centro geométrico da figura da seção transversal e a face superior (Y_m) é aproximado pela Equação 8 [Beer e Johnston, 1994].

$$Y_m = \frac{h}{2} \quad \text{Equação 8}$$

A Equação 9 mostra como é calculado o momento de inércia (I) [Beer e Johnston, 1994].

$$I = \frac{b h^3}{12} \quad \text{Equação 9}$$

Realizados todos os algebrismos pertinentes com relações acima e verificando os parâmetros indicados na Equação 6, chegamos na Equação 10, que relaciona:

Força: F

Distância entre apoios: L

B e h: Base e altura da geometria mostrada na Figura 25.

$$\sigma = \frac{3}{2} \frac{F L}{B h^2} \quad \text{Equação 10}$$

A Figura 26 mostra os parâmetros complementares básicos que definem a Equação 10.

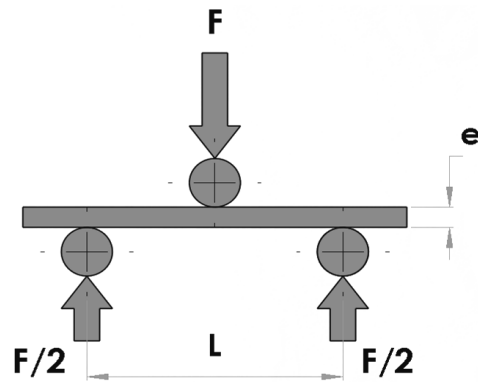


Figura 26: Diagrama de corpo livre para flexão a três pontos.

Foi tomada a precaução de posicionar o corpo de prova de modo que o lado cortado ficasse para cima, dessa maneira foi submetida ao esforço de tração a superfície com acabamento original do arame.

Para realização dos testes foi utilizada uma máquina servo hidráulica marca MTS modelo 858 com capacidade máxima de 25 kN em tração ou compressão. O equipamento é mostrado na Figura 27.



Figura 27: Equipamento servo hidráulico utilizado para realização dos ensaios.

A montagem do ensaio e os dispositivos utilizados para realização podem ser vistos na Figura 28.

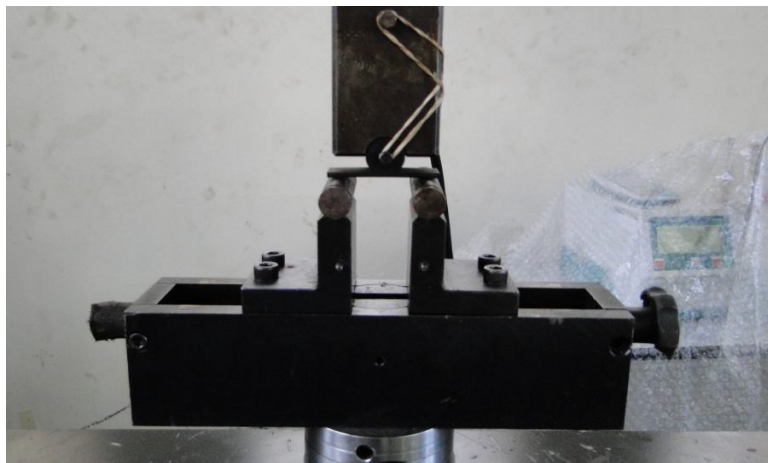


Figura 28: Dispositivos para montagem do ensaio.

3.3 Caracterização do material

O material analisado neste trabalho foi um aço baixa liga com 0,60% de carbono, similar a um SAE 1060. A composição química do material de estudo é mostrada na Tabela 3 juntamente com a composição padrão do SAE 1060 segundo o ASM Heat Treater's Guide Practices and Procedures for Irons and Steels, 1995.

Tabela 3: Comparação das composições químicas do material testado e do aço SAE 1060.

Composição química dos principais elementos (% em peso)				
	C	Mn	P(Max)	S(Max)
SAE-AISI 1060	0,55-0,60	0,60-0,90	0,04	0,05
Medido	0,585	0,845	0,016	0,012

A Figura 29 mostra, em um corte longitudinal, a microestrutura do material no núcleo do arame. A microestrutura é composta de ferrita e perlita bandeada na direção de trefilação.

