

MARCUS VINICIUS LIMA RODRIGUES BATISTA

**Análise estatística de Weibull dos resultados de fadiga de espécimes de um tubo de aço
API 5CT N80Q para aplicação offshore**

Marcus Vinicius Lima Rodrigues Batista

**Análise estatística de Weibull dos resultados de fadiga de espécimes de um tubo de aço
API 5CT N80Q para aplicação offshore**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento.

	Batista, Marcus Vinícius Lima Rodrigues
B333a	Análise estatística de Weibull dos resultados de fadiga de espécimes de um tubo de aço API 5CT N80Q para aplicação Offshore / Marcus Vinícius Lima Rodrigues Batista – Guaratinguetá, 2022. 66 f. : il. Bibliografia: f. 64-66 Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2022. Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento 1. Petróleo. 2. Gás natural. 3. Materiais - Fadiga. 4. Aço - Fadiga. I. Título. CDU 622.323

Luciana Máximo
Bibliotecária CRB-8/3595

MARCUS VINICIUS LIMA RODRIGUES BATISTA

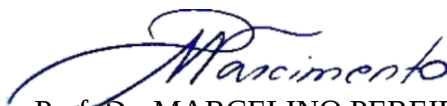
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS



Prof. Dr. **JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA**
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA
DONASCIMENTO
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. MARTIN FERREIRA FERNAN-
DESUNESP-FEG



Prof. Dr. FRANCISCO MACIEL MONTI-
CELIUNESP-FEG

DADOS CURRICULARES

MARCUS VINICIUS LIMA RODRIGUES BATISTA

NASCIMENTO 10.11.1993 – São Roque / SP

FILIAÇÃO Carlos Rodrigues Batista
Vera Lucia Maria de Lima

dedico este trabalho

de modo especial, à minha mãe em primeiro lugar, à minha família, aos meus mestres e professores durante a minha formação escolar e acadêmica, à minha amada República Palace II, aos meus amigos e a todos aqueles que me incentivaram a chegar onde estou agora.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por me iluminar espiritualmente, proporcionar sabedoria de vida para enfrentar as adversidades e ter muita resiliência para as diferentes circunstâncias. Agradeço pela minha vida, minha lucidez mental, minha família, meus mestres e professores durante a minha formação escolar e acadêmica, minha amada República Palace II e aos meus amigos;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos meus pais *Carlos Rodrigues Batista e Vera Lucia Maria de Lima*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos;

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar;

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Perder tempo em aprender coisas que não interessam, priva-nos de descobrir coisas interessantes.”

Carlos Drummond de Andrade.

RESUMO

Tubos de aço utilizados na exploração e prospecção de petróleo e gás natural estão sujeitos a carregamentos dinâmicos durante o transporte (*transit fatigue*) e também quando em serviço. Por este motivo é imperativo que os tubos utilizados apresentem excelente integridade estrutural a fim de evitar a ocorrência de falhas prematuras devido à fadiga. Contudo, como o processo de soldagem por resistência elétrica de alta frequência HF/ERW (*High Frequency Electric Resistance Welding*), largamente utilizado pela indústria, envolve conformação mecânica seguida de soldagem, defeitos estarão inerentemente presentes nos tubos, notadamente uma interface entre as bordas das chapas soldadas. No presente trabalho, foi investigado os resultados de ensaios de fadiga axiais para corpos de prova de aço API 5CT N80Q 90° Plano e corpos de prova de aço API 5CT N80Q abaulados com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$. Para isso, foi utilizada a distribuição de Weibull que associa a probabilidade de falha de um material com o número aproximado de ciclos, divididos para cada faixa dos valores de tensão correspondentes. Desta forma, aplicada para um ensaio de fadiga, esta distribuição permite estimar a probabilidade de falha do material de acordo com sua vida útil quando este é submetido a esforços cíclicos em um nível de tensão simulando a operação real. Através dos parâmetros de Weibull, foi possível estimar a vida útil do material para cada condição com 95% de confiabilidade e assim traçar curvas S-N mais precisas analisando a seção transversal (geometria) do material mais adequada dentre os observados. A maior tensão para a vida infinita foi de 493 MPa com o Aço API 5CT N80Q com o corpo de prova na geometria 90° Plano. A menor tensão para a vida infinita foi de 260 MPa com o Aço API 5CT N80Q com o corpo de prova na geometria abaulado. Uma baixa diferença de 89,6%. Foi concluído que o corpo de prova com seção transversal (geometria) 90° Plano apresenta um melhor comportamento de vida em fadiga, ou seja, maior resistência à fadiga para um determinado número de ciclos.

PALAVRAS-CHAVE: Petróleo e gás natural. fadiga. API 5CT N80Q. Weibull. confiabilidade.

ABSTRACT

Steel tubes used in the exploration and prospecting of oil and natural gas are subject to dynamic loading during transport (transit fatigue) and also when in service. For this reason it is imperative that the tubes used have excellent structural integrity in order to avoid the occurrence of premature failures due to fatigue. However, as the HF/ERW (High Frequency Electric Resistance Welding) process, widely used by industry, involves mechanical forming followed by welding, defects are inherently present in the tubes, notably an interface between the edges of the welded sheets. In the present work, we investigated the results of axial fatigue tests for API 5CT N80Q 90° Plane steel specimens and API 5CT N80Q curved steel specimens with $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0.1$. For this, the Weibull distribution was used, which associates the probability of failure of a material with the approximate number of cycles, divided for each range of the corresponding stress values. Thus, applied to a fatigue test, this distribution allows estimating the probability of failure of the material according to its useful life when it is subjected to cyclic stresses at a stress level simulating the real operation. Using the Weibull parameters, it was possible to estimate the useful life of the material for each condition with 95% reliability and thus draw more accurate S-N curves by analyzing the cross section (geometry) of the most suitable material among those observed. The highest stress for infinite life was 493 MPa with API 5CT N80Q Steel with the specimen in 90° Plane geometry. The lowest stress for infinite life was 260 MPa with API 5CT N80Q Steel with the specimen in the convex geometry. A low difference of 89.6% It was concluded that the test piece with cross section (geometry) 90° Plane presents a better fatigue life behavior, that is, higher fatigue strength for a given number of cycles.

KEYWORDS: Oil and natural gas. fatigue. API 5CT N80Q. Weibull. reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de esforços de flexão	19
Figura 2 – Esquema de esforços de torção	20
Figura 3 – Esquema de esforços de compressão e tração	20
Figura 4 – Fratura por fadiga de um eixo submetido a carregamento de torção	21
Figura 5 – Exemplo de curva S-N	22
Figura 6 – Esquema simplificado de uma coluna de perfuração	24
Figura 7 – Esquema da instalação de várias tubulações do tipo <i>casing</i> encapsulando uma tubulação do tipo <i>tubing</i> dentro de um poço de petróleo.....	25
Figura 8 – Evolução dos tubos de aço do tipo <i>casing</i> e <i>tubing</i> , de acordo com os graus especificados pela API 5CT	26
Figura 9 – Deflexões em um tubo de aço durante transporte	27
Figura 10 – Escoamento de um fluido ao redor de um <i>bluff-body</i> com o desprendimento de vórtices	28
Figura 11 – Esquema da ‘família’ dos aços.....	31
Figura 12 – Fluxograma de produção de tubos API 5CT via conformação mecânica, seguida de soldagem elétrica e tratamento térmico de têmpera e revenimento.....	33
Figura 13 – Processos de soldagem tipo HFW, (a) HF/ERW e (b) HFIW.....	34
Figura 14 - Tubo de aço API N80 tipo Q sendo seccionado com utilização de uma serra hidráulica da Oficina Mecânica do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP.	40
Figura 15 - Esquema da seção transversal de um trecho de tubo e as respectivas seções de interesse ao longo da direção circunferencial.....	41
Figura 16 - Usinagem, via processo de eletroerosão a fio, dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração	42
Figura 17 - Desenho indicando em (a) as posições angulares de onde foram retirados os corpos de prova, em (b) as dimensões dos corpos de prova utilizados nesse projeto e em (c) a geometria de um corpo de prova “convencional”	43
Figura 18 - Ensaio de fadiga axial do corpo de prova	43

Figura 19 - Curva S-N para diferentes geometrias dos CDP's com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$	47
Figura 20 – Curvas de regressão linear para corpos de prova abaulados com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$	53
Figura 21 – Curvas de regressão linear para corpos de prova 90° Plano com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$	56
Figura 22 – Curva S-N para diferentes geometrias dos CDP's com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$ e 95% de confiabilidade.....	61
Figura 23 – Gráfico de barras dos valores das tensões (MPa) para cada seção transversal	62

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Dados dos corpos de prova abaulados com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$	44
Tabela 2 – Dados dos corpos de prova 90° Plano com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$	45
Tabela 3 – Cálculos dos parâmetros de Weibull para corpos de prova abaulados com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$	51
Tabela 4 - Cálculos dos parâmetros de Weibull para corpos de prova 90° Plano com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$	54
Tabela 5 – Tabela 5 – Parâmetro de forma por nível de tensão para corpos de prova abaulados	57
Tabela 6 – Parâmetro de forma por nível de tensão para corpos de prova 90° Plano	58
Tabela 7 – Variância de β por geometria	58
Tabela 8 – Média de β por geometria	58
Tabela 9 – Número de ciclos por tensão para CDP's Aaulados com 95% de confiabilidade	59
Tabela 10 – Número de ciclos por tensão para CDP's 90° Plano com 95% de confiabilidade	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS E SÍMBOLOS

CDP	corpo de prova
CG	contornos de grãos
EW	<i>Electric Welding</i>
HFW	<i>High Frequency Welding</i>
HFIW	<i>High Frequency Induction Welding</i>
HF/ERW	<i>High Frequency Electric Resistance Welding</i>
HIC	<i>Hydrogen Induced Cracking</i>
HSLA	<i>High Strength Low Alloy</i>
Ø	diâmetro
JS	junta soldada
LS	linha de solda
MB	metal base
OCTG	<i>Oil Country Tubular Goods</i>
P&G	petróleo e gás
PIB	Produto Interno Bruto
VIV	<i>Vortex Induced Vibration</i>
ZF	zona fundida
ZTA	zona termicamente afetada
ARBL	alta resistência baixa liga
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
C	carbono
Rx	confiabilidade
<i>M</i>	coeficiente angular
<i>c</i>	coeficiente linear
Cr	crômio
Fe	ferro
°	graus
°C	graus Celsius
IFSP	Instituto Federal de São Paulo
IAC	Instituto de Aviação Civil
Kg	Kilograma
Mn	manganês

MPa	Mega Pascal
μm	micrometros
mm	milímetro
Mo	molibdênio
N	Newton
Ni	níquel
XIX	numeral 19 romano
Nf	número de ciclos até a falha
n	número total de amostras
α	parâmetro de escala
β	parâmetro de forma
X-Y	plano cartesiano
%	porcentagem
i	posição de iteração de dados
PM	posição mediana
Ff	probabilidade de falha
R	raio
rpm	rotações por minuto
t	tempo até a falha
S-N	tensão <i>versus</i> n° de ciclos
Ti	titânio
V	vanádio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Geral	15
1.1.2	Específicos	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	FADIGA	17
2.1.1	Histórico	17
2.1.2	Definição de fadiga	19
2.2	DUTOS UTILIZADOS NA EXPLORAÇÃO, PROSPECÇÃO E CONDUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS	22
2.2.1	Dutos do tipo OCTG	22
2.2.2	O processo de fadiga em tubulações	26
2.2.3	Danos de fadiga devido ao transporte (<i>transit fatigue</i>)	27
2.2.4	Danos de fadiga em serviço	28
2.3	OS AÇOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS	30
2.4	AÇO API 5CT N80 TIPO Q	30
2.4.1	Processo de fabricação dos tubos <i>casing</i> e <i>tubing</i>	32
2.5	SOLDAGEM VIA PROCESSO HFW	33
2.5.1	A junta soldada	35
2.6	ESTATÍSTICA E PROBABILIDADE	35
2.7	WEIBULL	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	40
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	40
3.2	CORTE E USINAGEM	40
3.3	ENSAIOS DE FADIGA	42
3.3.1	Ensaios de fadiga axiais	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	APLICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL	49
4.2	AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FORMA	57
4.3	APLICAÇÃO DA CONFIABILIDADE NAS CURVAS S-N.....	59
5	CONCLUSÕES	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira é impulsionada por combustíveis fósseis. Estes correspondem a 60,6% da oferta interna de energia (Empresa de Pesquisa Energética, 2015), com grande destaque para o petróleo (EPE, 2015; FGV Projetos, 2012) e o gás natural que, juntos, respondem por 52,9% do total (EPE, 2015). Dinâmica e em busca de constantes inovações (GOVERNO DE SÃO PAULO, 2015; MORAIS, 2013), a indústria do petróleo e gás nacional tem grande importância na economia brasileira e corresponde a cerca de 11% do PIB nacional (GOVERNO DE SÃO PAULO, 2015).

O grande interesse das indústrias de petróleo e gás no uso de aços microligados de alta resistência para construção de linhas dutoviárias de prospecção, transmissão e distribuição de petróleo e gás é uma já consolidada tendência no mundo. O emprego desses tipos de aços, contendo altos valores de resistência mecânica e tenacidade, baixas temperaturas de transição frágil-dúctil e baixo carbono equivalente, oferece potenciais benefícios em termos de maior pressão na linha sem aumento da espessura da parede, resultando em menor custo na fabricação dos tubos e no transporte do produto.

Diante do quadro energético mundial, para obter um crescimento econômico sustentável tornou-se imperativo a busca por fontes alternativas e diversificadas de energia, dentre as quais o gás natural tem-se destacado como um insumo viável e ambientalmente correto. Com diâmetros e espessuras de paredes cada vez maiores e menores custos de produção e operacional, os tubos de aços microligados produzidos pelo processo de soldagem por resistência elétrica de alta frequência HF/ERW têm adicionalmente conquistado crescente interesse para aplicações em linhas de transmissão e de exploração, *onshore* e *offshore*, de gás e petróleo. Por ser contínuo, o processo HF/ERW é conhecidamente mais eficiente e econômico que outros processos de fabricação de tubos como o a arco submerso (*Submerged Arc Welding*/SAW) ou o sem costura (*seamless*). Adicionalmente, os tubos HF/ERW apresentam excelente circularidade, espessura de parede uniforme (excentricidade), tolerâncias dimensionais controladas e nenhuma ovalização, características particularmente importantes para determinação da resistência ao colapso plástico e garantia da integridade estrutural da instalação para aplicações em águas profundas (Pré-Sal).

Em razão dos esforços cíclicos oriundos das correntes marítimas gerando vibrações induzidas por vórtices (VIV's), intempéries, das ondas e dos ventos, torna-se de fundamental importância a determinação da resistência à fadiga de estruturas *offshore*. Os primeiros estudos relacionados à fadiga de materiais datam de meados do século XIX, quando o

engenheiro alemão August Wöhler realizou estudos sobre falhas catastróficas em eixos ferroviários. Desde então, a fadiga mecânica é amplamente estudada e os projetos mecânicos prezam cada vez mais por materiais que suportem o máximo possível os esforços cíclicos (PEREIRA, 1995).

Os ensaios de fadiga são a forma laboratorial de simular a operação de determinadas estruturas e com isso analisar o comportamento do material mediante este fenômeno. Porém, por ser um procedimento apenas aproximado do real, faz-se necessário o uso dos conceitos de estatística para tratar os dados obtidos com maior precisão devido à grande dispersão que os resultados podem ter e, conseqüentemente, à dificuldade de se concluir algo mais palpável a partir deles (BAZZANA, 2019).

