



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá

PALOMA RAIMUNDA ARAÚJO

**Avaliação da tenacidade Charpy-V de um tubo de aço API 5CT N80Q
temperado e revenido a 200°C**

Guaratinguetá - SP

2023

Paloma Raimunda Araújo

**Avaliação da tenacidade Charpy-V de um tubo de aço API 5CT N80Q
temperado e revenido a 200°C**

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

Guaratinguetá - SP

2023

A663a	Araújo, Paloma Raimunda Avaliação da tenacidade Charpy-V de um tubo de aço API 5CT N80Q temperado e revenido a 200°C / Paloma Raimunda Araújo - Guaratinguetá, 2023. 64 f : il. Bibliografia: f. 61-64 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023. Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento 1. Aço de alta resistência. 2. Ligas de aço. 3. Aço - Tratamento térmico. I. Título. CDU 669.14
-------	--

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE CHARPY-V DE UM TUBO DE AÇO API 5CT
N80Q TEMPERADO E REVENIDO A 200°C**

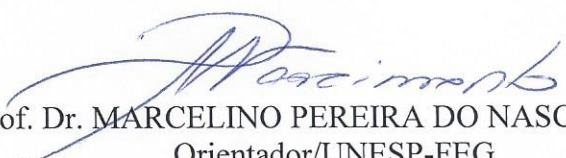
PALOMA RAIMUNDA ARAÚJO

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

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

Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. FERNANDO HENRIQUE MAYWORM DE ARAUJO
UNESP-FEG


Eng. RODRIGO ANDRADE GODOI
Membro Externo

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por sua força invisível ter me permitido concluir a graduação. Por me permitir sentir a sua presença em todos os momentos de turbulência e por ter me dado forças inúmeras vezes para continuar. Obrigada, Deus.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento, pelo auxílio técnico, por sempre estar disposto a me auxiliar e pela sua orientação.

Aos meus familiares por todo apoio e incentivo.

Aos meus amigos Amira Ahmad Abou Hamia, Jéssica Porfirio Dionizio e Regina Franciélle Silva Paulino por tornarem essa caminhada mais leve e por todo apoio durante a graduação.

Ao meu noivo, Henrique Yuji Sugimoto, que sempre me incentivou, apoiou e acreditou em mim em todos os momentos.

Aos Eng. Rodrigo Andrade Godoi e Prof. Dr. Fernando Henrique Mayworm de Araújo que juntos ao meu professor orientador compuseram a banca de defesa.

À empresa Apolo Tubulars S.A., pela doação dos tubos de aço API N80Q que possibilitaram a realização desse trabalho.

À UNESP pelo ensino de excelência e por todas as oportunidades oferecidas.

“La culture ne s’hérite pas, elle se conquiert”

André Malraux

RESUMO

A demanda por combustíveis fósseis oriundos do petróleo vem crescendo ao longo dos anos em consequência da procura dessa fonte de energia pela sociedade. O petróleo e o gás natural juntos respondem por mais da metade da demanda energética mundial. Para atender essa demanda têm sido requeridos e realizados altos investimentos em pesquisas de limites operacionais de transportes por gasodutos no mundo e no desenvolvimento de tecnologias que permitam a exploração e prospecção de petróleo em ambientes cada vez mais severos como o ambiente *offshore*. Parte dos desenvolvimentos tecnológicos está voltada aos aços microligados com a finalidade de atender as severas exigências de resistência mecânica, soldabilidade e tenacidade. O presente trabalho tem como finalidade a avaliação da tenacidade ao impacto de um aço API 5CT grau N80 do tipo Q temperado e revenido a 200°C através da realização de ensaios de dureza e impacto Charpy-V. Realizou-se ainda ensaios com corpos de provas de geometria alternativa retirados diretamente da parede do tubo como uma alternativa ao corpo de prova apresentado pela norma com o objetivo de eliminar custos com a preparação da amostra e por fim foi feita a análise de corpos com entalhe de raio reduzido a fim de simular uma situação mais crítica como uma trinca. Os resultados obtidos nos ensaios validam os tratamentos térmicos realizados, uma vez que, o valor da energia absorvida no ensaio de impacto realizado à 0°C foi de $\approx 45,0\text{J}$ valor maior do que a energia mínima exigida pela norma, de 27J para o grau N80Q.

PALAVRAS-CHAVE: API 5CT; N80Q; ARBL; revenimento; nova geometria charpy v; tenacidade.