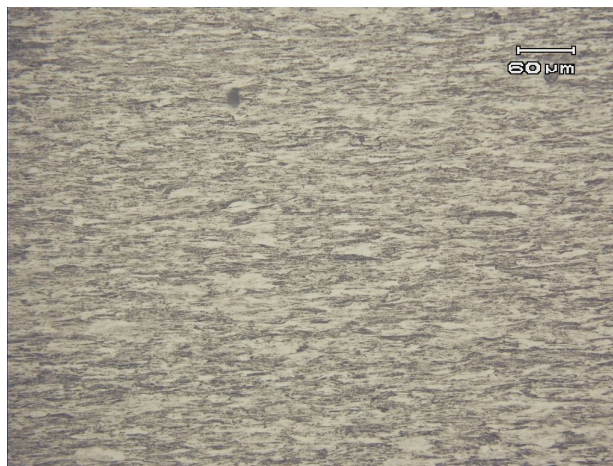


Figura 29: Microestrutura do arame direção longitudinal, 200x.

A Figura 30 mostra a microestrutura do arame na direção transversal. Nessa direção também pode ser visualizada certa deformação.



Figura 30: Metalografia realizada na seção transversal.

A resistência mecânica do material foi avaliada através de três ensaios de tração no material para obtenção das propriedades mecânicas do mesmo. Os testes foram feitos uma máquina de tração modelo INSTRON 5585H com medida de carga e deslocamento.

3.4 Análise da fratura

As amostras que falharam antes dos 2×10^6 ciclos tiveram suas fraturas analisadas para fins investigativos. Os equipamentos utilizados para tais análises foram uma lupa e um microscópio eletrônico de varredura da marca Shimadzu modelo SSX 550 mostrado

Figura 31.



Figura 31: Equipamento utilizado para análise da fratura (Microscópio Eletrônico de Varredura).

4.0 RESULTADOS

4.1 Ensaios de fadiga

O principal produto deste trabalho é a comparação do comportamento em fadiga do material a duas espessuras. Uma delas foi levantada por [Rocha, 2010] em uma das condições estudadas naquele trabalho.

Rocha comparou a vida em fadiga de amostras com espessura original de 5 mm submetidas a diferenciados parâmetros de Shot Peening. Uma das condições estudadas foi sem nenhum tratamento, denominada naquele trabalho como “ao ar”. A curva de fadiga na condição “ao ar” foi utilizada como base de comparação para o presente trabalho que buscou informações relativas à vida em fadiga diante da redução da espessura das amostras para 2,5 mm.

Na Figura 32 foram colocadas as duas curvas sobrepostas para evidenciar o efeito da redução da espessura na vida em fadiga.

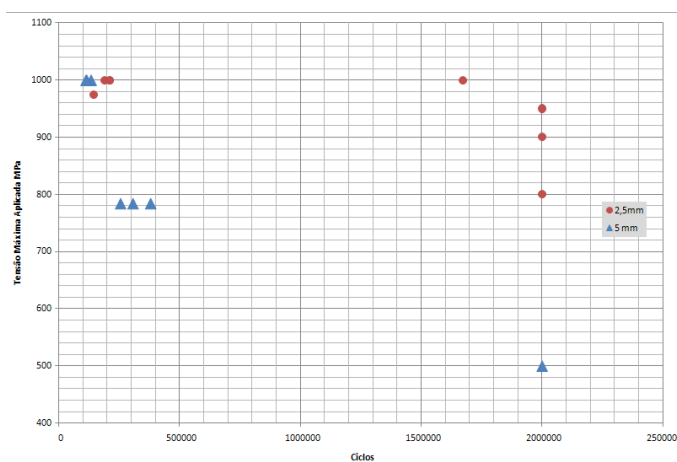


Figura 32: Mostra o confronto dos resultados dos ensaios de fadiga para as espessuras de 2,5 e 5 mm.