Os ensaios mecânicos são baseados em amostras de dados, assim a forma de analisa-los estatisticamente é de maneira inferencial, ou seja, através de distribuições probabilísticas. O escopo deste trabalho utilizará um dos principais métodos estatísticos de análise de fadiga, a Distribuição de Weibull, para estudar o comportamento de diferentes amostras retiradas de tubos de aço API 5CT grau N80 tipo Q sob diferentes condições e estabelecer uma comparação entre elas a fim de determinar sua eficiência operacional.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Este trabalho tem por objetivo determinar a resistência à fadiga de um tubo de aço grau API, soldado por resistência elétrica de alta frequência (HF/ERW), destinado à prospecção de petróleo e gás das camadas pré-sal, por meio do levantamento de curvas de tensão e números de ciclos (S-N) de corpos de prova não normalizados, comparativamente a corpos de prova recomendados pelas principais normas vigentes, como a americana ASTM E466 e a norueguesa DNV RP C206 (*Fatigue Methodology of Offshore Ships*). Este trabalho utilizará um dos principais métodos de análise de fadiga, a distribuição de Weibull, para estudar o comportamento de diferentes amostras de aço sob diferentes normas e estabelecer uma comparação entre elas a fim de determinar sua eficiência operacional.

1.1.2 Específicos

Abaixo estão listadas todas as etapas dos objetivos específicos deste trabalho:

- Operação de corte pelo processo oxi-acetilênico e/ou por serra de fita do tubo de aço fornecido pela Apolo Tubulars S.A.;
- Preparação das amostras metalográficas;
- Verificação de ocorrência de segregação na linha central do tubo e da junta soldada;
- Confecção dos corpos de prova de fadiga;
- Ensaios e levantamento das curvas de fadiga;
- Efetuar operações matemáticas em conceitos de estatística para obter as equações de regressão linear;
- Traçar as curvas de regressão linear utilizando o software Microsoft Excel e encontrar os parâmetros da Distribuição de Weibull;
- Analisar as curvas traçadas quanto à dispersão dos resultados dos ensaios mecânicos e à homogeneidade dos materiais;
- Com os parâmetros da Distribuição de Weibull, estimar valores de número de ciclos para cada faixa de tensão para uma confiabilidade a ser adotada;
- Traçar as curvas S-N para a confiabilidade adotada comparando os diferentes corpos de prova do aço sob diferentes seções transversais;
- Análise dos resultados obtidos e determinar a melhor geometria (seção transversal) do aço API 5CT N80Q em relação a vida em fadiga.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FADIGA

2.1.1 Histórico

O início do interesse sobre o fenômeno da fadiga data de mais de 170 anos atrás (ASM, 1996; DOWLING, 2007; POOK, 2007; NORTON, 2013) e coincide com o período do advento da revolução industrial. Isso é justificado pelo fato de que a partir desse momento se deu a utilização em larga escala de máquinas movidas a vapor e de componentes e estruturas mecânicas metálicas ferrosas (DOWLING, 2007; POOK, 2007), como ferrovias, guinchos, eixos de locomotivas, dentre outros. Com essa intensa mecanização, pela primeira vez na história, peças passaram a estar sujeitas a esforços dinâmicos ao longo de um número de ciclos significativo, e, portanto, fraturas devido à fadiga passaram a ser comuns.

Ainda que o termo “fadiga” tenha sido provavelmente utilizado pela primeira vez pelo engenheiro francês Jean Victor Poncelet no ano de 1839 em seu livro *Introduction à la mécanique industrielle: physique ou expérimentale* (JAMES, 2014), os primeiros estudos do fenômeno da fadiga são creditados ao alemão Wilhelm August Julius Albert (também inventor do cabo de aço). Em meados de 1829 Wilhelm realizou ensaios mecânicos em correntes de guinchos (utilizados na elevação de cargas em minas). Nestes ensaios, as correntes eram submetidas a esforços dinâmicos envolvendo até 105 ciclos de carregamento (SURESH, 2004; DOWLING, 2007; POOK, 2007). Contudo, o estopim do início de estudos mais aprofundados a respeito do fenômeno da fadiga foi o aumento no número de fraturas repentinas de eixos de vagões e locomotivas em serviço, e em especial, ao primeiro acidente catastrófico devido à fadiga, ocorrido em Versaille na França no ano de 1842 (SURESH, 2004). Essa falha decorreu da fratura do primeiro eixo de uma locomotiva de um trem de passageiros e levou a perdas materiais e humanas, com a morte de 60 pessoas (SCHÜTZ, 1996; SURESH, 2004; POOK, 2007).

O fato de as fraturas devido à fadiga ocorrerem de uma forma abrupta, frágil, contrariava as expectativas dos engenheiros de então, pois todos os projetos haviam sido realizados rigorosamente de acordo com os conhecimentos da época (que eram apenas baseados em carregamentos estáticos) e os eixos manufaturados em um aço dúctil (NORTON, 2013). Em 1843 o engenheiro inglês William John Macquorn Rankine publicou um artigo a respeito do tema no qual buscava soluções para a ocorrência de falhas repentinas em eixos ferroviários.

De acordo com Rankine (1843), a fratura dos eixos ferroviários, após alguns anos de serviço, deveria ser causada por uma deterioração gradual ao longo do tempo, sendo a explicação mais plausível, um fenômeno de fragilização devido à “cristalização” do material (que originalmente se apresentava em um estado “fibroso”, maleável), além de efeitos decorrentes da geometria dos eixos (presença de concentradores de tensão) que poderiam levar a uma descontinuidade nas “fibras” do metal e, portanto, a uma menor resistência mecânica (BAZZANA, 2019).

O estudo do fenômeno da fadiga teve um importante avanço com as pesquisas realizadas pelo engenheiro alemão August Wöhler, que entre 1852 e 1869 realizou uma série de ensaios de fadiga em eixos ferroviários (tamanho real) e em uma variedade de componentes mecânicos, manufaturados em ferro fundido, aço ou outros metais, que eram utilizados em máquinas menores (SURESH, 2004) e estavam sujeitos a carregamentos cíclicos distintos como: tração axial, flexão e torção (SURESH, 2004; DOWLING, 2007). Para a realização de seus experimentos, Wöhler construiu uma série de máquinas para a realização de testes de fadiga (POOK, 2007), inclusive máquinas de flexão rotativa (as quais têm seu conceito utilizado até hoje) que apesar de apresentarem capacidade até de 72 RPM permitiram, por exemplo, a realização do ensaio de um corpo de prova por 132.250.000 ciclos de tensão, sem ocorrência de fratura (SURESH, 2004). Além do desenvolvimento das primeiras máquinas específicas para a realização de ensaios de fadiga, são creditadas a Wöhler outras contribuições acerca do tema, como o conceito de projeto através do critério de vida segura em fadiga ao sugerir que elementos sujeitos a carregamento dinâmico deveriam ser projetados de tal maneira que, quando em serviço, nunca atingissem um número de ciclos de carregamento suficiente para uma eventual fratura (SCHÜTZ, 1996). Os resultados de seus ensaios, ainda que originalmente apenas tabelados, deram também origem à caracterização do comportamento em fadiga através de curvas S x N: Amplitude de Tensão x Número de Ciclos, as chamadas “curvas de Wöhler”, anos após o término de suas pesquisas (SCHÜTZ, 1996; SURESH, 2004). Em 1870 Wöhler publicou um relatório contendo as suas conclusões finais a respeito dos ensaios que ele realizara nos anos anteriores, as chamadas Leis de Wöhler (SCHÜTZ, 1996):

- i. um material pode ser induzido à falha por uma grande quantidade de tensões repetidas, mesmo quando a magnitude destas tensões for menor que a resistência do material (estática);
- ii. a amplitude das tensões aplicadas é decisiva para a destruição da coesão do material;

- iii. a influência da tensão máxima aplicada é tal que, quanto maior for esta, menor será a amplitude de tensão necessária para a falha.

As leis propostas por Wöhler apresentam importantes conceitos sobre o fenômeno da fadiga, como o fato destas falhas ocorrerem em patamares de tensão inferiores aos necessários para uma falha estática do material, além de ressaltarem a influência da amplitude de tensões e da tensão média aplicada e o fato de que um aumento de qualquer um destes dois parâmetros reduza a vida em fadiga de um elemento em serviço.

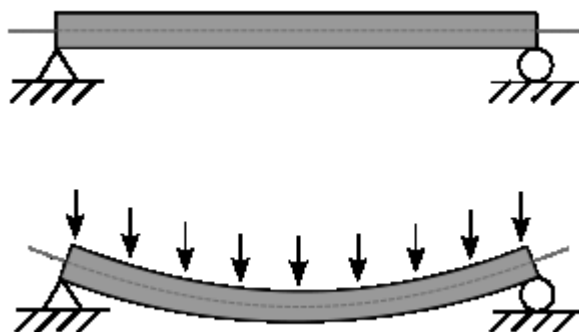
Os resultados das observações de Wöhler e as curvas $S \times N$ são ainda hoje muito importantes, e neste projeto curvas deste tipo são utilizadas para a análise de fadiga dos tubos de aço API 5CT N80 tipo Q.

2.1.2 Definição de fadiga

Fadiga é um tipo de falha estrutural que ocorre mediante tensões cíclicas e oscilantes. Trata-se de um processo progressivo e permanente de mudanças estruturais mediante um longo período de esforços onde é possível ocorrer fraturas sob tensões bastante inferiores ao limite de resistência à tração. A falha se dá a partir da nucleação de uma trinca seguido pela fratura quando o número de ciclos é suficientemente elevado (JANG, 1994).

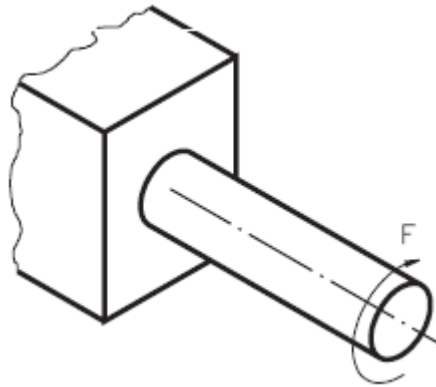
Do ponto vista microscópico, diversos fatores podem influenciar a falha por fadiga como descontinuidades granulares no material, a temperatura de operação, o grau de exposição a corrosão, entre outros. Os principais tipos de carregamento cíclico que um material pode sofrer para provocar falha por fadiga são flexão, torção e tração/compressão axiais (CALLISTER, 2006). Essas três formas de tensão são apresentadas nas figuras a seguir:

Figura 1 – Esquema de esforços de flexão.



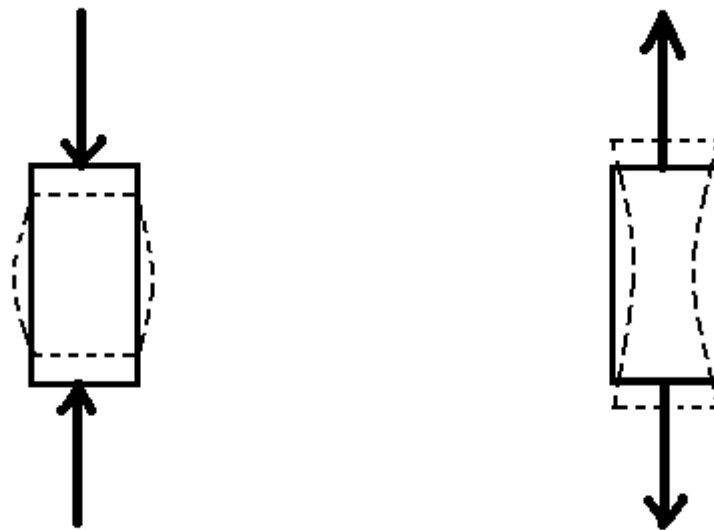
Fonte: Pngtube (2021).

Figura 2 – Esquema de esforços de torção.



Fonte: Metrologia e medicoes (2018).

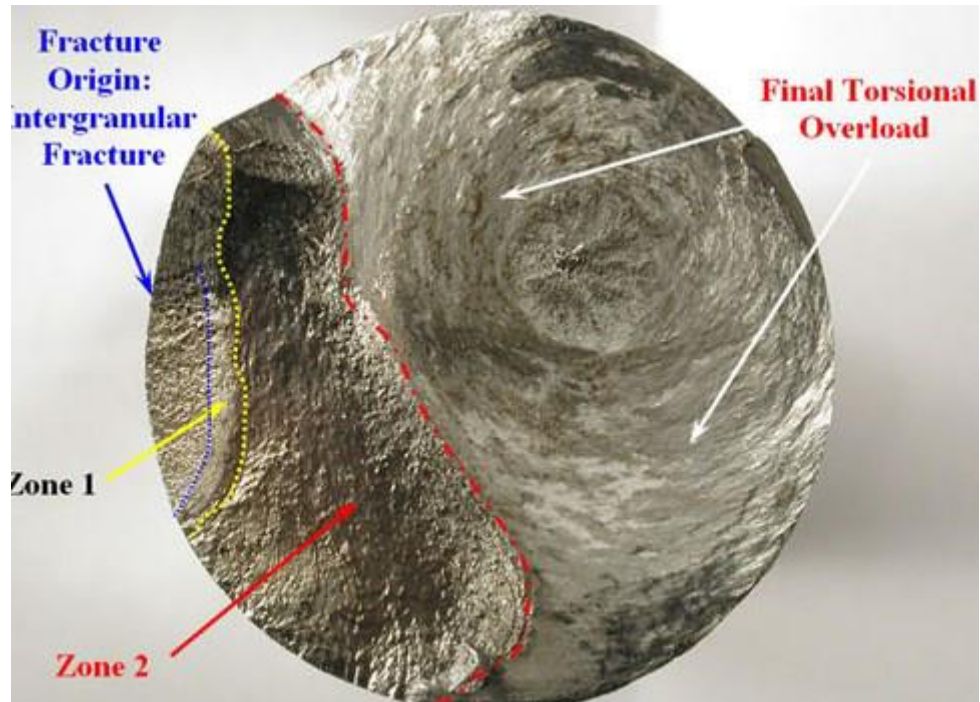
Figura 3 – Esquema de esforços de compressão e tração.



Fonte: Geniecvl (2013).

Antes da fratura ocorre a nucleação da trinca (região mais à esquerda na Figura 4). Essa etapa tem como característica apresentar uma largura de aproximadamente 1mm. Seguido da nucleação ocorre a propagação da trinca (região central na Figura 4), etapa essa em que é possível observar as “marcas de praia” na superfície da fratura. Finalmente, ocorre a falha mecânica (região mais à direita na Figura 4) (GARCIA, 2008).

Figura 4 – Fratura por fadiga de um eixo submetido a carregamento de torção.



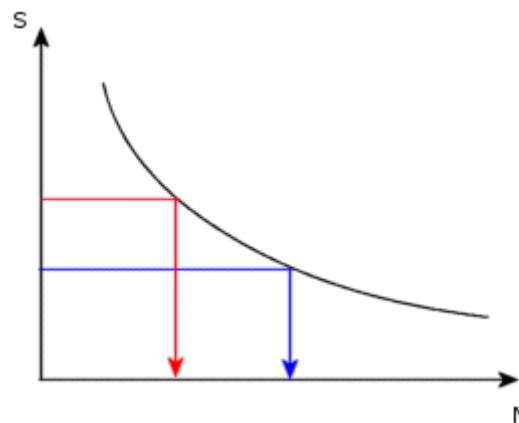
Fonte: Ensus (2021).