ABSTRACT

The demand for fossil fuels derived from petroleum has been growing over the years as a result of society's demand for this source of energy. Oil and natural gas together account for more than half of the world's energy demand. To meet this demand, high investments have been required and made in research into the operational limits of transport by gas pipelines in the world and in the development of technologies that allow the exploration and prospecting for oil in increasingly severe environments such as the offshore environment. Part of the technological developments are focused to microalloyed steels in order to meet the severe requirements of mechanical strength, weldability and toughness. The purpose of this work is to evaluate the impact toughness of an API 5CT grade N80 steel type Q quenched and tempered at 200°C by carrying out hardness and Charpy-V impact tests. Tests were also carried out with specimens of alternative geometry taken directly from the tube wall as an alternative to the specimen presented by the standard in order to eliminate costs with sample preparation and, finally, the analysis of specimens with reduced radius notches was performed in order to simulate a more critical situation with a crack. The results obtained in the tests validate the thermal treatments carried out, since the value of the energy absorbed in the impact test carried out at 0°C was approximately 45.0J, a value greater than the minimum energy required by the standard, of 27J for grade N80Q.

KEYWORDS: API 5CT N80Q; HSLA; tempering; new geometry charpy v; toughness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plataforma Fixa.....	15
Figura 2 - Lâminas d'água	16
Figura 3 - Profundidade perfuradas dos reservatórios no Brasil	16
Figura 4 - Esquema de classificação para as várias ligas ferrosas.....	20
Figura 5 - Diagrama esquemático de transformação para normalização.....	24
Figura 6 - Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido	25
Figura 7 - Esquema de extração de petróleo e gás em um meio <i>offshore</i>	28
Figura 8 - Evolução dos aços de acordo com a máxima profundidade de operação	30
Figura 9 - Locais indicados para retirada de amostras	31
Figura 10 - Orientação para retirada de amostras em tubos para realização do ensaio de impacto Charpy - V	32
Figura 11 - Desenvolvimento dos aços para tubos	34
Figura 12 - Processo de fabricação de tubos API 5CT.....	35
Figura 13 - Etapas da Laminação controlada com as respectivas mudanças microestruturais	37
Figura 14 - Corpos de prova fabricados para análise	38
Figura 15 - Corpos de prova fabricados para análise raio 0,1 e 0,25 mm	39
Figura 16 - Corte dos corpos de prova em eletroerosão a fio.....	40
Figura 17 - Secção transversal das amostras	41
Figura 18 - Área da seção resistente ao impacto dos corpos	41
Figura 19 - Dimensão do corpo de prova	42
Figura 20 - Dimensão corpo de prova abaulado.....	42
Figura 21 - Corpos de prova após o recozimento	43
Figura 22 - Diagrama Fe-C.....	44
Figura 23 - Fornos utilizados para austenitização das amostras.....	45
Figura 24 - Realização do ensaio de têmpera	45
Figura 25 - Durômetro	46
Figura 26 - Pontos de medição de dureza.....	47
Figura 27 - Corpo de Prova confeccionado para elaboração do ensaio de Impacto.....	48
Figura 28 - Corpo de Prova confeccionado para elaboração do ensaio de Impacto.....	48
Figura 29 - Máquina utilizada no ensaio de impacto.....	49
Figura 30 - Curva de Comparação do raio de entalhe de 0,10 mm entre a geometria dos CPD's abaulado e usinado.....	55

Figura 31 - Curva de Comparação do raio de entalhe de 0,10 mm e 0,25 mm dos CDP's abaulados.	56
Figura 32 - Curva de Comparação do raio de entalhe de 0,25 mm e 0,10 mm dos CDP's usinados	57
Figura 33 - Curva de Comparação dos raios de entalhes de 0,25 mm abaulado e usinado dos CDP's	58
Figura 34 - Corpo de prova fraturado a 0 °C	59
Figura 35 - Corpo de prova fraturado a -18 °C.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção média de petróleo no pré-sal	15
Tabela 2 - Composição química, fração mássica [%]	29
Tabela 3 - Propriedades Mecânicas requeridas pela norma API 5CT	30
Tabela 4 - Energia mínima absorvida Charpy para tubos	30
Tabela 5 - Dimensões dos corpos de provas para tubos conforme a norma.....	33
Tabela 6 - Dimensão dos corpos de provas e fatores de redução	33
Tabela 7 - Representação da Composição química do aço API 5CT N80 tipo Q.....	39
Tabela 8 - Dados do ensaio de dureza	50
Tabela 9 - Resultados do ensaio Charpy-V realizado no corpo de prova usinado	51
Tabela 10 - Resultados do ensaio Charpy-V para o corpo de prova abaulado.....	51
Tabela 11 - Análise comparativa da influência da geometria (coeficiente de correção 0,55 para abaulado)	52
Tabela 12 - Análise comparativa da influência do raio de fundo do entalhe na energia absorvida	53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área
A ₁	Temperatura de Austenitização
Ar	Área resistente
API	American Petroleum Institute
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga
ASTM	American Society for Testing and Materials
CDP	Corpo de prova
HSLA	High Strength Low Alloy
ISO	International Organization for Standardization
OCTG	Oil Country Tubular Goods
O&G	Oil and Gas
Pcm	Percentual de Carbono Médio
ΔE	Variação de energia absorvida
%p	Porcentagem em massa