Para melhor análise são apresentadas tabelas com os valores de tensão máxima e número de ciclos para a falha. É importante ressaltar que a razão de fadiga utilizada foi de 0,1. Na Tabela 4 são apresentados os dados do ensaio de fadiga para a espessura de 5 mm. Os dados correspondentes à espessura de 2,5 mm estão na Tabela 5.

Tabela 4: Valores das tensões máximas e correspondentes ciclos de ruptura das amostras com 5 mm de espessura.

Ciclos	Tensão máx MPa
2000000	500
2000000	650
379065	785
306173	785
254620	785
132467	1000
114100	1000
111494	1000

Tabela 5: Valores das tensões máximas e correspondentes ciclos de ruptura das amostras com 2,5 mm de espessura.

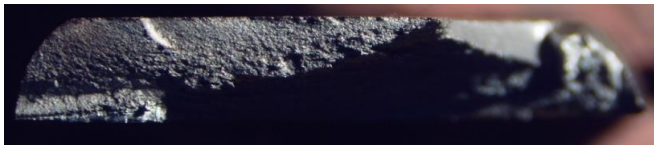
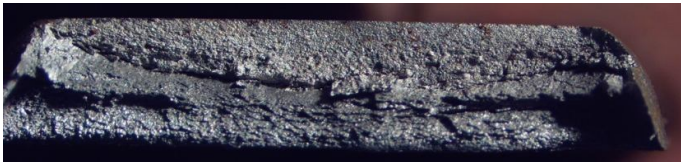
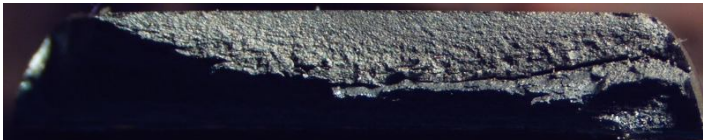
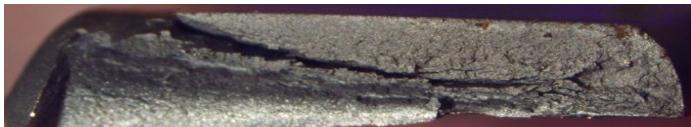
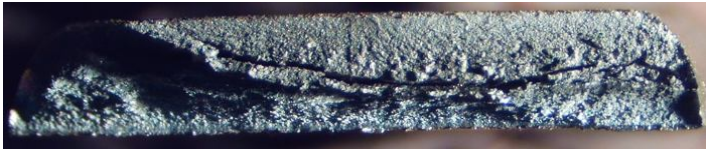
Ciclos	Tensão máx MPa
2000000	800
2000000	900
2000000	950
144000	975
210000	1000
1671555	1000
190033	1000
211800	1000

4.2 Análise das fraturas

4.2.1 Imagens obtidas por lupa

A Tabela 6 mostra as fotos das fraturas obtidas com a lupa, bem como os valores de Tensão máxima aplicada e número de ciclos atingido até a falha.

Tabela 6: Imagens de fraturas obtidas na lupa e respectivos ciclos para falha.

Amostra	Foto da fratura	Tensão máxima aplicada [MPa]	Ciclos
2		1000	210002
4		1000	1671555
5		1000	190033
6		1000	211800
8		975	144000

4.2.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 33 mostra imagem de uma das regiões de nucleação da trinca na amostra 2, no caso em que a trinca nucleou na região próxima ao raio de curvatura.

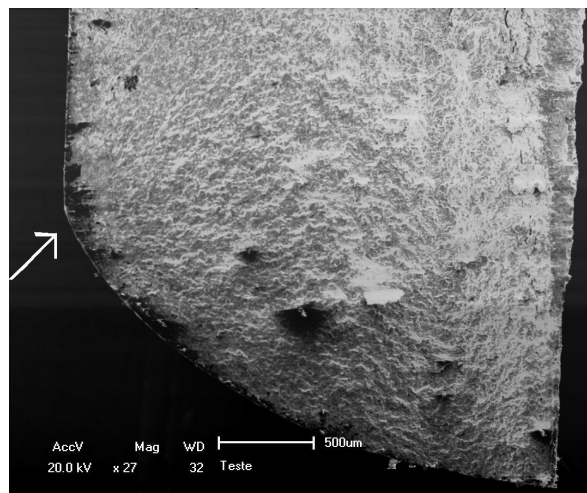


Figura 33: Nucleação da trinca da amostra 2 na região do raio de curvatura.