Visando evitar as falhas por fadiga a longo prazo, existem diferentes formas de estimativa da vida de operação de determinado material, sendo as principais:

- Curva S-N – utiliza os parâmetros de Tensão *versus* Número de ciclos. Tem maior usabilidade para grande número de ciclos e deformação elástica. Este estudo é calculado até o momento de ruptura do material.
- Curva ϵ -N – utiliza os parâmetros Deformação *versus* Número de ciclos. Tem usabilidade para baixo e alto número de ciclos e para deformações tanto plástica quanto elástica. Este estudo é calculado até a etapa de nucleação da trinca.

Essas curvas de vida em fadiga são traçadas através de ensaios mecânicos variando propriedades como acabamento superficial, tipo e nível de carregamento e temperatura de operação. (GARCIA, 2008).

Figura 5 – Exemplo de curva S-N.



Fonte: Ensus (2021).

O termo “vida infinita” é a denominação para determinado componente quando é identificado através desses estudos que a quantidade de ciclos de operação para as condições utilizadas é suficientemente elevada para poder se descartar a possibilidade de falha por fadiga. Geralmente o número de ciclos adotado para a “vida infinita” gira entre um milhão e 10 milhões de ciclos para aços-carbono. Abaixo desses valores, é denominado o termo “vida finita” para quando o componente tem uma certa estimativa de tempo de operação (CALLISTER, 2006).

2.2 DUTOS UTILIZADOS NA EXPLORAÇÃO, PROSPECÇÃO E CONDUÇÃO DE PETRÓLEO E GÁS

Dentre os tipos de tubos utilizados na indústria de exploração petróleo e gás é possível destacar os do tipo OCTG (*Oil Country Tubular Goods*), utilizados nas atividades de perfuração, revestimento e condução de petróleo e gás através do poço explorado, e os do tipo line pipe utilizados no transporte de fluidos externamente aos poços (SORRIJA, 2016). O escopo deste trabalho será os tubos do tipo OCTG, o qual possuem um maior detalhamento a seguir.

2.2.1 Dutos do tipo OCTG

Os dutos do tipo OCTG consistem em tubos circulares de aço carbono ou liga, costurados ou extrudados, com extremidades lisas e ou roscadas e ou expandidas (com “luvas”), dividindo-se em tipo *drilling* (utilizados nas colunas de perfuração dos poços) e dos tipos *casing* e *tubing* (utilizados nas colunas de prospecção, dentro do poço a ser explorado) (U.S. IN-

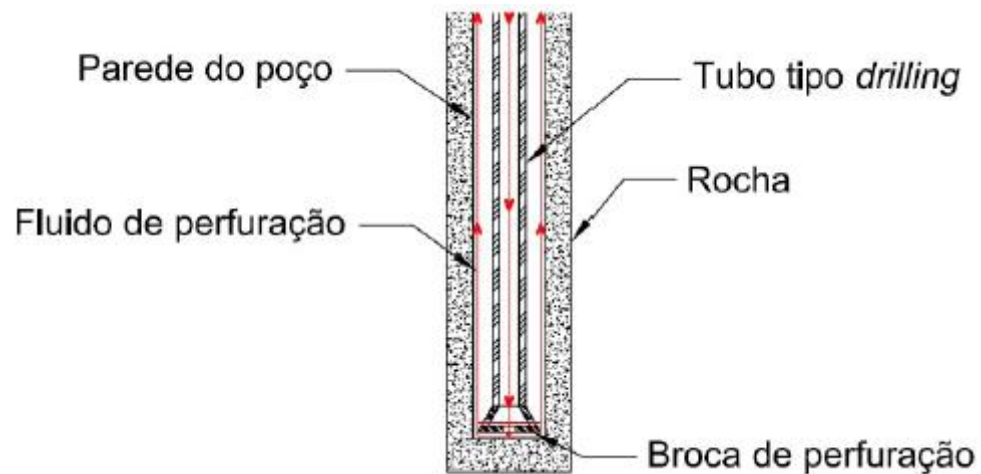
TERNATIONAL TRADE COMISSION, 2002; INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION, 2015).

Quando há evidências geológicas e ou geofísicas da presença de hidrocarbonetos (existência de um reservatório) ocorre a perfuração de um poço, atividade que pode ter duração variando de menos de um dia até vários meses (PAPAVINASAM, 2014). Um sistema típico para perfuração (rotativa) consiste em uma unidade de força rotativa, uma coluna de perfuração, (composta de tubos de parede espessa denominados “comandos”, tubos de parede mais fina, conexões e uma broca em sua extremidade), além de fluido ou lama de perfuração que é bombeado(a) para dentro da coluna de perfuração até a broca, sendo responsável por expulsar os fragmentos da rocha perfurada e manter a pressão do sistema, (THOMAS, 2001; PAPAVINASAM, 2014). Um esquema simplificado de uma coluna de perfuração pode ser observado na Figura 6.

Devido à natureza dos esforços cíclicos existentes e do ambiente corrosivo envolvidos na atividade descrita, fenômenos de fadiga-corrosão e de *Sulfide Stress Cracking* – SSC (especialmente relacionado à presença de H₂S), são mecanismos comuns para a ocorrência de falhas em tubos de perfuração (PAPAVINASAM, 2014).

A atividade de perfuração descrita anteriormente é caracterizada por ocorrer em fases. Quando certa profundidade é atingida no poço, toda a coluna de perfuração é retirada e um tubo do tipo *casing*, (com diâmetro menor que o da broca anteriormente utilizada) é inserido dentro do poço, com o espaço anelar restante sendo preenchido usualmente com concreto (THOMAS, 2001; PAPAVINASAM, 2014). Após essa etapa, quando necessário, novamente uma coluna de perfuração é inserida dentro do poço, porém, com uma broca de menor diâmetro, e uma nova atividade de perfuração ocorre, sendo precedida pela instalação de um novo tubo do tipo *casing* (THOMAS, 2001) fazendo com que o perfil lateral do poço tenha um perfil “escalonado”.

Figura 6 – Esquema simplificado de uma coluna de perfuração.



Fonte: Sorrija (2016).

As tubulações do tipo *casing*, portanto, servem como estruturas que: mantêm a integridade e a estabilidade das paredes do poço perfurado, impedindo seu colapso; evitam que o óleo e gás sejam misturados a outros fluidos indesejáveis como a água (e vice-versa) (THOMAS, 2001; U.S. INTERNATIONAL TRADE COMMISSION, 2002 PAPA VINASAM, 2014); permitem um controle da pressão de trabalho dentro do poço explorado (THOMAS, 2001; SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, 2015); dentre outras funções. Por fim, dentro do poço, o duto responsável pela condução dos hidrocarbonetos até a cabeça do poço é denominado *tubing*, e se encontra encapsulado pela tubulação formada pelos *casings* (U.S. INTERNATIONAL TRADE COMMISSION, 2002; PAPA VINASAM, 2014; INTERNATIONAL MOLYBDENUM ASSOCIATION, 2015; SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS, 2015). Um esquema simplificado de um conjunto de *casings* e o *tubing* central é mostrado na Figura 7 (SORRIJA, 2016).

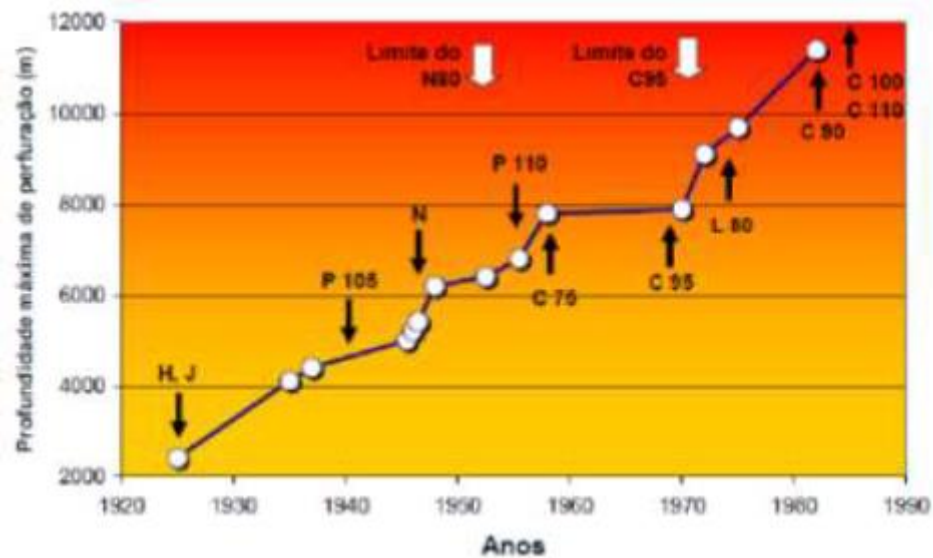
Figura 7 – Esquema da instalação de várias tubulações do tipo *casing* encapsulando uma tubulação do tipo *tubing* dentro de um poço de petróleo.



Fonte: Krauspenhar (2012).

Para o caso de tubos de aço do tipo OCTG utilizados como casing e tubing, também houve uma evolução significativa dos aços, não apenas em relação à resistência mecânica (crucial devido as maiores pressões de trabalho envolvidas), mas também considerando a resistência à corrosão. De acordo com os graus definidos pela API 5CT Specification for Casing and Tubing, essa evolução pode ser notada na Figura 8.

Figura 8 – Evolução dos tubos de aço do tipo *casing* e *tubing*, de acordo com os graus especificados pela API 5CT.



Fonte: Melo (2013).

Muitas das jazidas de petróleo exploradas a partir dos anos de 1950 apresentam teores elevados de H_2S , situação cada vez mais frequente e que piora conforme o poço envelhece (GORNI, SILVEIRA, REIS, 2009). A presença do H_2S (na forma de uma solução aquosa), caracteriza condições ambientes do tipo *sour* (poços “azedos”) e é responsável pela ocorrência de trincas devido à fragilização por hidrogênio (HIC – *Hydrogen Induced Cracking*) (GORNI, SILVEIRA, REIS, 2009) e também devido à ocorrência de SSC (*Sulfide Stress Cracking*) (PAPAVINASAM, 2014). A partir desses detalhes, os tubos do tipo *casing* e *tubing* devem ser selecionados não apenas em função de sua resistência mecânica, mas também devido ao fato de operarem em ambientes *sour* ou *sweet* (poços “doces”, sem presença significativa de H_2S) (SORRIJA, 2016).

2.2.2 O processo de fadiga em tubulações

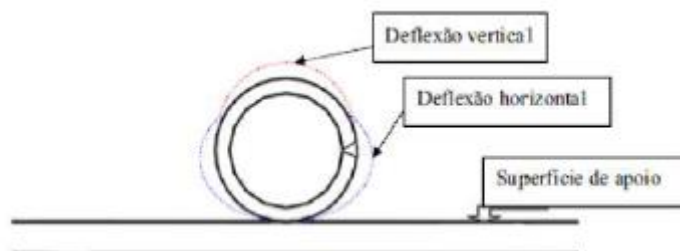
As estruturas *offshore* (dutos, torres de sustentação, plataformas, cabos de sustentação das plataformas etc.) quando em serviço são submetidas a esforços dinâmicos diversos e, portanto, estão sujeitas a danos por mecanismo de fadiga (RIVA, 2004; BAI, BAI, 2005; VALADÃO, 2011). As origens desses carregamentos são diversas como: variações cíclicas de pressão e temperatura (BAI, BAI, 2005), movimentação das ondas, fluxos de correntes marinhas (RIVA, 2004; ALBUQUERQUE, 2004; BAI, BAI, 2005; LIMA, 2007; VALADÃO, 2011), dentre outros. Além dos carregamentos em serviço, danos por fadiga também podem

ocorrer durante o transporte (ALBUQUERQUE, 2004; GODOY, 2008), podendo ocorrer uma significativa degradação estrutural dos tubos. Informações mais relevantes da forma como acontecem carregamentos cíclicos nas tubulações são mostradas na sequência.

2.2.3 Danos de fadiga devido ao transporte (*transit fatigue*)

Os tubos utilizados na indústria de P&G podem sofrer danos de fadiga antes de sua instalação em campo, fenômeno denominado como fadiga por transporte (SORRIJA, 2016). Estudos conduzidos por fabricantes de tubos nos anos de 1960 tiveram como objetivo investigar falhas que ocorriam em testes hidrostáticos antes da aplicação dos tubos em serviço (GODOY, 2008). Os mais diversos tipos de testes foram realizados, porém foram apenas durante a realização de ensaios de fadiga que pôde ser constatada a formação de trincas similares às procuradas (SORRIJA, 2016). Durante o transporte, os tubos são submetidos a ciclos de carregamentos, decorrentes de forças gravitacionais e inerciais (GODOY, 2008; MOHAMED, RAO, LOBLEY, 2009; PAPAVINASAM, 2014). Essas forças induzem tensões flutuantes as quais são responsáveis pela nucleação e propagação de trincas de fadiga em um tubo. Para que este tipo de falha de fadiga ocorra é necessário que os carregamentos sejam relativamente altos e aplicados por um grande número de ciclos, sendo associados normalmente a modos de transporte ferroviário e por navios (PAPAVINASAM, 2014). Esse tipo de dano como apresentado por Godoy (2008) foi detectado tanto em tubos utilizados em *line pipes* quanto em tubos do tipo *casing* e *tubing* (inclusive para grau N80, material analisado neste projeto) devido ao transporte realizado por trem ou navio. Um esquema representando o mecanismo de fadiga durante o transporte é observado na Figura 9.

Figura 9 – Deflexões em um tubo de aço durante transporte.

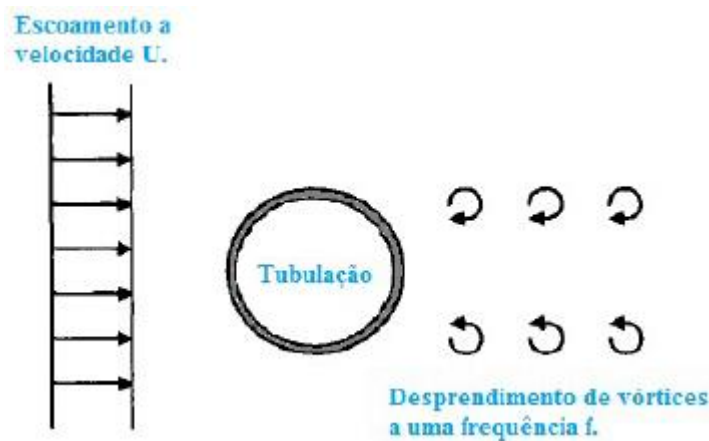


Fonte: Godoy (2008).

2.2.4 Danos de fadiga em serviço

Existe uma série de fatores que podem induzir tensões cíclicas (e, portanto, uma eventual falha por fadiga) nas tubulações utilizadas na exploração e transporte de petróleo e gás. Primeiramente, considerando tubulações extra poço, o escoamento de um fluido em torno de um *bluff-body* (corpo “rombudo”), pode levar a formação de uma região de escoamento instável, caracterizada pela formação de uma esteira de vórtices (BAI, BAI, 2005; GABBI, 2013). Esse fenômeno é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Escoamento de um fluido ao redor de um *bluff-body* com o desprendimento de vórtices.



Fonte: Bai, Bai (2005).