LISTA DE SÍMBOLOS

ε	alongamento
σ_e	limite de escoamento
σ_r	limite de resistência
B	boro
C	carbono
Cr	cromo
Cu	cobre
Fe	ferro
Mo	molibidênio
Mn	manganês
Nb	nióbio
Ni	níquel
P	fósforo
S	enxofre
Si	silício
Ti	titânio
V	vanádio
W	tungstênio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	AÇOS.....	19
3.1.1	Classificação dos aços	19
3.1.1.1	Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)	20
3.1.2	Elementos de liga e seus efeitos nos aços	21
3.1.3	Carbono equivalente em aços ligados	22
3.1.4	Tratamentos térmicos em aços ARBL	22
3.1.4.1	Recozimento	23
3.1.4.2	Normalização.....	23
3.1.4.3	Têmpera	24
3.1.4.4	Revenimento	25
3.2	NORMA API 5CT	26
3.2.1	Aço API 5CT grau N80Q	28
3.2.2	Ensaio de dureza conforme API.....	31
3.2.3	Ensaio de impacto Charpy-V conforme API	31
3.3	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS TUBOS	34
3.3.1	Laminação controlada.....	35
4	MATERIAIS E MÉTODOS	38
4.1	MATERIAIS	38
4.2	MÉTODOS	42
4.2.1	Tratamento térmico.....	43
4.2.2	Ensaio de dureza.....	46
4.2.3	Ensaio de impacto Charpy-V.....	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
5.1	ENSAIO DE DUREZA	50
5.2	ENSAIO DE IMPACTO CHARPY-V	51
5.3	SUPERFÍCIES FATURADAS.....	58
6	CONCLUSÕES.....	60
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é um dos recursos globais mais importante atualmente não só por ser uma fonte de energia primária fundamental para abastecer a sociedade industrializada moderna, mas pelo fato de que a posse de reservas de petróleo é uma fonte de poder geopolítico. O petróleo além de ser responsável por mover carros, aquecer casas e administrar fábricas impulsiona a economia nacional, política e militar mundial (LAWELL, 2011).

De acordo com Viegas e Arantes (2019) os princípios ambientes exploratórios de petróleo e gás podem ser classificados como:

- **Xisto ou Shale:** são rochas de aspecto folheado que se originam a partir de rochas argilosas. Alguns xistos possuem gás metano preso entre as fissuras. Embora exista diversas reservas no mundo a extração é complexa e difícil;
- **Areias Betuminosas:** São areias impregnadas em betume sendo este um hidrocarboneto de alta viscosidade e densidade;
- **Gás Natural das camadas de carvão:** Trata-se de um gás extraído de capas de carvão. As capas de carvão possuem elevado conteúdo de matéria orgânica que retém grande quantidade de gás;
- **Gás Compacto:** Sendo este um gás natural que pode ser encontrado em rochas de baixa porosidade e permeabilidade;
- **Onshore:** Designa a atividade de exploração e produção de petróleo em terra através da prospecção e perfuração de poços. A busca por petróleo e o desenvolvimento das principais técnicas de exploração teve início nesse ambiente exploratório;
- **Offshore:** Termo designado à exploração e produção de petróleo no mar podendo ocorrer em águas rasas ou profundas.

Incentivados pelo custo baixo de descobertas de grandes volumes de petróleo em meio *offshore* profundo combinado com a grande produtividade dos reservatórios, na casa de aproximadamente dezenas de milhares de barris por dia (BDP), a indústria petrolífera tendo como líder a Petrobras iniciou suas atividades na prospecção de petróleo em águas profundas (MILANI, BRANDÃO, *et al.*, 2001).

No Brasil, a Petrobrás é a maior indústria petrolífera responsável pela produção e exploração de petróleo e gás natural. É reconhecida mundialmente por sua tecnologia de exploração e produção de petróleo e gás natural em águas ultraprofundas (PETROBRÁS, 2022), sendo posicionada entre as grandes companhias de petróleo do mundo e reconhecida

internacionalmente por sua capacitação tecnológica em meio *offshore* (LOURAL, SILVA e MORTARI, 2019).

O Brasil tem potencial para que a maior parte das explorações e produção de petróleo ocorram em ambientes *offshore*, visto que, das reservas de 18,2 bilhões de barris aproximadamente 90% estão localizadas no meio marítimo, sendo em sua maioria caracterizada como águas profundas (EIRAS, 2014).