No caso da amostra 2, pôde ser observada nucleação no raio de curvatura e também na região central da amostra, como mostra a Figura 34.

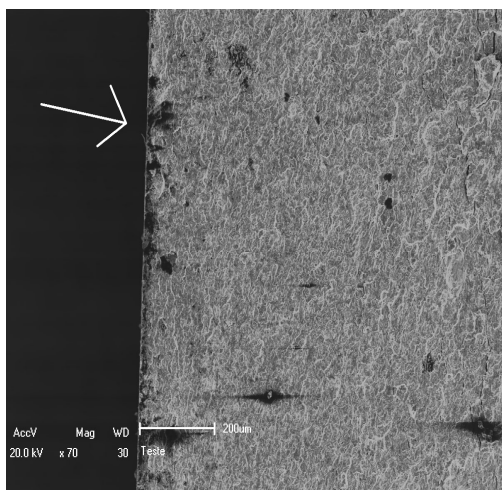


Figura 34: Nucleação de trinca na região central da amostra 2.

A amostra 4 também apresentou nucleação de trinca na região central e junto ao raio de curvatura. As Figuras 35 e 36 apresentam com indicação a região da curvatura e região central respectivamente.



Figura 35: Nucleação de trinca na região do raio amostra 4.

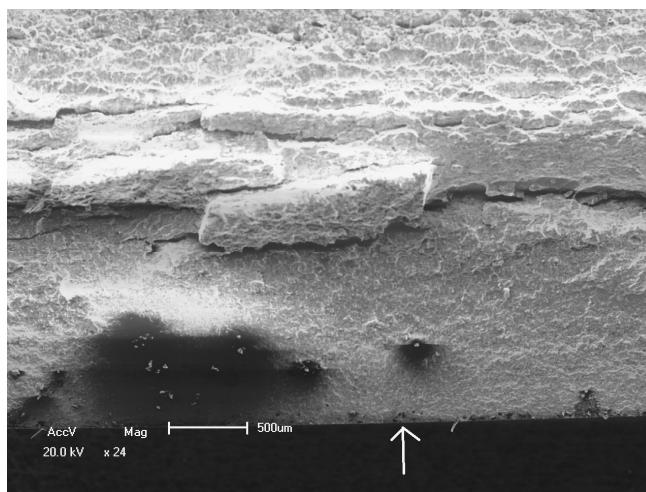


Figura 36: Nucleação de trinca na região central.

A Figura 37 mostra a nucleação da trinca na amostra 5. Neste caso a nucleação ocorreu somente na região central.

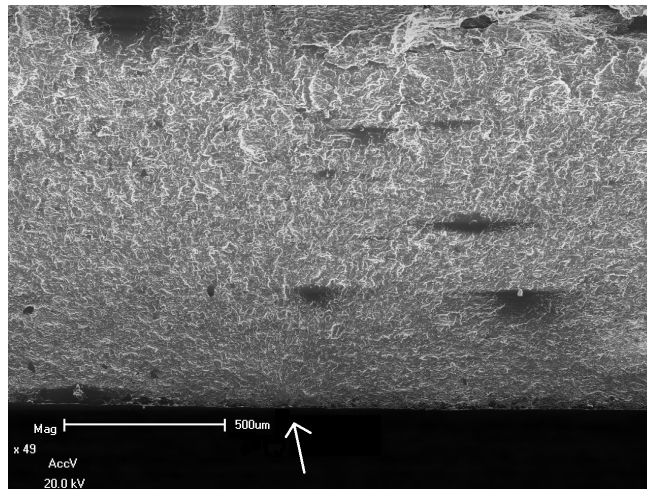


Figura 37: Indicação da região de nucleação de trinca na amostra 5.