Quando a formação (ou desprendimento) destes vórtices ocorre a uma frequência próxima à frequência natural do corpo através da qual o fluido escoar, um fenômeno de vibração indesejado da estrutura então passa a ocorrer (RIBEIRO, 2002; BAI, BAI, 2005), sendo este o fenômeno das VIVs (Vibrações Induzidas por Vórtices ou *Vortex Induced Vibrations*). Estas vibrações talvez sejam um dos mecanismos mais perniciosos aos quais podem estar sujeitas as tubulações, pois atuam como carregamentos dinâmicos, diretos e indiretos, nas estruturas *offshore*, levando a ocorrência de danos por fadiga (SORRIJA, 2016). O fenômeno é bastante crítico para o caso de tubulações do tipo *risers* e também para *flowlines* que apresentem vãos livres (trechos biapoiados, que não estejam em contato com o leito submarino), pois assim é possível escoamento ao redor das tubulações (SORRIJA, 2016). O problema se torna ainda mais complexo em águas profundas, pois tanto a magnitude quanto as direções de escoamento podem variar de maneira significativa com a profundidade. Desta maneira diferentes pontos

da tubulação podem ser excitados em modos de vibração distintos, tornando muito difícil prever e modelar a ocorrência das VIVs (BAI, BAI, 2005).

A presença das VIVs é um fator que reduz drasticamente a vida útil à fadiga dos dutos submarinos, podendo levar a danos severos, especialmente quando as velocidades das correntes marítimas são elevadas (ALBUQUERQUE, 2004; LIMA, 2007). Além do dano direto nos *risers* (especialmente), *flowlines* e *pipelines*, as vibrações devido às VIVs também podem ser transferidas para outras estruturas submarinas (danos indiretos decorrentes das VIVs), como a cabeça do poço e tubos do tipo *casing*, levando a falhas por fadiga em conexões e juntas soldadas, situação bastante crítica, especialmente pelo fato de não ser possível a realização de atividades de inspeção destas estruturas (LIM, TELLIER, HOWELLS, 2012). A indústria, a fim de evitar, ou ao menos diminuir, os danos decorrentes das VIVs, tem utilizado dispositivos supressores de vibrações (SORRIJA, 2016). Estes dispositivos são acoplados externamente a tubos (que poderão estar sujeito a VIVs em serviço) de forma a mudar o perfil pelo qual ocorre o escoamento das correntes marítimas em torno deles: de um perfil “rombudo” para um com melhor hidrodinâmica, de forma a minimizar o desprendimento de vórtices e a vibração decorrente do fenômeno (SORRIJA, 2016).

Além de danos indiretos induzidos pelas VIVs, as tubulações do tipo *tubing* também podem estar sujeitas a vibrações induzidas pelo escoamento dos próprios petróleo e gás (SORRIJA, 2016). Falhas decorrentes de vibrações desse tipo foram detectadas principalmente em *tubings* encontrados em poços tipo *sour* de elevada produtividade, e também, em alguns casos, em *tubings* instalados em poços menos agressivos (menos corrosivos) nos quais os efeitos de corrosão não foram preponderantes na falha por fadiga (RENPU, 2011).

Outros fatores como mudanças de pressão de trabalho devido operações complexas dentro do poço também podem gerar carregamento alternado e a possibilidade de trabalho em elevadas temperaturas (em que há combinação de efeitos de fadiga e fluência) também pode reduzir a vida útil dos tubos, levando à fratura (RENPU, 2011).

O fato de a exploração e condução de petróleo e gás envolver uma combinação de: carregamentos dinâmicos, possibilidade de trabalho com gradientes de temperatura elevados e um ambiente corrosivo são, portanto, justificativas para o estudo da fadiga em tubulações *offshore*.

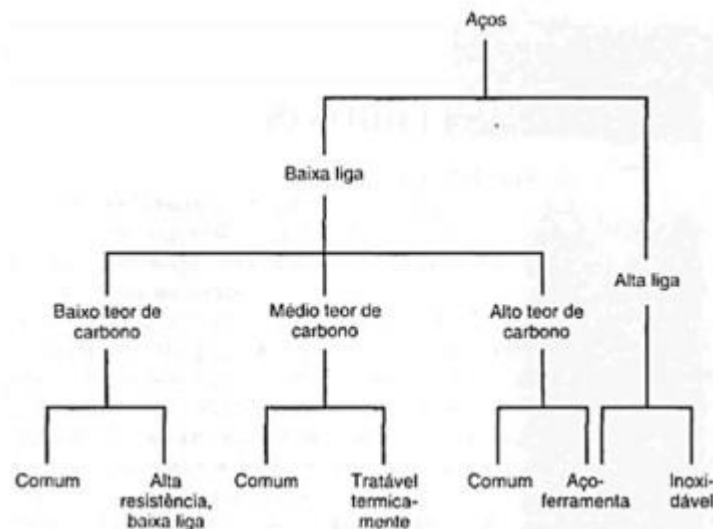
2.3 OS AÇOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

Os metais são intensamente utilizados no setor de petróleo e gás, correspondendo a cerca de 90% de todos os materiais utilizados nessa indústria (PAPAVINASAM, 2014). Dentre estes, os aços são os mais utilizados (ZHU, 2011; PAPAVINASAM, 2014) correspondendo a cerca de 80% de todo o metal utilizado no setor (PAPAVINASAM, 2014), especialmente por seu relativamente baixo custo e fácil obtenção (SINGH et al., 2014; PAPAVINASAM, 2014). Outra característica importante dos aços é sua extrema versatilidade, pois, graças a avanços obtidos nos últimos 50 anos, suas propriedades vêm se tornando cada vez melhores, tanto em termos de resistência mecânica, quanto em relação à tenacidade (inclusive em baixas temperaturas), resistência à corrosão (em alguns casos), soldabilidade, dentre outras características que os tornam adequados a condições cada vez mais severas existentes na exploração e transporte de petróleo e gás (SORRIJA, 2016).

2.4 AÇO API 5CT N80 TIPO Q

Os aços eram descritos no passado simplesmente como ligas de Fe (ferro) e C (carbono), uma classificação muito simplista para os padrões atuais, pois hoje muitos aços importantes, como os do tipo *interstitial-free* e alguns aços inoxidáveis, apresentam o C como uma impureza presente em quantidades tão baixas quanto algumas partes por milhão (ASM, 2008). No escopo deste trabalho, contudo, são de interesse especialmente os aços “clássicos”: ligas Fe-C, em que a quantidade de C seja menor que 2% em massa (porcentagens maiores caracterizam o material como um ferro fundido) (ASM, 2002), com a eventual adição de outros elementos de liga. Dentre estes aços, o mais comum é o aço ao carbono simples (*plain carbon steel*), uma liga de Fe-C que também contém Mn (manganês) e certa quantidade de elementos residuais, os quais já estavam presentes nas matérias-primas do aço, como S (enxofre) e P (fósforo) (ASM, 2002; ASM, 2008). Estes aços podem ser do tipo baixo carbono (teor < 0,2% de C em massa), médio carbono (0,2 < teor < 0,5% de C em massa) e alto carbono (teor > 0,5% de C em massa) (ASM, 2002), apresentando aumentos da resistência mecânica e dureza com reduções da ductilidade, tenacidade e soldabilidade (ALÍPIO et al., 2000; VERLINDEN et al., 2007; ASM, 2008) conforme o teor de C aumenta (SORRIJA, 2016). A classificação dos aços é mostrada na Figura 11.

Figura 11 – Esquema da ‘família’ dos aços.



Fonte: Callister Jr (1999).

Para que ocorra um aumento da resistência mecânica sem detrimento das outras propriedades citadas, na maior parte dos casos, é interessante a utilização de aços com baixos teores de C, mas que tenham adição de pequenas porcentagens de elementos de liga, os denominados aços de baixa liga (CHIAVERINI, 1990). Estes são caracterizados pela presença de elementos de liga em porcentagens inferiores a 8% (ASM, 2002), destacando-se os chamados aços ARBL (Alta Resistência Baixa liga, ou HSLA *High Strength Low Alloy*).

Considerando o conjunto dos aços ARBL, podem ser destacados os do tipo microligados. Os aços ARBL microligados apresentam teores baixos de C e pequenas adições de um ou mais dos seguintes elementos: Ti (titânio), V (vanádio) e Nb (nióbio) (ASM, 2002; ASM, 2008, BEIDOKHTI, KOUKABI, DOLATI, 2009; NASCIMENTO, 2009). A presença destes elementos combinada a um processo de fabricação via conformação termomecânica controlada, ou TMCP (*Thermo-Mechanically Controlled Processing*) com ou sem resfriamento acelerado, permite a obtenção de aços com elevado valor de tensão de escoamento (CHIAVERINI, 1990), compensando a perda de resistência que ocorreria devido aos baixos teores de C, e faz isso sem excessivo comprometimento da ductilidade (XIE, DU, HU, MISRA, 2014). Portanto, graças à composição química destes aços e ao rigoroso processo de fabricação, esses aços apresentam uma ótima combinação de propriedades: elevada resistência mecânica, elevada tenacidade (inclusive a baixas temperaturas), além de adequadas soldabilidade e ductilidade (BEIDOKHTI, KOUKABI, DOLATI, 2009; NATHAN, BALASUBRAMANIAN, MALLARVIZHI, RAO, 2015), por isso a importância atual na indústria.

As características dos aços ARBL microligados permitem que os tubos fabricados apresentem cada vez maiores valores de resistência, sem se tornarem demasiadamente pesados e onerosos. Além de questões econômicas imediatas (custos de implantação e manutenção), o desenvolvimento e utilização de novos materiais tornam as linhas dutoviárias cada vez mais seguras, menos suscetíveis a falhas. Esta questão se torna cada vez mais importante, pois muitas das novas reservas de petróleo descobertas se encontram nos oceanos, em águas profundas e ultra profundas, submetendo as tubulações a uma crítica combinação de fatores como: carregamentos dinâmicos (que podem levar a danos e falhas por fadiga), elevados valores de pressão (que dão possibilidade de falha de tubulações por colapso), ambiente corrosivo, etc. (SORRIJA, 2016).

Os tubos de aço API 5CT grau N80 tipo Q são aplicados para situações em que não é necessária grande resistência à corrosão e são requeridos valores intermediários de resistência mecânica (SORRIJA, 2016). Sua composição química é restrita apenas quanto aos teores, em massa, de S e de P (fósforo), ao passo que a quantidade de outros elementos químicos fica a critério do fabricante do tubo (desde que sejam atingidas as especificações necessárias relacionadas à resistência mecânica) (SORRIJA, 2016). Quanto ao tratamento térmico, estes aços devem sua elevada resistência mecânica a um tratamento de têmpera e revenido (SORRIJA, 2016). Quanto ao processo de manufatura, estes aços são soldados via processo EW (*Electric Welding*).

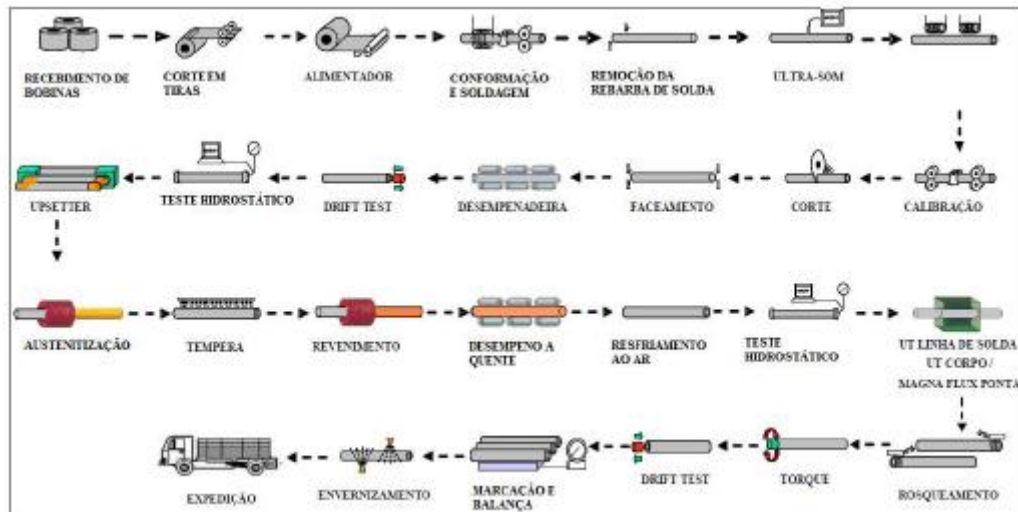
2.4.1 Processo de fabricação dos tubos *casing* e *tubing*

Para o caso dos tubos de aço investigados neste trabalho, graus N80 tipo Q, o processo de fabricação utilizado é composto, basicamente, por (BARBOSA, 2011; APOLO, 2015):

- i. “desbobinamento” das chapas de aço (com as composições químicas já de acordo com os requisitos especificados pela API 5CT);
- ii. conformação mecânica das chapas em uma geometria tubular;
- iii. soldagem elétrica (EW) via mecanismo de indução;
- iv. tratamento térmico da solda (quando necessário);
- v. calibração e testes iniciais;
- vi. têmpera e revenimento;
- vii. teste finais, ensaios não destrutivos e operação de acabamento.

A Figura 12 apresenta um fluxograma mais completo que envolve todas as etapas do processo de fabricação, de maneira a obter tubos destinados à indústria de P&G que estejam de acordo com as especificações da API 5CT (SORRIJA, 2016).

Figura 12 – Fluxograma de produção de tubos API 5CT via conformação mecânica, seguida de soldagem elétrica e tratamento térmico de têmpera e revenimento.



Fonte: Melo (2013).

2.5 SOLDAGEM VIA PROCESSO HFW

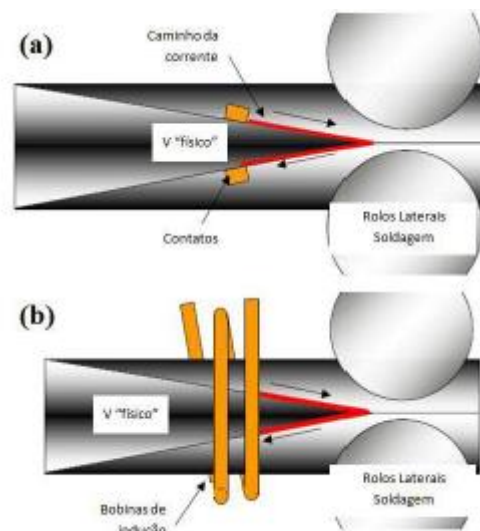
A soldagem elétrica de alta frequência, ou HFW (*High Frequency Welding*) é bastante importante dentro do processo de fabricação de tubos para a indústria de P&G. Em comparação aos outros processos de fabricação, tanto como por conformação e soldagem (como o UOE em que as chapas são conformadas, soldadas via SAW (*Submerged Arc Welding*), com posterior expansão do tubo) quanto por extrusão, o processo via HFW é o mais econômico, pois tem menos etapas e é realizado de maneira contínua, sendo assim um processo muito mais eficiente e de grande interesse para a indústria (BARBOSA, 2011).

Os processos de fabricação via HFW consistem, basicamente, na junção de duas superfícies (de uma mesma chapa ou não), através da combinação de geração de calor (devido ao efeito joule decorrente da passagem de corrente elétrica pelo material) e aplicação localizada de pressão, de forma a unir as superfícies fundidas (O'BRIEN, 1991; WAINER, BRANDI, MELLO, 1992; BARBOSA, 2011), configurando uma solda do tipo autógena (em que não é necessário metal de adição). É possível dividir os processos HFW em dois tipos básicos: HF/ERW (*High Frequency Electric Resistance Welding*) e HFIW (*High Frequency Induction*

Welding), e apesar de os dois processos utilizarem o princípio do efeito joule para fusão das superfícies a serem soldadas, o HF/ERW o faz através da condução direta de corrente elétrica (através de dois contatos físicos) ao passo que o HFIW induz uma corrente elétrica no material a ser soldado, através da passagem de corrente elétrica por uma bobina de indução, não ocorrendo contato físico entre ela e o material soldado (O'BRIEN, 1991). A Figura 13 apresenta a diferença entre os dois processos.