Para que a produção de petróleo *offshore* aconteça é necessário superar as distâncias que existem entre as plataformas e os poços de petróleos que variam entre algumas dezenas ou centenas de metros quando a extração é feita em águas rasas ou até 3000 metros em águas ultraprofundas. A profundidade de um poço de petróleo desde o início da abertura no solo marinho até o fundo do reservatório pode chegar a aproximadamente 10 mil metros (MORAIS, 2013).

No ano de 2006 e 2007 foram descobertas jazidas de petróleo no pré-sal das bacias sedimentares de Santos e de Campos, essas descobertas contribuíram significativamente para mudanças no cenário petrolífero do Brasil. Estimativas apontam que entre 2020 e 2030 a produção de petróleo no país será em média de 5,2 milhões de barris/dia, número maior que duas vezes e meia a produção de 2 milhões de barris/dia do ano de 2013. Essa produção irá posicionar o Brasil entre um dos principais produtores mundiais de petróleo (MORAIS, 2015).

A exploração no campo *offshore* requer inúmeras inovações devido a descoberta de petróleo no pré-sal. As rochas geológicas dessa área podem ser estender por uma média de 800 km da costa marítima brasileira que vai do norte da Bacia de Campos ao sul da Bacia de Santos englobando uma área de aproximadamente 200km. As rochas do pré-sal se localizam a aproximadamente 3000 metros abaixo do solo do marítimo (LIMA, PETROBRÁS, 2015). A produção de óleo e gás por poço no pré-sal da Bacia de Santos é acima da média da indústria dos dez poços com maior produção no Brasil, nove deles estão situados na Bacia de Santos. O volume de negócios gerado pelo pré-sal requer aprimoramento e investimento em tecnologias e conhecimento, por exemplo, a superação dos desafios tecnológicos é sanada com a parceria entre as universidades, centro tecnológicos e pesquisadores (PETROBRÁS, 2022).

A Tabela 1 mostra a evolução da produção média de petróleo no pré-sal ao longo dos anos.

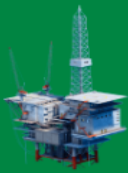
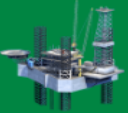
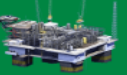
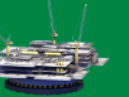
Tabela 1 - Produção média de petróleo no pré-sal

2010	2014	2016	2018
41 MIL BPD	500 MIL BPD	1 MILHÃO BPD	1,5 MILHÃO BPD

Fonte: Petrobras (2022)

Para a E&P de petróleo são utilizadas plataformas do tipo perfuração, produção ou ter as duas funções juntas a aplicação de cada uma depende das condições analisadas em cada campo. No Brasil é utilizado mais de cem plataformas de produção sendo a maioria do tipo fixa (PETROBRÁS, 2022). Na Figura 1 são mostradas as plataformas de extração de petróleo utilizadas pela Petrobrás e suas aplicações.