A região de nucleação de trinca da amostra 6 está mostrada Figura 38.

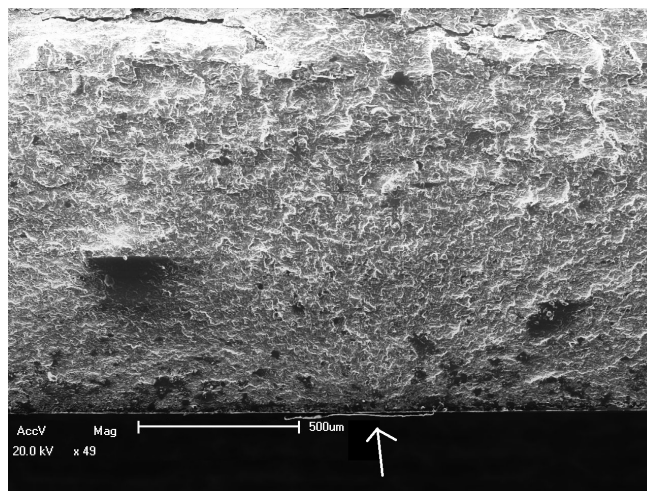


Figura 38: Indicação da região de iniciação de trinca na amostra.

A Figura 39 mostra região de iniciação da trinca na amostra 8.

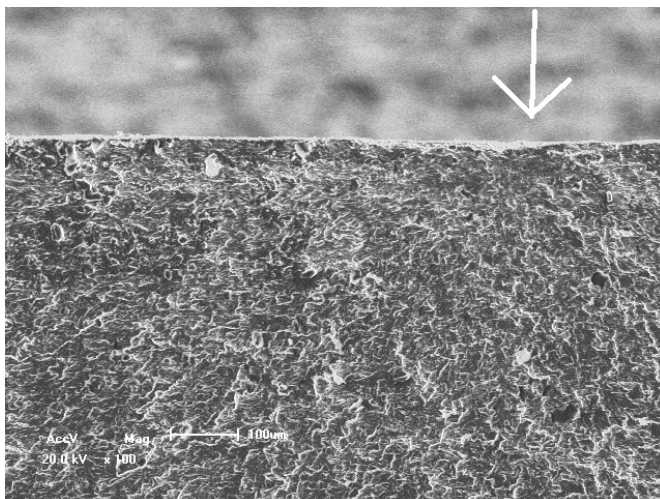


Figura 39: Região de iniciação de trinca da amostra 8.

4.3 Ensaio de tração

A Figura 40 abaixo está mostrando as curvas de Tensão x Deformação obtidas no ensaio de tração para caracterização dos arames.

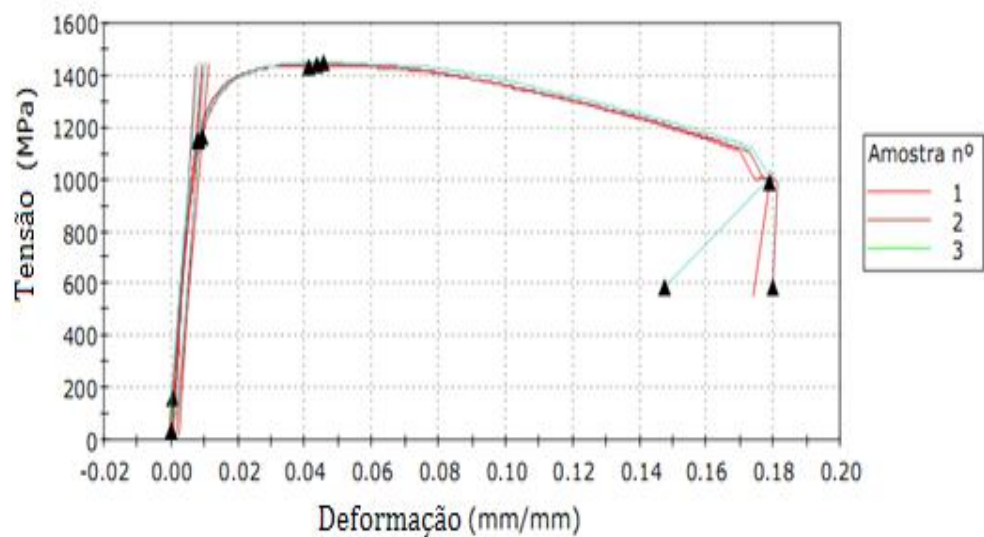


Figura 40: Curvas Tensão x Deformação obtidas dos arames.