Dentre os dois processos HFW o utilizado na manufatura dos tubos utilizados nesse trabalho é o do tipo HF/ERW. Como observado na Figura 13, a chapa de aço previamente conformada em uma geometria cilíndrica tem suas extremidades soldadas graças à fusão de suas bordas devido à passagem de uma corrente elétrica. Essas bordas fundidas são então pressionadas, por rolos laterais, uma contra a outra. Com essa pressão, ocorre a expulsão do excesso de metal líquido (e eventualmente contaminantes) para fora do cordão de solda que vai sendo constituído e são formados pequenos ressaltos na parte interna e externa do tubo, os quais podem ser retirados imediatamente após o processo, dando um aspecto liso à superfície do tubo formado (TWI, 2015). Esse processo de soldagem é bastante eficiente e rápido, permitindo que tubos de parede fina sejam soldados a taxas elevadas de até centenas de metros por minuto (TWI, 2015).

Figura 13 – Processos de soldagem tipo HFW, (a) HF/ERW e (b) HFIW.



Fonte: Melo (2013).

2.5.1 A junta soldada

Para o caso de um aço ARBL, espera-se que a microestrutura da junta soldada apresente propriedades mecânicas similares às daquelas do MB (metal base), ou seja, tanto a ZF (zona fundida) quanto a ZTA (Zona Termicamente Afetada) devem ter propriedades similares a uma chapa que fora obtida através de laminação (WAINER, BRANDI, MELLO, 1992), contudo, isso nem sempre é possível. Existe uma série de problemas típicos, inerentes à soldagem, que podem afetar as propriedades mecânicas gerais da junta, como: ocorrência de porosidade, fissuração devido à presença de H (hidrogênio), decoesão lamelar, trincas a quente (ou de solidificação), baixa tenacidade da ZTA devido ao crescimento de grão, etc. (KOU, 2003; SORRIJA, 2016).

2.6 ESTATÍSTICA E PROBABILIDADE

Afim de aplicar a distribuição de Weibull, deve-se primeiro entender os conceitos básicos de Estatística, Probabilidade e Confiabilidade. A estatística como ferramenta pode ser dividida em duas principais, sendo elas a Descritiva e a Inferencial.

A Estatística Descritiva é a principal forma como é conhecida a estatística em geral, ou seja, um conjunto de valores numéricos que podem ser reunidos através de tabelas e gráficos onde é possível observar como se comportam cada uma das variáveis. As principais formas de representação da estatística descritiva são as tabelas de frequência, onde os valores são agrupados de acordo com o volume de dados para cada faixa de valores; Os gráficos, onde é feita uma representação num plano X-Y de modo os resultados serem de fácil análise visualmente; E os resumos numéricos que trazem informações relevantes como a variabilidade dos dados e a discrepância entre os máximos e mínimos (SPIEGEL, 1994).

Já a Estatística Inferencial tem o recurso de se tirar conclusões e escolher uma decisão a partir de amostras, ou seja, dados não completos. Em grande parte, isso é obtido através da probabilidade. Existem duas principais ferramentas de utilização da estatística inferencial sendo a Estimação, onde são utilizadas amostras para se estimar dados de acordo com o objetivo; e o teste de hipóteses, que elege uma determinada amostra e com isso levanta suposições para toda a sequência dos dados. Sendo a principal ferramenta da estatística inferencial, a probabilidade é definida como a frequência relativa em meio à sequência de dados como forma de se obter a parte incerta dessa sequência de forma quantificada (TOLEDO; OVALLE, 2008).

Utilizando a probabilidade como ferramenta estatística é necessário entender os conceitos de espaço amostral discreto e contínuo. É dado o nome espaço amostral discreto quando as amostras consistem em um número finito ou infinito contável de eventos gerando assim uma distribuição discreta que, da mesma forma, é baseada em um número contável de eventos. Por outro lado, é dado o nome espaço amostral contínuo quando as amostras consistem em todos os números reais de determinado intervalo gerando uma distribuição contínua que é definida por um número infinito de eventos (VIEIRA, 2008).

Analogamente, tem-se a definição de variável aleatória discreta e contínua, que associam de uma forma quantitativa para cada resposta de cada evento dependendo do seu objetivo de análise. A variável aleatória é chamada discreta quando é possível se contar ou enumerar os supostos valores. Para a variável aleatória contínua é dado esse nome quando os possíveis valores pertencem a um intervalo contínuo, sendo desta forma infinitos e, portanto, incontáveis. Geralmente utilizada para eventos únicos ou que dificilmente terão duplicatas (VIEIRA, 2008).

2.7 WEIBULL

Em 1939, o físico sueco Ernest Weibull apresentou um modelo estatístico de análise sobre fadiga de material que se tornou um dos mais úteis para este fim devido sua simples representação gráfica e determinação de parâmetros sólidos para as falhas, além de apresentar um modelo de riscos proporcionais. As principais vantagens do uso dessa distribuição são a facilidade de cálculo e aplicação, além de mensurar com alta confiança a aplicabilidade de determinado material (SAKIN e AY, 2008).

A distribuição de Weibull associa a probabilidade de falha de um material com o número aproximado de ciclos, divididos para cada faixa dos valores de tensão correspondentes. Desta forma, aplicada para um ensaio de fadiga, esta distribuição permite estimar a probabilidade de falha do material de acordo com sua vida útil quando este é submetido a esforços cíclicos em um nível de tensão simulando a operação real.

A análise de Weibull tem como alicerce a Função de Densidade de Probabilidade descrita na equação a seguir:

$$f(x) = \frac{b}{\alpha} \left(\frac{x}{\alpha}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta} \quad (1)$$

Sendo que:

$\alpha \geq 0$ e $\beta \geq 0$, onde α é o parâmetro de escala e β é o parâmetro de forma. A variável x corresponde ao número de ciclos suportado durante o ensaio.

Integrando a equação eq. (1), temos:

$$Ff(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta} \quad (2)$$

A função Ff indica a probabilidade de falha do corpo de prova. Portanto, relacionamos a confiabilidade (R_x) na eq. (3):

$$Ff(x) = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\alpha}\right)^\beta} \quad (3)$$

Portanto, a confiabilidade é tida como o complementar da probabilidade de falha. Considerando uma probabilidade de falha de 15%, $Ff(x) = 0,15$, temos que a confiabilidade é de 85%, $R_x = 0,85$.

Aplicando-se o logaritmo natural a ambas as igualdades na eq. (2), temos:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-Ff(x)}\right)\right) = \beta \ln(x) - \beta \ln(\alpha) \quad (4)$$

Linearizando a equação eq. (4), finalmente obtém-se os parâmetros α e β da distribuição de Weibull e chega-se na regressão linear apresentada a seguir:

$$Y = mX + c \quad (5)$$

Onde:

$$\alpha = e^{\frac{-c}{\beta}} \quad (6)$$

$$m = \beta \quad (7)$$

Para a curva de regressão linear tem-se que o parâmetro de forma (β) é o coeficiente angular da equação, sendo, portanto, adimensional e o parâmetro de escala (α) é a relação entre β e o coeficiente linear (CANEVAROLO, 2004).

A partir da eq. (2) e considerando $x = \alpha$ tem-se que $F_f(x) = 0,632$. Portanto, sendo o parâmetro de escala dimensionado pela mesma escala dos dados, no caso o número de ciclos, pode-se afirmar que o valor de α representa a vida útil para 36,8% de confiança, ou seja, o valor em que 63,2% das amostras apresentariam falha para um número de ciclos equivalente a α para a condição em que foi realizado o ensaio (BAZZANA, 2019).

Assim, o parâmetro de escala na distribuição de Weibull pode ser interpretado da seguinte maneira: quanto maior o valor de α , melhor é o desempenho do material nas condições ensaiadas em fadiga. Consequentemente, altos valores indicam que o material tem uma boa vida útil para dada tensão. Do ponto de vista do parâmetro de forma, β , quanto maior o valor menor a variabilidade na distribuição dos dados indicando uma maior confiabilidade nos resultados. Em geral, se β apresenta um valor superior a 1, pode-se inferir que o material é heterogêneo e possui boa confiabilidade (ORNAGHI e MEIER, 2012).

Analisando graficamente, quanto maior o valor para o parâmetro de forma, menor será o ângulo em relação ao eixo Y. De forma hipotética, uma curva estritamente vertical, a 90° com o eixo X, teria a maior confiabilidade possível. Uma maior inclinação em relação ao eixo vertical indicaria que o número de ciclos dos testes realizados está variando demais.

Em termos de estatística como ferramenta de análise, a confiabilidade é definida como a probabilidade de que um item retirado aleatoriamente de uma amostra desempenhe satisfatoriamente sua função para um dado período e dadas condições de operação (LAFRAIA, 2001).

De forma prática, se, por exemplo, a confiabilidade de determinado material para determinada condição é de 95%, significa que 5% das amostras vão apresentar falhas e o restante funcionará da forma desejada.

Para se obter os parâmetros de forma e de escala deve ser feita uma estimação a partir da observação de amostras. O método a ser utilizado neste projeto será o método dos mínimos quadrados, também conhecido como método gráfico de Weibull, por ser de cálculo relativamente simples e de fácil análise visual. Este é o método mais aplicado em pesquisas que envolvem análise de dados para experimentos até a falha variando pelo tempo (DILLENBURG, 2005).

A partir das eq. (4) e eq. (5) pode-se inferir que:

$$xi = \ln(ti) \quad (8)$$

$$yi = \ln \left(\ln \left(\frac{1}{1 - \frac{i}{n+1}} \right) \right) \quad (9)$$

sendo t a variável correspondente ao tempo até a falha, i a posição de iteração dos dados e n o número total de amostras.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL UTILIZADO

O material utilizado será um tubo de aço de grau API 5CT N80Q soldado por resistência elétrica de alta frequência (*High Frequency-Electric Resistance Welding/HF-ERW*) de $\varnothing 2\frac{1}{2}$ " x $\frac{3}{16}$ " de espessura de parede, do qual serão confeccionados corpos de prova para levantamento das curvas de fadiga.

3.2 CORTE E USINAGEM

Os tubos, como fornecidos pelo fabricante, foram inicialmente seccionados em trechos menores de maneira a facilitar as operações posteriores de corte e usinagem. Devido ao pequeno diâmetro dos tubos foi possível a realização dos cortes em serras hidráulicas disponíveis na Oficina Mecânica do Departamento de Materiais e Tecnologia (serra hidráulica marca Franho) e na Oficina Mecânica do CTI (serra hidráulica marca SRamos, modelo 260), ambos situados na FEG/UNESP. O procedimento de corte de um dos tubos com utilização de serra hidráulica é apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Tubo de aço API N80 tipo Q sendo seccionado com utilização de uma serra hidráulica da Oficina Mecânica do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP.

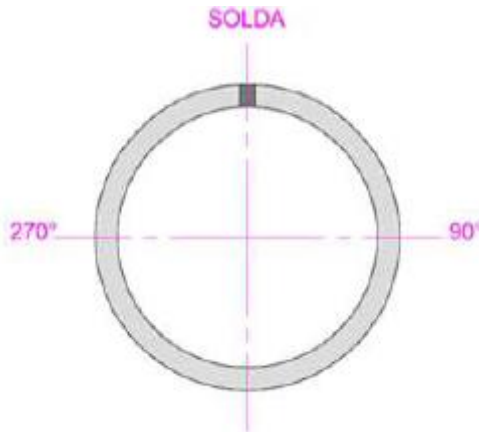


Fonte: Sorrija (2016).

Após o corte em trechos, os tubos foram divididos ao longo de sua direção circunferencial nas seguintes regiões de interesse: JS (junta soldada) e 90° (270°) como pode ser observado nas Figuras 15. As posições indicadas na Figura 15 servem como referência para o restante do trabalho, uma vez que os corpos de prova utilizados na avaliação das propriedades

mecânicas do tubo e as amostras utilizadas nas análises metalográficas foram retirados dos dois trechos apresentados.

Figura 15 - Esquema da seção transversal de um trecho de tubo e as respectivas seções de interesse ao longo da direção circunferencial.



Fonte: Sorrija (2016).

Após o corte dos trechos de tubos foi possível a usinagem dos corpos de prova de tração e fadiga via eletroerosão a fio em uma máquina marca +GF+ AgieCharmilles (com fio de eletroerosão de 0,18 mm de diâmetro) localizada na Oficina Mecânica do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP. O processo de usinagem por eletroerosão dos corpos de prova de tração pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Usinagem, via processo de eletroerosão a fio, dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 ENSAIOS DE FADIGA

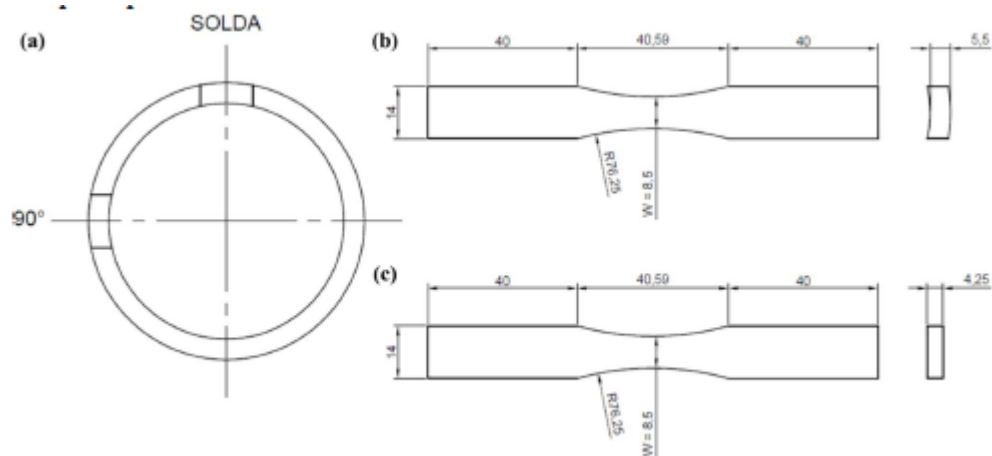
Os ensaios de fadiga foram realizados utilizando dois tipos de corpos de prova diferentes, não previstos pelas normas vigentes. Os corpos de prova do primeiro tipo são mais próximos aos corpos de prova padrão (normalizados) e, similarmente aos corpos de prova de tração, foram retirados dos trechos de tubo por eletroerosão de maneira a apresentarem seu comprimento alinhado com a direção longitudinal dos tubos (tanto para a posição de 90° quanto para a JS). Os corpos de prova do segundo tipo são simplesmente trechos de tubos em que há presença de entalhe (para efeito de concentração de tensões) realizado através de eletroerosão.