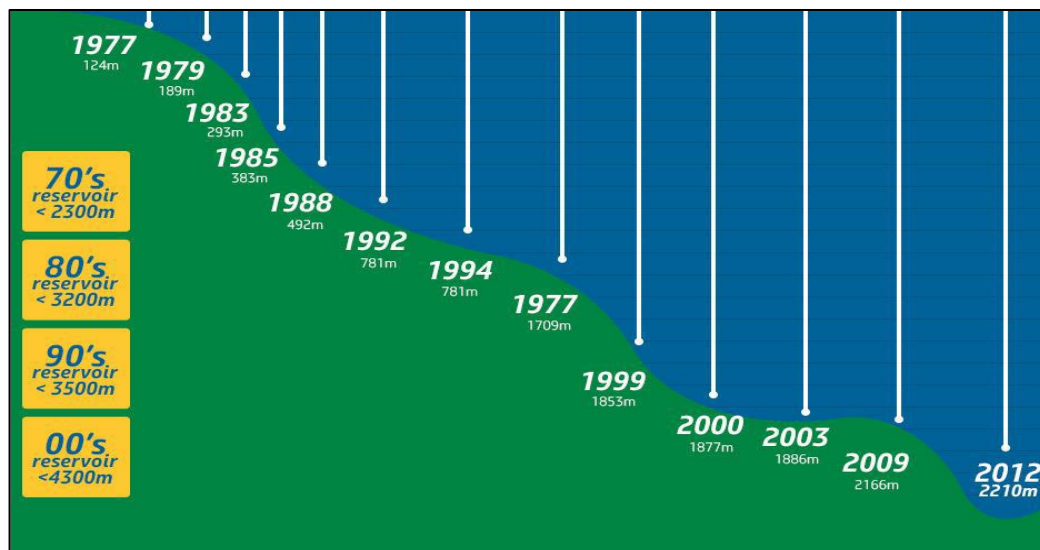
Figura 1 - Plataforma Fixa

							
	Fixa	Autoelevável (ou autoelevatória ou jack-up)	Semissubmersível	FPSO	FPSO Monocoluna	TLWP (plataforma de pernas atirantadas)	Navio-Sonda
Lâmina d'água (profundidade no local da instalação/operação)	Até 300 metros.	Até 150 metros.	Mais de 2.000 metros (pode ser instalada em grandes profundidades graças aos sistemas de ancoragem modernos).	Mais de 2.000 metros (pode ser instalada em grandes profundidades graças aos sistemas de ancoragem modernos).	Mais de 2.000 metros.	Até 1.500 metros.	Mais de 2.000 metros.
Como é	Funciona como uma estrutura rígida, fixada no fundo do mar por um sistema de estacas cravadas.	Tem pernas que se autoelevam. Ao chegar à locação, um mecanismo faz as pernas descenderem e serem assentadas no solo marinho.	Plataforma flutuante, estabilizada por colunas. Pode ser ancorada no solo marinho ou dotada de sistema de posicionamento dinâmico, que mantém a posição da plataforma de forma automática.	Plataforma flutuante, convertida a partir de navios petroleiros, na maioria dos casos. Assim como a semissubmersível, é ancorada no solo marinho.	Tem as mesmas características da FPSO, mas seu casco tem formato cilíndrico.	Plataforma flutuante, de casco semelhante a uma semissubmersível. É ancorada no fundo do mar por cabos ou tendões de aço tracionados.	Plataforma flutuante com casco em forma de navio, usada para perfuração de poços. Pode ser ancorada no solo marítimo ou dotada de sistema de posicionamento dinâmico, que mantém a posição da embarcação de forma automática.
Atividade de perfuração	Sim.	Sim.	Sim (algumas podem ser só de produção).	Não.	Não.	Sim (só para a manutenção dos poços).	Sim.
Atividade de produção	Sim.	Não.	Sim (algumas podem ser só de perfuração).	Sim.	Sim (geralmente são unidades de perfuração ou de produção).	Sim.	Não.
Onde é feito o controle dos poços	Superfície.	Superfície.	Fundo do mar.	Fundo do mar.	Fundo do mar.	Superfície.	Fundo do mar.
Capacidade de armazenamento	Não.	Não.	Não.	Sim.	Sim.	Não.	Não.
Escoamento da produção	Oleodutos.	Não.	Oleodutos ou armazenamento em navios e posterior descarregamento nos terminais.	O óleo é exportado para navios petroleiros, que o descarregam nos terminais.	O óleo é exportado para navios petroleiros, que o descarregam nos terminais.	O óleo é escoado para uma plataforma de produção (FPSO), que realiza o processamento e o exporta através de navios.	Não.
Vantagem	A instalação é mais simples e permite que o controle dos poços seja feito na superfície.	A facilidade para mudar de locação e o comportamento de estrutura fixa, que permite que o controle dos poços seja feito na superfície.	Especialmente projetada para ter pouco movimento.	A capacidade de armazenamento permite que opere a grandes distâncias da costa, onde a construção de oleodutos é inviável.	Movimentos menores do que os FPSOs tipo Navio.	Possui sistema de ancoragem rígido e movimentos reduzidos, o que permite que o controle dos poços seja feito na superfície.	Maior autonomia para perfurar em grandes distâncias da costa.

Fonte: Petrobras (2022).