Na Tabela 7 apresenta os resultados do ensaio de tração realizado.

Tabela 7: Resultados dos ensaios de tração.

Amostra	Limite de Escoamento [MPa]	Limite de Resistência [MPa]	Alongamento [%] Base medida 75mm
1	1163	1442	10,2
2	1146	1537	9,0
3	1150	1446	9,1
Média	1153	1475	9,4

5.0 DISCUSSÃO

Segundo Stephens [2001], o efeito da espessura (ou do diâmetro) se dá à medida que o seu aumento diminui o gradiente de tensões ao longo do componente. Essa condição leva a um aumento da tensão média no componente. O autor também observa que para espessuras menores que 10 mm essa variação do gradiente de tensões e conseqüentemente da tensão média do componente não afeta a vida em fadiga dos materiais.

Os resultados levam a crer que Stephens [2001] fez observações genéricas se considerarmos a grande variedade de materiais a serem observados com relação ao efeito da espessura na vida em fadiga. Aparentemente, o autor não relevou as características de diferentes materiais e as diferentes condições que cada material pode apresentar.

Schigley [2006] considerou relevante o efeito da espessura para amostras com espessura entre 2,79 e 11 mm. Na Equação 5 é mostrada a relação entre o fator de espessura (K_b) e a espessura (d). O autor mostra um fator que pode ser utilizado para mensurar o efeito da espessura da vida em fadiga considerando que o limite de fadiga seja a metade da tensão máxima quando não há nenhum fator interferindo. Além disso, o autor considera o material analisado e suas condições metalúrgicas. Considerando que o limite de fadiga é a metade da tensão máxima quando nenhum fator o afeta, aplicando-se a Equação 5, obtemos os valores do fator de efeito da espessura (K_b) e tensão limite de fadiga (σ_{lim}) mostrados na Tabela 8.

Tabela 8: Valores estimados do Fator de Efeito da espessura e Limite de Fadiga.

Espessura [mm]	5	2,5
Kb	0,74	0,79
σ_{lim} [MPa]	518	553

Confrontando os limites de fadiga da Tabela 8 com os testes de fadiga do trabalho, Figura 32, pode ser observado que os limites de fadiga que consideram o efeito da espessura são menores que os observados nas curvas levantadas. Essa diferença pode ter sido ocasionada pela diferença entre os materiais e suas condições, já que o material estudado possui um grau de encruamento elevado. Além disso, a direção de crescimento da trinca em relação à direção de orientação dos grãos favorece o aumento da resistência à fadiga.

Quando aplicada a tensão máxima de 1000 MPa, fica estabelecida uma tendência de aumento na Resistência a Fadiga. Isto condiz com os resultados de Kihl e Sarkani [1997], de modo que em seu artigo, que avaliou o comportamento em fadiga de diferentes espessuras de juntas soldadas, o efeito da espessura mostrou-se efetivo e mais pronunciado para os níveis de carregamento mais baixos.

Outra explicação para o aumento na vida em fadiga quando aplicados níveis de solicitação mais baixos, está no estudo realizado por B. Holper. Os autores verificaram que menores espessuras apresentam taxas de crescimento de trinca menores. Para baixos níveis de carregamento a falha das tiras se dá com uma seção remanescente menor, logo, a trinca percorre um caminho maior, e, leva mais ciclos para percorrer esse caminho. Além disso, a transformação de um defeito geométrico em trinca também exigirá quantidade maior de ciclos em função dos níveis de carregamento mais baixos.