3.3.1 Ensaios de fadiga axiais

Os corpos de prova de fadiga utilizados nos ensaios axiais tiveram suas dimensões “baseadas” na norma ASTM E466 *Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*. A diferença entre os corpos de prova utilizados neste projeto em relação aos corpos de prova convencionais é relacionada à seção transversal utilizada. Os corpos de prova utilizados neste trabalho foram retirados, por eletroerosão, diretamente da parede dos tubos. Isto é: a espessura dos corpos de prova era equivalente à espessura de parede dos tubos. Os CDP's, devido a esse fato, eram levemente abaulados e, portanto, com geometria diferente daquela dos corpos de prova planos padrão (que têm

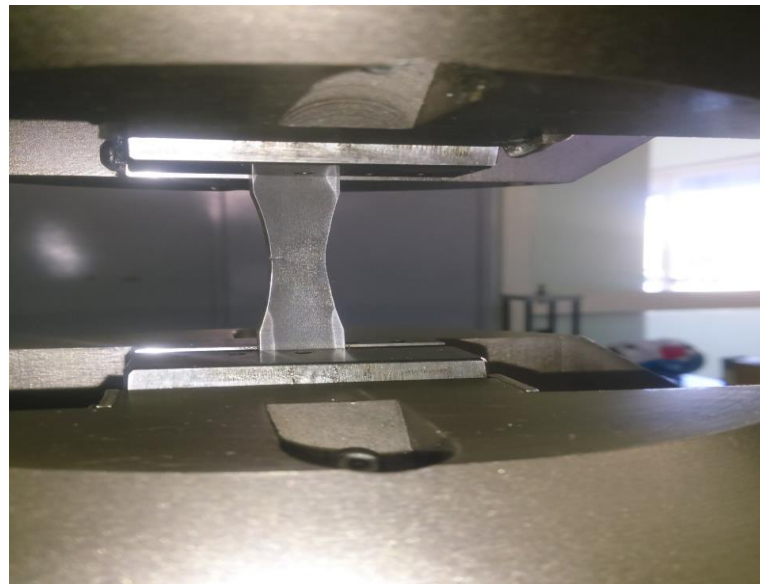
seção transversal retangular). As posições de retirada e uma comparação entre as dimensões dos corpos de fadiga padrão com os utilizados neste projeto podem ser observadas na Figura 17 e o ensaio de fadiga axial pode ser observado na Figura 18.

Figura 17 - Desenho indicando em (a) as posições angulares de onde foram retirados os corpos de prova, em (b) as dimensões dos corpos de prova utilizados nesse projeto e em (c) a geometria de um corpo de prova “convencional”.



Fonte: Sorrija (2016).

Figura 18 – Ensaio de fadiga axial do corpo de prova.



Fonte: Produção do próprio autor.

Neste trabalho foram utilizados corpos de prova com as geometrias abauladas e 90° plano para o estudo dos ensaios de fadiga com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$. Faltaram amostras para analisar a influência da vida em fadiga nos corpos de prova JS (junta soldada).

Os resultados obtidos através dos ensaios de fadiga se encontram nas tabelas a seguir, assim como as curvas S-N comparando-os às diferentes geometrias dos corpos de prova.

Tabela 1 – Dados dos corpos de prova abaulados com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$.

(continua)

Resultados dos ensaios de Fadiga Abaulado ($f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$)			
CPD	Tensão (MPa)	Nº de ciclos	Nº médio ($N \times 10^3$)
1	750	44309	38,1
2	750	43762	
3	750	35164	
4	750	29205	
5	700	79525	74,0
6	700	86369	
7	700	70309	
8	700	77746	
9	700	65438	
10	700	64761	
11	650	176853	147,6
12	650	155563	
13	650	149333	
14	650	144430	
15	650	111782	
16	625	155124	150,7
17	625	156704	
18	625	113137	
19	625	177912	
20	600	310018	215,6
21	600	245999	
22	600	188792	
23	600	104794	
24	600	228465	
25	575	786190	391,9
26	575	347095	
27	575	588998	
28	575	618101	
29	575	322702	
30	575	585097	
31	575	216293	
32	575	154545	
33	575	191982	
34	575	276781	

Tabela 1 – Dados dos corpos de prova abaulados com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$.

(conclusão)

Resultados dos ensaios de Fadiga Abugado ($f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$)			
CPD	Tensão (MPa)	Nº de ciclos	Nº médio ($N \times 10^3$)
35	575	444626	391,9
36	575	241184	
37	575	321622	
38	550	1000000	443,9
39	550	1000000	
40	550	172585	
41	550	356987	
42	550	587000	
43	550	481989	
44	550	312086	
45	550	271596	
46	550	345351	
47	550	206234	
48	550	165115	
49	550	427936	
50	500	1000000	692,3
51	500	405250	
52	500	1000000	
53	500	786832	
54	500	659550	
55	500	1000000	
56	500	380085	
57	500	306788	

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 2 – Dados dos corpos de prova 90° Plano com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$.

(continua)

Resultados dos ensaios de Fadiga 90° Plano ($f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$)			
CDP	Tensão (MPa)	Nº de ciclos	Nº médio ($N \times 10^3$)
1	750	49606	56,0
2	750	45324	
3	750	63595	
4	750	64400	
5	750	57012	
6	700	119839	109,3

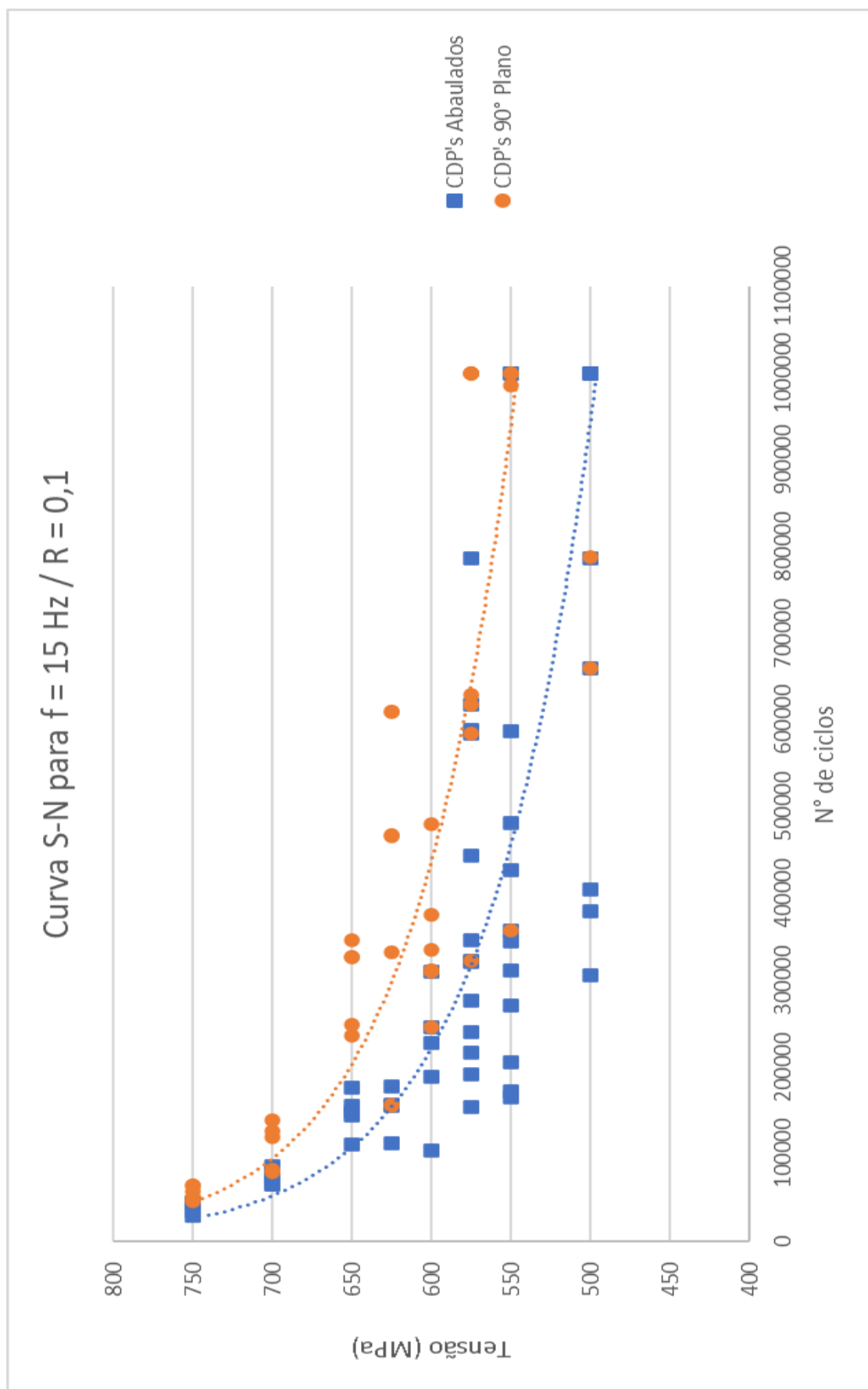
Tabela 2 – Dados dos corpos de prova 90° Plano com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$.

(conclusão)

Resultados dos ensaios de Fadiga 90° Plano ($f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$)			
CDP	Tensão (MPa)	N° de ciclos	N° médio ($N \times 10^3$)
7	700	126095	109,3
8	700	82455	
9	700	138435	
10	700	79519	
11	650	249070	297,1
12	650	236005	
13	650	326743	
14	650	346011	
15	650	327675	
16	625	155191	364,8
17	625	157022	
18	625	467344	
19	625	466038	
20	625	610001	
21	625	332964	
22	600	376245	338,8
23	600	480004	
24	600	245979	
25	600	310168	
26	600	312077	
27	600	311998	
28	600	335206	
29	575	584999	769,5
30	575	618001	
31	575	323008	
32	575	1000000	
33	575	629765	
34	575	1000000	
35	575	1000000	
36	575	1000000	
37	550	1000000	835,7
38	550	356996	
39	550	1000000	
40	550	985894	
41	500	788683	724,4
42	500	660050	

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 19 – Curva S-N para diferentes geometrias dos CDP's com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$.



Fonte: Produção do próprio autor.

As rupturas por fadiga surgem muitas vezes na superfície da estrutura, pois é onde a tensão de forças externas é maior. Por esse motivo muitos estudos foram realizados relacionando a vida em fadiga e o acabamento superficial do corpo de prova.

Em 1921, os engenheiros Moore e Kommers realizaram um estudo, publicado alguns anos depois como *An Investigation of The Fatigue of Metals*, a fim de se mensurar o efeito do acabamento na resistência à fadiga utilizando para análise dois aços com diferentes teores de carbono e cinco níveis de acabamento distintos. Deste estudo, concluíram que o limite de resistência apresenta um ligeiro aumento para um alto polimento em relação ao polimento padrão. Além disso, perceberam que superfícies mais rugosas reduzem o limite de resistência de 10 a 15% (VOORWALD, 1983).

Em outro estudo realizado mais tarde pelo pesquisador Caswell, obteve-se reduções de até 26% nos limites de resistência à fadiga quando o polimento era feito de forma perpendicular aos eixos de tensão. Esse resultado pode ser explicado pelo fato de a preparação superficial induzir tensões compressivas na superfície de forma a reduzir a velocidade de propagação de trinca, evitando a nucleação e a posterior fratura por fadiga (VOORWALD, 1983).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 APLICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Para obter os parâmetros de forma (β) e escala (α) a partir do método dos mínimos quadrados precisa-se traçar as curvas de regressão linear utilizando os dados das tabelas apresentadas anteriormente. Para isso utiliza-se o software Microsoft Excel para simplificar os cálculos para as 2 tabelas e traçar as curvas de maneira satisfatória.

Utilizando a eq. (8) e sabendo que t é a variável que corresponde ao tempo até a falha, pode-se obter a equação correspondente ao eixo X. Sendo o número de ciclos até a falha (Nf) a variável do nosso estudo referente ao tempo, tem-se:

$$X = \ln(Nf) \quad (10)$$

Da mesma forma, utilizando a eq. (9) pode-se obter a equação correspondente ao eixo Y. No denominador da eq. (9) tem-se a probabilidade acumulada de falha estimada. Para este caso, pode-se adotar a aproximação de Benard da Posição Mediana (PM):

$$PM = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} \quad (11)$$

onde i é a posição em série do resultado do ensaio número de série falha e n é o número total de amostras. Assim, tem-se:

$$y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - PM}\right)\right) \quad (12)$$

Em posse dessas equações fazem-se o seguinte procedimento:

- I. Exclui-se aleatoriamente faixas de tensão de cada tabela até restarem 6 faixas de modo a padronizar o processo.
- II. Exclui-se também aleatoriamente valores de Nf até restarem 5 valores para cada faixa de tensão, também para a padronização do processo.

- III. Em seguida, para cada faixa de tensão, ordenam-se de forma crescente os valores de Nf numa única coluna.
- IV. Na coluna ao lado, incluem-se números de 1 a 5 também de forma crescente representando a posição do dado perante a amostra.
- V. Ao lado calcula-se a posição média (PM) conforme a eq. (11), sendo i a posição adotada no passo anterior e n o número de amostras para a faixa de tensão, que para o caso é 3.
- VI. Calcula-se o valor correspondente ao eixo Y através da eq. (12).
- VII. Calcula-se o valor correspondente ao eixo X através da eq. (10).

Em posse desses valores, traçam-se as curvas de dispersão através do Excel em escala logarítmica e inserimos a linha de tendência de característica linear. A partir das linhas de tendência, obtemos as equações das retas e através das eq. (5), eq. (6) e eq. (7) obtemos os valores de α e β .

Os resultados são apresentados nas tabelas a seguir:

Tabela 3 – cálculos dos parâmetros de Weibull para corpos de prova abaulados com $f = 15 \text{ Hz}$
/ $R = 0,1$.