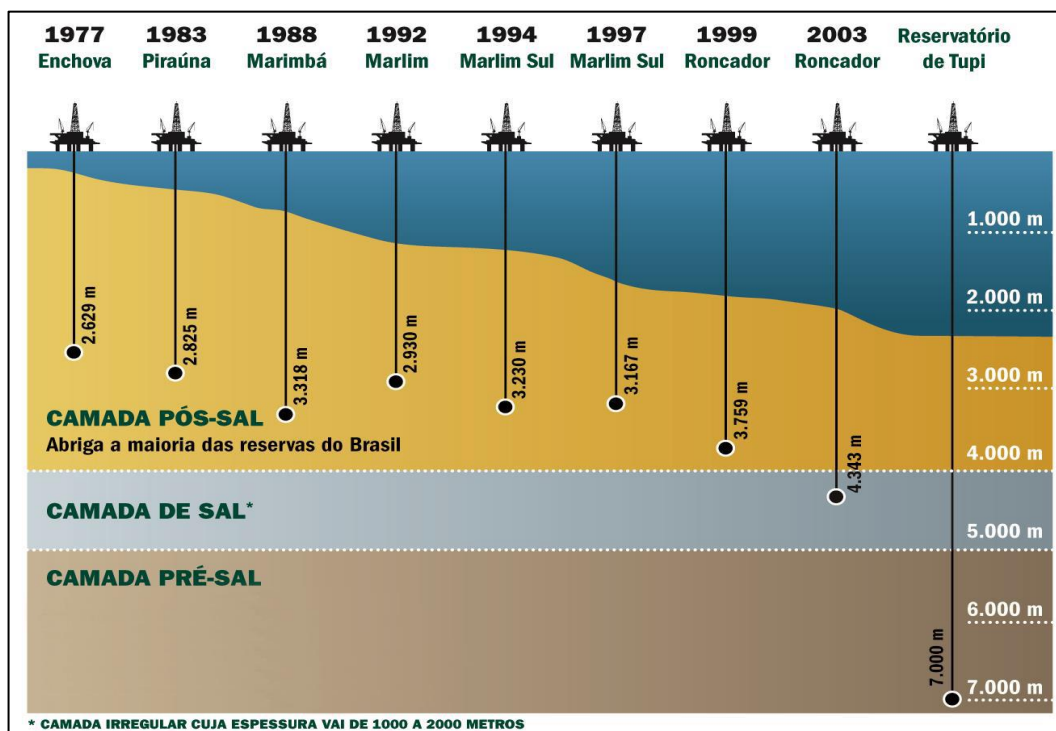
Na Figura 2 é apresentado a profundidade das lâminas d'água dos reservatórios perfurados no Brasil até o ano de 2012. Na Figura 3 é mostrado a profundidade dos reservatórios perfurados no Brasil.

Figura 2 - Lâminas d'água



Fonte: Texeira, Petrobras (2018).

Figura 3 - Profundidade perfuradas dos reservatórios no Brasil



Fonte: Texeira, Petrobras (2018).

A demanda por gás de petróleo vem crescendo ao longo dos anos em decorrência da procura pela sociedade dessa fonte de energia (FERREIRA e JÚNIOR, 2021). O petróleo e o gás natural representam mais da metade da demanda energética requerida pela sociedade (LIMA, 2015). Para suprir essa demanda vem sendo elevado os investimentos e limites operacionais de transportes por gasodutos no mundo, sendo utilizados materiais cada vez mais resistentes para a fabricação de dutos (FERREIRA e JÚNIOR, 2021).

2 OBJETIVO

Este trabalho de graduação tem por objetivo determinar a tenacidade ao impacto de um tubo de aço grau API 5CT N80Q revenido a 200°C destinado à condução submarina de petróleo e gás das camadas Pré-Sal em variadas temperaturas, por meio do levantamento da curva de transição dúctil-frágil com corpos de prova Charpy-V abaulados retirado diretamente da parede do tubo comparativamente a corpos de provas normatizados. As análises obedecerão às recomendações da norma API 5CT (Casing & Tubing).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇOS

O aço é por definição uma liga de ferro-carbono que contém teores de carbono entre 0,008 e 2,14 %p C, podendo ainda conter concentrações apreciáveis de outros elementos de liga, sendo estes adicionados para melhorar suas propriedades mecânicas. Embora uma liga de aço possa conter até 2,14 %p C, na prática, estas concentrações dificilmente excedem 1,0 %p (CALLISTER, 2008). A adição de carbono ao aço aumenta a sua resistência mecânica, no entanto o deixa mais frágil. Os aços que possuem menor concentração de carbono apresentam menor resistência à tração e maior ductilidade (PFEIL, 2009).

De acordo com Callister (2008), as ligas ferrosas, classe ao qual pertence os aços, são produzidas em maior escala do que qualquer outro tipo de metal. O seu amplo uso se deve a três fatores: (1) os compostos que contêm ferro existem em grande quantidade na crosta terrestre; (2) o ferro metálico e as ligas de aço podem ser produzidos usando técnicas de extração, refino, formação de ligas e fabricação relativamente econômicas; e (3) as ligas ferrosas são muito versáteis, podendo ser projetadas para possuírem grande variedade de propriedades mecânicas e físicas.

3.1.1 Classificação dos aços

Os aços podem ser classificados de acordo com a sua composição química em aços-carbono, os quais apresentam concentrações normais de elementos de ligas, e em aços-liga, que podem conter elementos de ligas ou alto teor de elementos residuais (PFEIL, 2009).