As imagens obtidas com a lupa indicam que as regiões próximas ao raio de curvatura são preferências para propagação e em alguns casos, nucleação de trincas. A interseção de duas superfícies é uma região propensa a nucleação de trincas. O efeito dessa geometria pode ser amenizado com raios de concordância como é o caso do componente estudado.

A análise realizada por Rocha 2010 no Microscópio Eletrônico de Varredura não mostrou diferenças ou anomalias em relação às análises das amostras de 5 mm. As

formas de início e propagação das trincas foram semelhantes, havendo também a ocorrência de pontos de nucleação junto ao raio de curvatura das tiras.

Não pode ser descartada a hipótese de que parte da diferença do comportamento em fadiga das duas espessuras testadas deve-se ao fato de que as tiras com 5 mm de espessura foram submetidas a flexão a quatro pontos, e, as tiras com espessura reduzida para 2,5 mm, flexão a três pontos. Do ponto de vista estatístico, abordado por Lund e Byne 2000 e M. Makonnen, 2000, a flexão a quatro pontos submete uma região maior da amostra à tensão nominal, enquanto que a flexão a três pontos submete apenas a região próxima ao pino central a tensão nominal, isso daria mais chances de falha para amostras de flexão a quatro pontos.

6.0 CONCLUSÕES

Fica evidenciado que a modificação da espessura modifica também as características dos componentes com relação à fadiga. Nas condições em que foram conduzidos os testes, verificou-se não apenas a tendência do aumento da resistência à fadiga como também do limite de fadiga. Para tensões de 1000 MPa, as amostras com espessura de 2,5mm apresentaram uma tendência de aumento da Resistência à Fadiga em relação às amostras de 5mm.

Nas amostras com 2,5 mm de espessura, resistência à fadiga aumenta à medida que diminuem os níveis de carregamento. O que pode ser explicado pela maior sensibilidade das amostras com espessura de 5 mm aos defeitos superficiais, sendo que a diminuição do nível de tensões afeta menos essas amostras já que sua geometria favorece uma tensão média maior.

Os pontos de nucleação das trincas localizaram-se na região central, logo abaixo do pino, na superfície submetida ao carregamento trativo, em alguns casos, próximo ao raio de curvatura.

Nenhum defeito macroscópico foi observado junto aos pontos de nucleação das trincas indicando que o processo de trefilação, a que são submetidos os arames, não causou descontinuidades nas seções de tiras testadas.

Os fatores de espessura (K_b), não se mostraram precisos para os testes realizados nas tiras, pois foram desenvolvidos para um outro material com diferentes condições metalúrgicas.

7.0 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Fazer um estudo mais aprofundado dos parâmetros da Equação 5 para o material estudado e suas condições metalúrgicas, visto que o fator da espessura (K_b) de que trata a Equação 5 foi desenvolvido para outro material e outras condições.

Realizar o mesmo estudo com carregamento axial, já que no carregamento axial não apresenta o gradiente de tensões que o carregamento em flexão apresenta. Além disso, a armadura de tração suporta carregamentos de flexão e tração.

Analisar mais profundamente o comportamento em baixos níveis de carregamento, já que essa condição apresentou maior diferença entre as duas condições estudadas.

Verificar a validade do efeito da espessura para outros materiais e tentar relacionar com alguma propriedade mecânica do material.

8.0 BIBLIOGRAFIA

API 17B American Petroleum Institut, 1220 L Street, N. W. Washington D.C. 2005. Recomendad Pratices for Flexible Pipe, 3rd edition, 2002 [Book].

ASM Handbook Failure Analysis and Prevention. - [s.l.] : ASM International, 2002. - Vol. 11.

ASM Handbook Fatigue and Fracture. - [s.l.] : ASM International, 1996. - Vol. 19.

ASM Heat Treater's Guide Practices and Procedures for Irons and Steels.1995 [Book].

B. Holper, ET AL. Near threshold fatigue crack growth in aluminium alloys at low and ultrasonic frequency: Influences of specimen thickness, strain rate, slip behavior and air humidity [Article]. - Vienna : Elsevier, 2002.