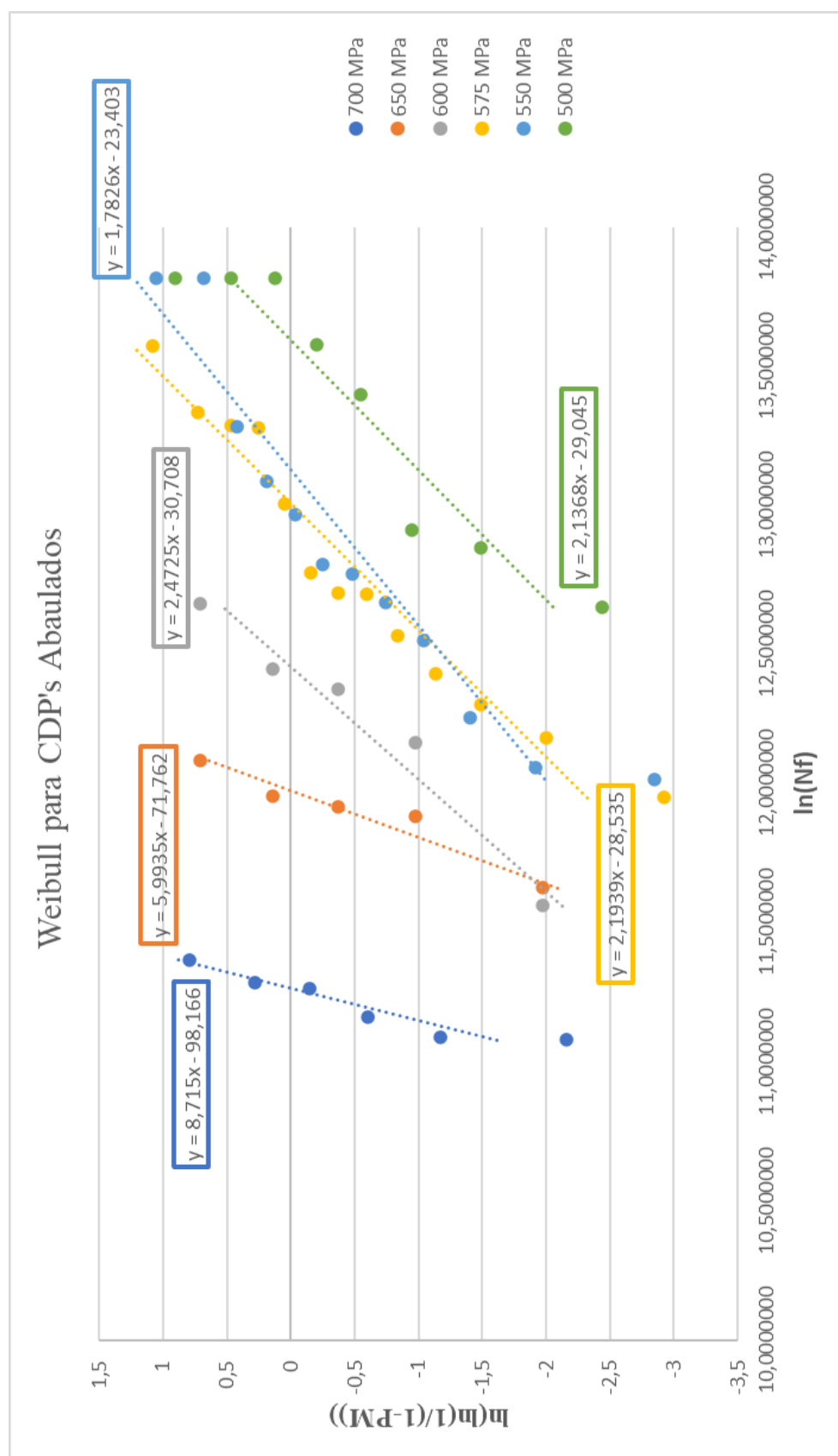
CDP's Abaulados ($f = 15 \text{ Hz} / R = 0,1$)				(continua)				
Tensão (MPa)	Nf	Posição	PM	$\ln(\ln(1/(1-PM)))$	$\ln(Nf)$	Alpha	C	Beta
700	64761	1	0,109375	-2,155616006	11,0784511	77499,56	-98,17	8,72
	65438	2	0,265625	-1,175270415	11,08885841			
	70309	3	0,421875	-0,601543551	11,16065509			
	77746	4	0,578125	-0,147287035	11,26120238			
	79525	5	0,734375	0,281917795	11,28382672			
	86369	6	0,890625	0,794336831	11,36638699			
650	111782	1	0,1296296	-1,974458694	11,62430135	158467,44	-71,76	5,99
	144430	2	0,3148148	-0,972686141	11,88055024			
	149333	3	0,5	-0,366512921	11,91393566			
	155563	4	0,6851852	0,144767396	11,95480607			
	176853	5	0,8703704	0,714455486	12,08307416			
600	104794	1	0,1296296	-1,974458694	11,55974941	247661,46	-30,71	2,47
	188792	2	0,3148148	-0,972686141	12,14839851			
	228465	3	0,5	-0,366512921	12,33913721			
	245999	4	0,6851852	0,144767396	12,41308275			
	310018	5	0,8703704	0,714455486	12,64438645			
575	154545	1	0,0522388	-2,925223234	11,94823736	430510,62	-28,54	2,20
	191982	2	0,1268657	-1,99756029	12,1651569			
	216293	3	0,2014925	-1,491606142	12,2843904			
	241184	4	0,2761194	-1,129704207	12,39331333			
	276781	5	0,3507463	-0,839487848	12,53098096			
	321622	6	0,4253731	-0,59052854	12,68113144			
	322702	7	0,5	-0,366512921	12,6844838			
	347095	8	0,5746269	-0,156901171	12,75735308			
	444626	9	0,6492537	0,046589839	13,00498876			

Tabela 3 – cálculos dos parâmetros de Weibull para corpos de prova abaulados com $f = 15 \text{ Hz}$
/ $R = 0,1$.

CDP's Abulados ($f = 15 \text{ Hz} / R = 0,1$)				(conclusão)				
Tensão (MPa)	Nf	Posição	PM	$\ln(\ln(1/(1-PM)))$	$\ln(Nf)$	Alpha	C	Beta
575	585097	10	0,7238806	0,252253233	13,27953292	430510,62	-28,54	2,20
	588998	11	0,7985075	0,47125468	13,28617764			
	618101	12	0,8731343	0,724949317	13,33440756			
	786190	13	0,9477612	1,082459075	13,57495345			
550	165115	1	0,0564516	-2,845458285	12,01439748	511993,61	-23,40	1,78
	172585	2	0,1370968	-1,914247621	12,05864515			
	206234	3	0,2177419	-1,404170849	12,23676673			
	271596	4	0,2983871	-1,037403987	12,51207095			
	312086	5	0,3790323	-0,741337623	12,65103327			
	345351	6	0,4596774	-0,485175833	12,75231657			
	356987	7	0,5403226	-0,252018579	12,78545395			
	427936	8	0,6209677	-0,03032111	12,96672951			
	481989	9	0,7016129	0,190094315	13,08567605			
	587000	10	0,7822581	0,421630212	13,28278052			
	1000000	11	0,8629032	0,686660297	13,81551056			
	1000000	12	0,9435484	1,055834013	13,81551056			
500	306788	1	0,0833333	-2,441716399	12,63391142	786042,67	-29,05	2,14
	380085	2	0,202381	-1,486670964	12,84814888			
	405250	3	0,3214286	-0,947354424	12,91225821			
	659550	4	0,4404762	-0,543574052	13,39931306			
	786832	5	0,5595238	-0,198574256	13,57577004			
	1000000	6	0,6785714	0,12661497	13,81551056			
	1000000	7	0,797619	0,468504666	13,81551056			
	1000000	8	0,9166667	0,910235093	13,81551056			

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 20 – Curvas de regressão linear para corpos de prova abaulados com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$.



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 4 – cálculos dos parâmetros de Weibull para corpos de prova 90° Plano com $f = 15 \text{ Hz}$
/ $R = 0,1$.

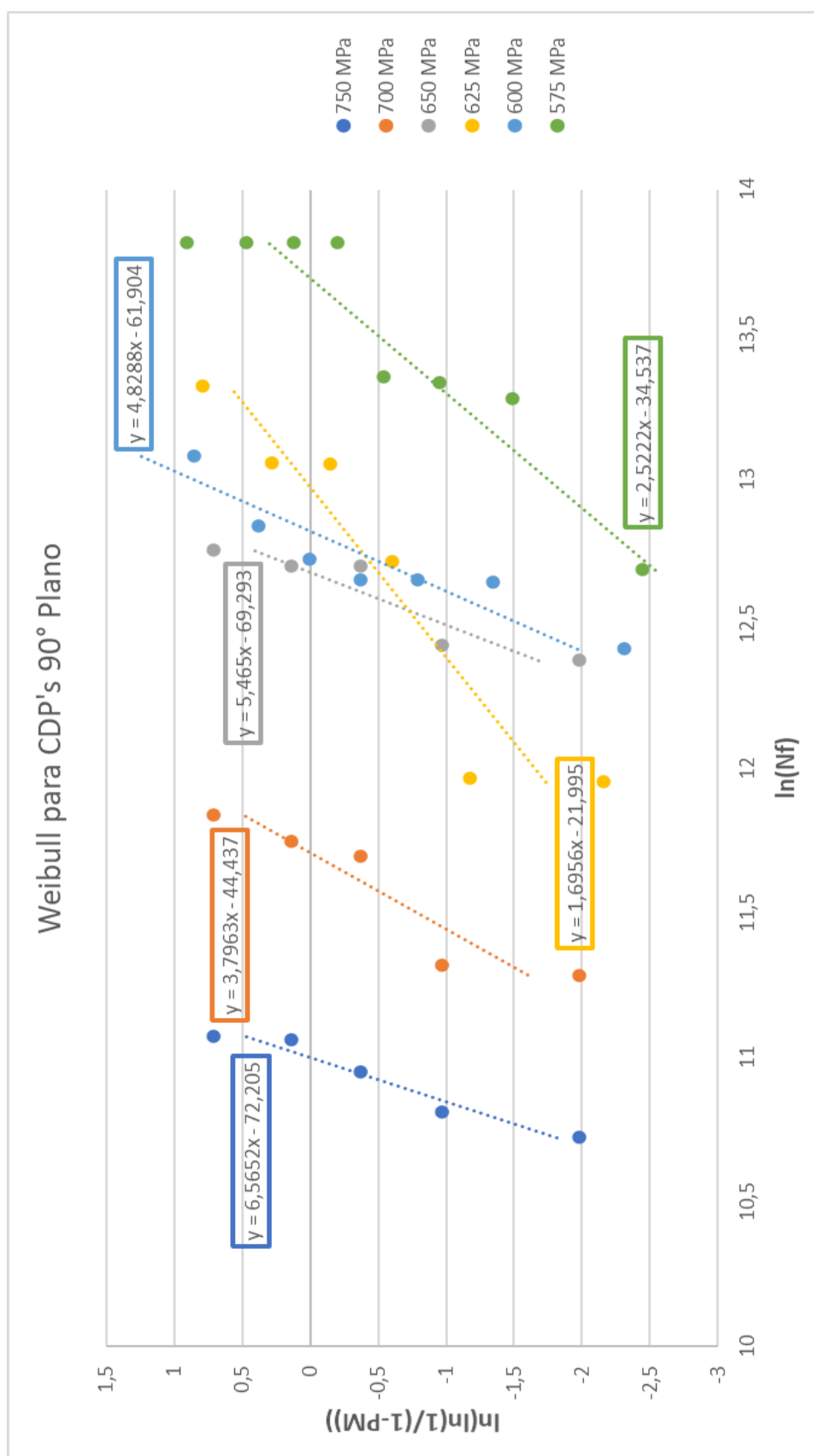
CDP's 90° Plano ($f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$)				(continua)				
Tensão (MPa)	Nf	Posição	PM	$\ln(\ln(1/(1-PM)))$	$\ln(Nf)$	Alpha	C	Beta
750	45324	1	0,1296296	-1,974458694	10,7215975	59762,98	-72,21	6,57
	49606	2	0,3148148	-0,972686141	10,811862			
	57012	3	0,5	-0,366512921	10,9510171			
	63595	4	0,6851852	0,144767396	11,0602901			
	64400	5	0,8703704	0,714455486	11,0728689			
700	79519	1	0,1296296	-1,974458694	11,2837481	121217,86	-44,44	3,80
	82455	2	0,3148148	-0,972686141	11,3200049			
	119839	3	0,5	-0,366512921	11,6939024			
	126095	4	0,6851852	0,144767396	11,7447909			
	138435	5	0,8703704	0,714455486	11,8381562			
650	236005	1	0,1296296	-1,974458694	12,3716083	321070,00	-69,29	5,47
	249070	2	0,3148148	-0,972686141	12,4254893			
	326743	3	0,5	-0,366512921	12,6969284			
	327675	4	0,6851852	0,144767396	12,6997768			
	346011	5	0,8703704	0,714455486	12,7542251			
625	155191	1	0,109375	-2,155616006	11,9524119	417139,71	-22,00	1,70
	157022	2	0,265625	-1,175270415	11,9641412			
	332964	3	0,421875	-0,601543551	12,7157889			
	466038	4	0,578125	-0,147287035	13,0520214			
	467344	5	0,734375	0,281917795	13,0548209			
	610001	6	0,890625	0,794336831	13,3212155			
600	245979	1	0,0945946	-2,308880127	12,4130014	367962,01	-61,9	4,83
	310168	2	0,2297297	-1,343181902	12,6448694			
	311998	3	0,3648649	-0,789839834	12,6507529			
	312077	4	0,5	-0,366512921	12,651006			

Tabela 4 – cálculos dos parâmetros de Weibull para corpos de prova 90° Plano com $f = 15 \text{ Hz}$
/ $R = 0,1$.

CDP's 90° Plano ($f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$)				(conclusão)				
Tensão (MPa)	Nf	Posição	PM	$\ln(\ln(1/(1-PM)))$	$\ln(Nf)$	Alpha	C	Beta
600	335206	5	0,6351351	0,00819456	12,7224998	367962,01	-61,9	4,83
	376245	6	0,7702703	0,385841654	12,8379958			
	480004	7	0,9054054	0,85787951	13,0815492			
575	323008	1	0,0833333	-2,441716399	12,6854316	896585,74	-34,54	2,52
	584999	2	0,202381	-1,486670964	13,2793654			
	618001	3	0,3214286	-0,947354424	13,3342454			
	629765	4	0,4404762	-0,543574052	13,353102			
	1000000	5	0,5595238	-0,198574256	13,8155106			
	1000000	6	0,6785714	0,12661497	13,8155106			
	1000000	7	0,797619	0,468504666	13,8155106			
	1000000	8	0,9166667	0,910235093	13,8155106			

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 21 – Curvas de regressão linear para corpos de prova 90° Plano com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$.



Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE FORMA

Através dos gráficos construídos podem-se fazer uma análise em relação aos parâmetros de forma e o parâmetro de escala. Pela inclinação de reta das curvas conseguem-se avaliar a homogeneidade do material dos corpos de prova. Quando as curvas para as diferentes faixas de tensão são semelhantes, significa uma menor dispersão dos resultados obtidos dos ensaios. Quanto mais inclinada for a reta, ou seja, quanto maior a tendência para uma reta vertical, melhor é a confiabilidade, mais homogêneo e menos vulnerável ao surgimento das trincas é o material.

Tendo essas informações como referência, é possível identificar qual tipo de geometria do corpo de prova altera menos o seu comportamento quanto à vida em fadiga em relação ao carregamento aplicando a variância de valores β para as diferentes tensões. Pode-se identificar a geometria com melhor confiabilidade dos resultados obtidos, maior homogeneidade e menos suscetível a trinca aplicando a média aritmética dos valores de parâmetro de forma.

Além disso, visto que todos os valores do parâmetro de forma (β) foram superiores a 1 representa uma melhor confiabilidade da distribuição de Weibull e um material mais homogêneo e menos vulnerável ao surgimento das trincas.

Tabela 5 – Parâmetro de forma por nível de tensão para corpos de prova abaulados.

Tensão (MPa)	Beta
700	8,72
650	5,99
600	2,47
575	2,20
550	1,78
500	2,14

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 6 – Parâmetro de forma por nível de tensão para corpos de prova 90° Plano.

Tensão (MPa)	Beta
750	6,57
700	3,80
650	5,47
625	1,70
600	4,83
575	2,52

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 7 – Variância de β por geometria.

Geometria	Variância de β
Abaulado	8,03
90° Plano	3,36

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 8 – Média de β por geometria.

Geometria	Média de β
Abaulado	3,88
90° Plano	4,15

Fonte: Produção do próprio autor.

Sendo que quanto mais próximo de 0 for a variância, menor é a variação dos valores em relação à média, portanto, neste trabalho uma variância mais baixa significa uma menor alteração do comportamento do material em fadiga para cada faixa de tensão aplicada. Através da análise da Tabela 5, concluem-se que a condição que altera menos seu comportamento quanto a geometria do material é o corpo de prova 90° Plano.

Quanto maior a média de β , maior é a confiabilidade dos resultados obtidos devido uma menor dispersão de resultados de número de ciclo do ensaio. Além do mais, será menos suscetível ao crescimento de trincas e terá uma maior homogeneidade. Observando a Tabela 6 concluem-se que o corpo de prova com geometria 90° Plano apresenta uma maior confiabilidade em relação ao corpo de prova com geometria abaulada.

4.3 APLICAÇÃO DA CONFIABILIDADE NAS CURVAS S-N

Manipulando as eq. (2) e eq. (3), contendo os parâmetros de forma e de escala, pode-se chegar a uma equação em que se consegue calcular o número de ciclos de determinado material para uma confiabilidade esperada:

$$N_{\text{ciclos}} = \alpha \sqrt[\beta]{-\ln(Rx)} \quad (13)$$

Sendo a variável R_x simbolizada pela confiabilidade. Com essa equação, pode-se finalmente identificar qual a condição de geometria do corpo de prova mais resistente à fadiga.