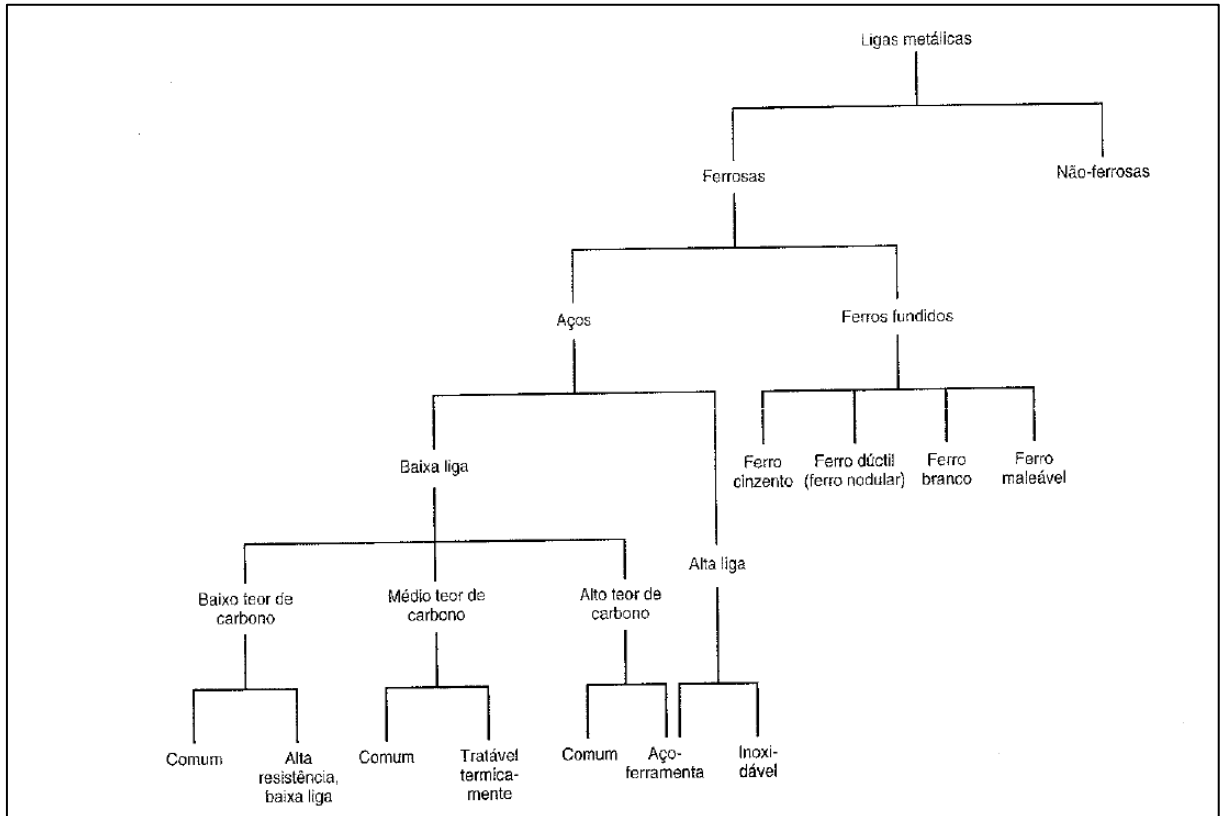
Chiaverini (2005) classifica os aços em dois tipos fundamentais:

- Aços carbono
 - Aços de baixo teor de carbono com $C < 0,2\%$;
 - Aço de médio carbono C entre 0,2% e 0,5%;
 - Aço de alto teor de carbono $C > 0,5\%$.
- Aço Liga
 - Aços com baixo teor liga, menor que 8%;
 - Aços de alto teor de liga com composição de elementos de ligas $> 8\%$.

Para as especificações técnicas do material é mais usual a classificação através da composição química do material (ASM INTERNATIONAL, 1990; CARVALHO, 2015).

A Figura 4 apresenta esquematicamente as principais classes de ligas metálicas baseado em sua composição química.

Figura 4 - Esquema de classificação para as várias ligas ferrosas.



Fonte: Callister (2008).

3.1.1.1 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)

Com a grande competitividade no meio siderúrgico surge o desenvolvimento de novos aços com a finalidade de atender aos requisitos severos de resistência mecânica, soldabilidade e tenacidade; um exemplo desses aços são os aços microligados de alta resistência e baixa liga (ARBL). Os aços ARBL são usados no meio estrutural, nas indústrias navais e petrolíferas; seu uso é justificado por apresentarem boas características de tenacidade, boa soldabilidade e níveis relativamente altos de resistência mecânica (CHILQUE, COSTA e ROCHA, 2015).