BUENO ANTÔNIO FERNANDO BUKERT Avaliação das armaduras de tração de riser flexível durante ensaios axiais de tração e fadiga.. - Tese (Doutorado Análise estrutural)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas e de Materiais, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,Porto Alegre, 2010..

CALLISTER WILLIAN D. Materials Science and Engineering [Book]. - New York : SEVENTH E DITION. John Wiley & Sons, Inc., 2007.

CASTRO JAIME TUPIASSÚ PINHO DE. MEGGIORLARO, MARCO ANTONIO. Fadiga sob Cargas Reais de Serviço [Book]. - 2002.

COSTA Henrique Oliveira da. et al. Caracterização das Propriedades Mecânicas das Camadas de um Riser Flexível [Conference]. - Rio de Janeiro : 2o CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS, 2003.

DIETER GEORGE E Mechanical Metallurgy [Book]. - London : McGraw-Hill, 1988.

Failure Analysis and Prevention, Vol. 11, ASM Handbook, ASM International [Book]. - 2002.

Fatigue and Fracture, Vol 19, ASM Handbook, ASM International, 1996 [Book].

Kihl D. e Sarkani, S. Thickness effects on the fatigue strength of welded steel cruciforms [Journal]. - Washington, DC : International Journal of Fatigue, 1998. - Vol. 19.

Lund J. R. Byrne J. P. Leonardo Da Vinci's Tensile Strength Tests: Implications for the Discovery of Engineering Mechanics [Journal]. - Davis, USA : Overseas Publishers Association, 2000.

Makonen M. Statistical Size Effect in Fatigue Limit of Steel [Journal]. - Hollola, Finland : International Journal of Fatigue, 2000. - Vol. 23.

MARTINS CARLOS. Desenvolvimeto de Metodologias de Inspeção e Monitoramento de Risers Flexíveis através de Técnicas Micromagnéticas de Análise de Tensões. Porto Alegre: 2008. 1. Tese (Doutorado em Ensaios não Destrutivos)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas. - Tese (Doutorado em Ensaios não Destrutivos)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas e de Materiais, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,Porto Alegre, 2008..

MOUSSA MBAYE Implementação de Ferramentas para Análise de Linhas Flexíveis pelo Método dos Elementos Finitos. - Dissertação (Mestrado em Análise Estrutural)-COOP/UFRJ, 2006..

PADILHA JOSÉ AUGUSTO PINTO Análise estrutural de riser flexível com armaduras de tração em titânio. - Tese (Mestrado em Análise Estrutural)-COOP/UFRJ, 2009..

Rocha Claudia Lisiane Fanezi da. Desempenho em Fadiga de Arames Submetidos ao Processo de Shot Peening.. - Dissertação de Mestrado-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas e de Materiais, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,Porto Alegre, 2010..

SHIGLEY Mechanical Engineering. [Book]. - [s.l.] : Eighth edition.Mc Graw-Hill, 2006.

SILVA JEFFERSON LACERDA Análise Estrutura Aximétrica de Cabos Umbilicais Linhas Flexíveis. - Trabalho de Final de Curso (Engenharia Naval)-COOP/UFRJ, 2006..

SOUZA Jaime Neiva Miranda de. MEDEIROS, José Luiz de. COSTA, André Luiz Hemerly. Modelagem Dinâmica do Escoamento Bifásico em Risers de Exploração de Petróleo em Águas Profundas. - Rio de Janeiro : Bol. Téc. Petrobras, 2004.

STEPHENS R.I. et al. Metal Fatigue in Engineering [Book]. - Second Edition. New York : Wiley Interscience, 2001.

Strohaecker Telmo R. Mecânica da Fratura, apostila, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Laboratório de Metalurgia Física, [Journal]. - <http://aulas.demet.ufrgs.br/Mecfrat/mecfrat.pdf>. Acesso em outubro de 2010 : [s.n.].

XAVIER F. G. Avaliação da vida em fadiga de um novo modelo de terminal conector para dutos flexíveis.. - Tese (Doutorado em Análise Estrutural)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas e de Materiais, PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,Porto Alegre, 2009..