Escolhendo uma confiabilidade de 95%, foram calculados os números de ciclos para as duas geometrias e na sequência foram traçadas as curvas S-N comparando os resultados por geometria de cada corpo de prova do material.

Tabela 9 – Número de ciclos por tensão para CDP's Abaulados com 95% de confiabilidade.

CDP's Abaulados (f = 15 Hz / R = 0,1)	
Tensão (MPa)	N (95%)
700	55128
650	96542
600	74498
575	111596
550	96512
500	196187

Fonte: Produção do próprio autor.

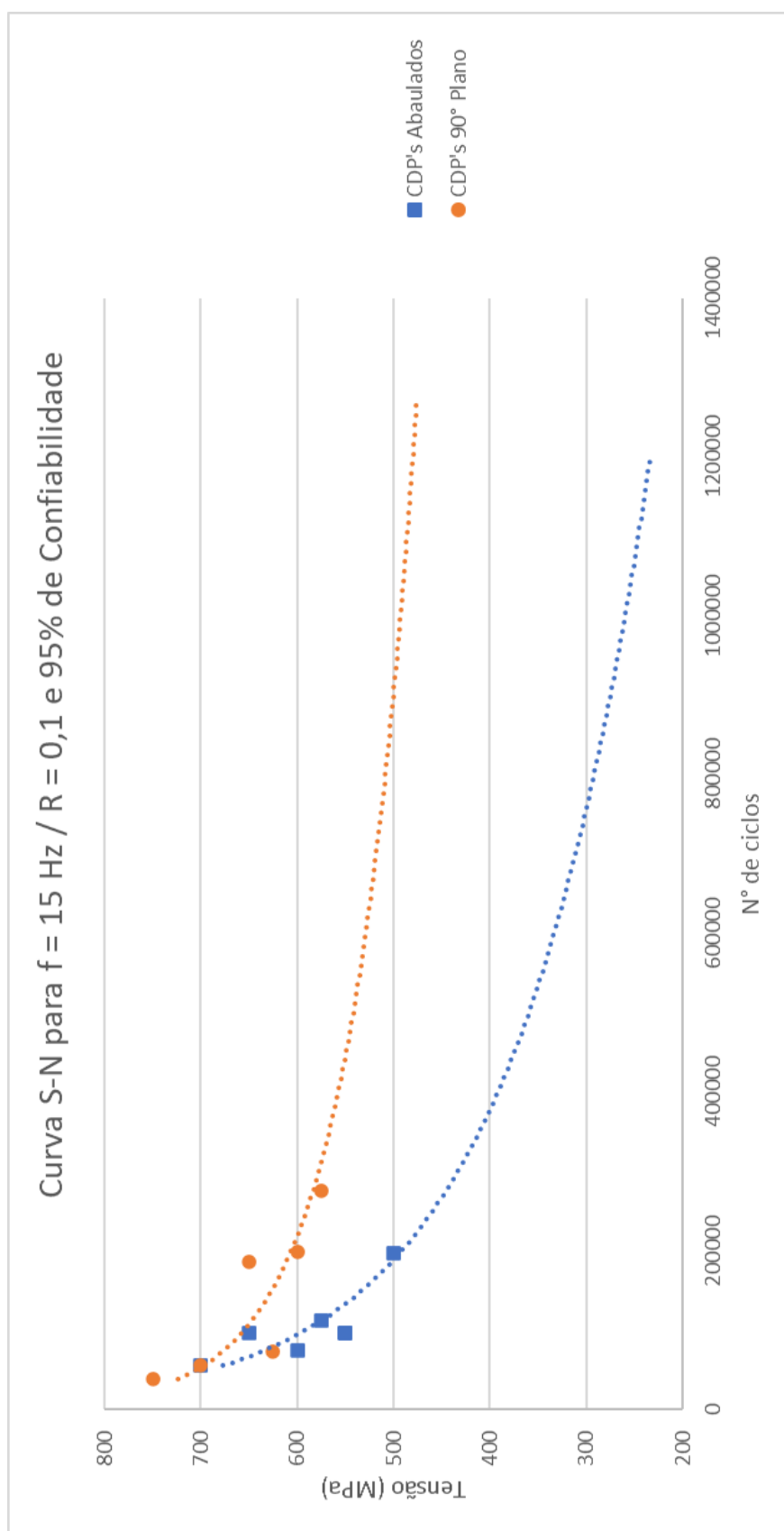
Tabela 10 – Número de ciclos por tensão para CDP's 90° Plano com 95% de confiabilidade.

CDP's 90° Plano (f = 15 Hz / R = 0,1)	
Tensão (MPa)	N (95%)
750	38015
700	55434
650	186450
625	72693
600	198946
575	275874

Fonte: Produção do próprio autor.

Abaixo é apresentada a curva S-N para uma confiabilidade de 95%:

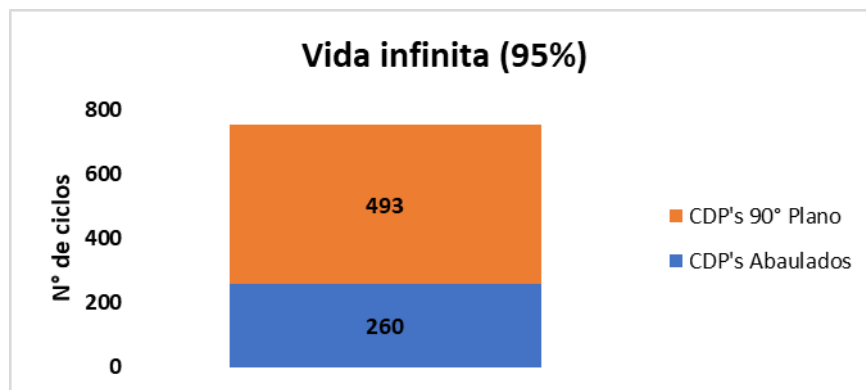
Figura 22 – Curva S-N para diferentes geometrias dos CDP's com $f = 15 \text{ Hz}$ / $R = 0,1$ e 95% de confiabilidade.



Fonte: Produção do próprio autor.

Através da curva S-N da figura 22, pode-se estabelecer um determinado número de ciclos para comparar as tensões suportadas e assim determinar qual das duas geometrias tem melhor resistência à fadiga. Analisara-se as curvas para a vida infinita, ou seja, 10^6 ciclos, dessa forma encontrará a tensão de carregamento em vida infinita para cada geometria com uma confiabilidade de 95%. Inserindo os dados calculados em uma tabela e aplicando um gráfico de barras podem-se realizar as seguintes comparações:

Figura 23 – Gráfico de barras dos valores das tensões (MPa) para cada seção transversal.



Fonte: Produção do próprio autor.

O gráfico de barras da figura 23 mostra os valores das tensões para a vida infinita para cada tipo de corpo de prova, facilitando comparar os resultados de forma visual. A maior tensão para a vida infinita foi de 493 MPa com o Aço API 5CT N80Q com o corpo de prova na geometria 90° Plano. A menor tensão para a vida infinita foi de 260 MPa com o Aço API 5CT N80Q com o corpo de prova na geometria abaulado. Uma alta diferença de 89,6%.

Fica comprovado com os resultados obtidos que, dentre todas as análises, quanto mais plana for a seção transversal do corpo de prova, maior é a resistência à fadiga. Da mesma forma, com uma baixa diferença na relação entre as tensões, quanto mais abaulado for a seção transversal do corpo de prova, menor a resistência à fadiga.

Os gráficos construídos com 95% de confiabilidade nos possibilitam realizar uma comparação com as curvas S-N traçadas antes da realização da Distribuição de Weibull. Pode-se observar uma redução significativa no número de ciclos e nas tensões de operação quando aplicada a confiabilidade de 95% para todas as condições. Dessa forma, permite-se concluir que utilizando como base apenas a curva S-N, sem nenhum tratamento de confiabilidade, os resultados são mais suscetíveis a falhas fora do tempo previsto.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho comprova a importância que a seção transversal dos corpos de prova do Aço API 5CT N80Q exercem sobre o comportamento da vida em fadiga deste material em suas aplicações. Considerando a vida infinita, a tensão suportada pelo melhor resultado é 89,6% maior comparando ao pior resultado. Portanto, chegamos as seguintes afirmações:

- Quanto mais plano for a seção transversal do corpo de prova do material, melhor a vida em fadiga, ou seja, maior resistência à fadiga para um determinado número de ciclos ou mais ciclos são suportados para uma determinada tensão;
- Os corpos de prova com seção transversal 90° Plano apresentam uma menor dispersão dos resultados obtidos dos ensaios para as diferentes faixas de tensão aplicadas, ou seja, tem uma menor alteração do comportamento do material em fadiga;
- Os corpos de prova com seção transversal 90° Plano possuem uma menor dispersão de resultados de número de ciclo do ensaio, portanto, apresentam uma maior confiabilidade nos resultados obtidos, menos suscetíveis ao crescimento de trincas e terão uma maior homogeneidade;
- A Distribuição de Weibull se apresentou como uma ferramenta de análise estatística muito eficiente, obtendo resultados adequados mesmo para uma alta confiabilidade, visto que todos os valores do parâmetro de forma (β) foram superiores a 1;
- De acordo com o trabalho realizado, o material que apresenta o melhor comportamento de vida em fadiga, ou seja, maior resistência à fadiga para um determinado número de ciclos, dentre os analisados, será o Aço API 5CT N80Q com seção transversal 90° Plano;
- A aplicação da confiabilidade nas curvas S-N por Distribuição de Weibull é mais indicada para projetos e operações quando comparada à curva S-N convencional, pois os resultados possuem maior precisão e são menos suscetíveis a falhas fora do tempo previsto.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR: 6162/88**. Rio de Janeiro: ABNT, 1988.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Salt Lake City: LTC, 1999.

CALLISTER JÚNIOR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentals for materials science and engineering: an integrated approach**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

CALLISTER JÚNIOR, W. D. **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais: uma abordagem integrada**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

CANEVAROLO, S. V. **Técnicas de caracterização de polímeros**. São Paulo: Artliber, 2004.

DILLENBURG, M. R. **Estimativas de confiabilidade de produto a partir das contagens mensais de vendas e falhas ao longo do período de garantia**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Qualidade) – UFRS, Porto Alegre, 2005.

ECHARD, B.; GAYTON, N.; BIGNONNET, A. **International Journal of Fatigue**. A reliability analysis method for fatigue design. 2013.

ENG BRASIL. **Aula 28: ipa**. Disponível em: <http://www.engbrasil.eng.br/ipa/aula28.pdf>. Acesso em: 10 set. 2021.

ENSUS. **Fadiga**. Disponível em: <http://ensus.com.br/fadiga/>. Acesso em: 27 ago. 2021.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

GGD METALS. **SAE 4340**. Disponível em: <http://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-4340/>. Acesso em: 10 maio 2017.

GENIECVL. **Article avril 2013**. Disponível em: <http://www.geniecvl.com/wordpress/wp-content/upcharges/2013/03/article-avril-2013-18.png>. Acesso em: 24 ago. 2021.

GODOY, J. M. **Estudo da ocorrência de trinca por fadiga em tubos de aço soldados, devido ao transporte**. 2008. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

GORNI, A. A.; SILVEIRA, J. H. D.; REIS, J. S. S. Metalurgia dos aços microligados usados na fabricação de tubos soldados com grande diâmetro. **Tubo e Companhia**, ano vi, n. 56, p.52-63, set-out. 2009.

HOPKINS, P. **Oil and gas pipelines: yesterday and today**. Disponível em: http://www.engr.mun.ca/~spkenny/Courses/Undergraduate/ENGI8673/Reading_List/2007_Hopkins.pdf. Acesso em: 28 jul. 2015.

JAMES, M. N. Fracture-safe and fatigue-reliable structures. **Frattura ed Integrità Strutturale**, Port Elizabeth v. 8, n. 30, p. 293-303, out. 2014. Disponível em: <http://www.gruppofrattura.it/pdf/fig/numero30/#>. Acesso em: 13 maio 2015.

KOU, S. **Welding metallurgy**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

KRAUSPENHAR, T. L. **Avaliação da resistência à corrosão-fadiga do aço API 5CT P110 em meio aquoso salino contendo H₂S**. 2012. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia, área de concentração: ciência dos materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LEE, P. E. J. **Introduction to offshore pipelines and risers**. Houston: 2007.

LIASCH, J. **Quanto tempo dura um avião comercial**. Disponível em: <http://www.culturaaeronautica.blogspot.com.br/2011/10/quanto-tempo-dura-um-avião-comercial.html>. Acesso em: 12 set. 2021.

LIM, K. T.; TELLIER, E.; HOWELLS, H. W. **Conductor and casing fatigue causes and mitigation**. Disponível em: <http://www.2hoffshore.com/documents/papers/02a0d008fddfea4d577adb6cb009c4ab-2012-DOT-Wellhead-Conductor-and-Casing-Fatigue-Causes-and Mitigation.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2015.

LOURENÇO, N. J.; GRAÇA, M. L. A.; SILVA, O. M. M.; FRANCO L. A. L. CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 22., 2016, Natal. **Anais [...]**. Natal, RN: CBECiMat, 2016.

METROLOGIA E MEDIÇÕES. **Ensaaios destrutivos**. Disponível em: <https://metrologiaemedicoes.wordpress.com/2018/08/05/ensaaios-destrutivos/>. Acesso em: 21 ago. 2021.

PETROBRÁS – **Petróleo Brasileiro S/A**. Disponível em: <http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/destaques-operacionais/producao/producaomensal-de-oleo-e-gas-natural-brasil-e-internacional/producao-mensal-de-oleo-e-gas-natural-brasil-e-internacional.htm>. Acesso em: 01 fev. 2015.

PILKEY, W. D. **Peterson's stress concentration factors**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1997.

PNGTUBE. **Types of structures in civil engineering**. Disponível em: https://www.pngtube.com/viewm/ixmiwm_beam-types-of-structures-in-civil-engineering/. Acesso em: 20 ago. 2021.

POOK, L. **Metal fatigue: what is it, why it matters**. Dordrecht: Springer, 2007.

RANKINE, W. J. M. On the causes of the unexpected breakage of the journals of railway axles; and on the mean of preventing such accidents by observing the law of continuity in their construction. **Journal of the Franklin Institute**, v. 36, n. 3, p. 178-180, set. 1843.

RENPU, W. **Advanced well completion engineering**. Waltham: Gulf Professional Publishing (imprinting of Elsevier), 2011.

RIBEIRO, P. A. R. **Desprendimento de vórtices e controle em esteira de cilindros por simulação numérica direta**. 2002. 94 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

RIVA, I. R. **Análise de fadiga de estruturas metálicas com ênfase em offshore**. 2004. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

RODRIGUES, V. C. **Análise de fadiga em risers submetidos a vibrações induzidas por desprendimento de vórtices (VIV)**. 2011. 176 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SORRIJA, B. A. **Análise da resistência à fadiga de tubos de aço API 5CT N80 Tipo Q soldados via processo de indução magnética de alta frequência (HFIW)**. 2016. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

TOLEDO, G. L.; OVALLE, I. I. **Estatística básica**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

VIEIRA, S. **Elementos de estatística**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

VOORWALD, H. J. C. **Análise sobre a influência de algumas variáveis no comportamento em fadiga por flexão rotativa em aços ABNT-4140 e ABNT-4340**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - ITA, São José dos Campos, 1983.