Os aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) ou *High Strenght Low-Alloy (HSLA)* contêm em sua composição elementos como o vanádio, o níquel e o molibdênio estes em concentrações combinadas que podem ser tão altas quanto 10%p. Possuem maiores resistências mecânicas do que os aços comuns ao carbono com baixo teor de carbono. A maioria dos aços ARBL pode ter um aumento na sua resistência através de tratamento térmico, adquirindo assim

limites de resistência à tração que podem ser superiores a 480 MPa (70.000 psi); são aços dúcteis, conformáveis e usináveis (CALLISTER, 2002).

Os aços ARBL são comumente utilizados em aplicações que requerem propriedades como boa resistência mecânica, tenacidade à fratura e baixo custo. Sendo bastante utilizados na fabricação de tubos, vasos de pressão e estruturas navais.

A utilização de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) vem crescendo no Brasil com a demanda por gás natural e petróleo. Seu uso é requerido na construção de linhas dutoviárias como uma maneira eficaz para operação a altas pressões e vazões com menor peso e baixo custo de fabricação (YSHII e CHIODO, 2007).

O uso dos aços ARBL em gasodutos e oleodutos é explicado basicamente por possuírem melhores características de tenacidade e soldabilidade para níveis moderadamente altos de resistência mecânica. Nas aplicações petrolíferas é necessária alta resistência mecânica, boa tenacidade, ductilidade e soldabilidade características que são encontradas nos aços de ARBL (CALDEIRA, 2006).

3.1.2 Elementos de liga e seus efeitos nos aços

De acordo com Yshii e Chiodo (2007) elementos de ligas quando adicionado ao aço carbono melhoram suas propriedades, além de em certos casos, introduzir novas.

Ainda segundo Yshii e Chiodo (2007) os principais efeitos da adição dos elementos de liga na estrutura dos aços podem ser definidos como segue:

- **Aumento da resistência à tração:** Boa parte dos elementos de liga utilizada dissolve-se substitucionalmente, em quantidades determinadas. Assim aumenta a resistência à tração ao passo que mantém a ductilidade e a tenacidade.
- **Estabilização da austenita e ferrita:** Alguns elementos de ligas, como é o caso do titânio e nióbio, tendem a estabilizar a austenita; outros como, por exemplo, o molibdênio e vanádio, possuem o efeito oposto uma vez que estabilizam a ferrita. Esses fatores acontecem devido ao aumento da temperatura onde cada fase pode permanecer como fase estável.
- **Estabilidade relativa dos carbonetos:** Alguns elementos quando são adicionados à estrutura do aço formam carbonetos muito estáveis elevando assim a sua dureza a exemplo do molibdênio, vanádio, titânio e nióbio.

- **Influência no crescimento de grão:** O crescimento de grão da austenita acontece durante o processo de tratamento térmico, normalmente a altas temperaturas. A presença de alguns elementos faz com que ocorra o crescimento do grão rapidamente e em consequência ocorre o aumento da fragilidade da peça. Porém esse crescimento pode ocorrer de forma mais lenta na presença de elementos de ligas como vanádio, por exemplo, refinando o grão.

3.1.3 Carbono equivalente em aços ligados

Através do carbono equivalente é possível medir a temperabilidade do aço e quanto maior a temperabilidade maior será a dureza do aço. O carbono é o elemento que mais tem impacto no cálculo do carbono equivalente; geralmente tem-se como finalidade diminuir o teor de carbono, uma vez que, esse elemento contribui para o aumento da temperabilidade e favorece a formação de constituintes de maior dureza e de efeito negativo na ductilidade, resistência à fissuração e temperabilidade (PAULA, 2018).

O cálculo do carbono equivalente pode ser feito através da equação 1 (fórmula recomendada pela norma API) para teores de carbono maiores que 0,12%, e a equação (2) (conhecida como a fórmula de Ito-Bessyo) recomendada para aços que possuem teor de carbono menor que 0,12% (PAULA, 2018).

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (1)$$

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (2)$$

3.1.4 Tratamentos térmicos em aços ARBL

Tratamento térmico pode ser definido como o processo de aquecimento e resfriamento nos quais os metais são submetidos em condições controladas com a finalidade de modificar as propriedades dos metais ou obter novas características (VALE, 2011).

Conforme cita Chiaverini (2005), os tratamentos térmicos são realizados com a finalidade de:

- Remoção de tensões;

- Aumento ou diminuição da dureza;
- Aumento da resistência mecânica;
- Melhora na ductilidade, usinabilidade, resistência ao desgaste, propriedades de corte, resistência a corrosão e resistência ao calor;
- Modificações das propriedades elétrica e magnéticas.

Ainda de acordo com Chiaverini (2005), é necessário escolher criteriosamente o tratamento térmico a ser aplicado no aço, uma vez que, a melhora de uma propriedade pode implicar a piora de outra, por exemplo, ao aumentar a resistência mecânica e a dureza dos aços, ocorre simultaneamente uma diminuição da sua ductilidade.

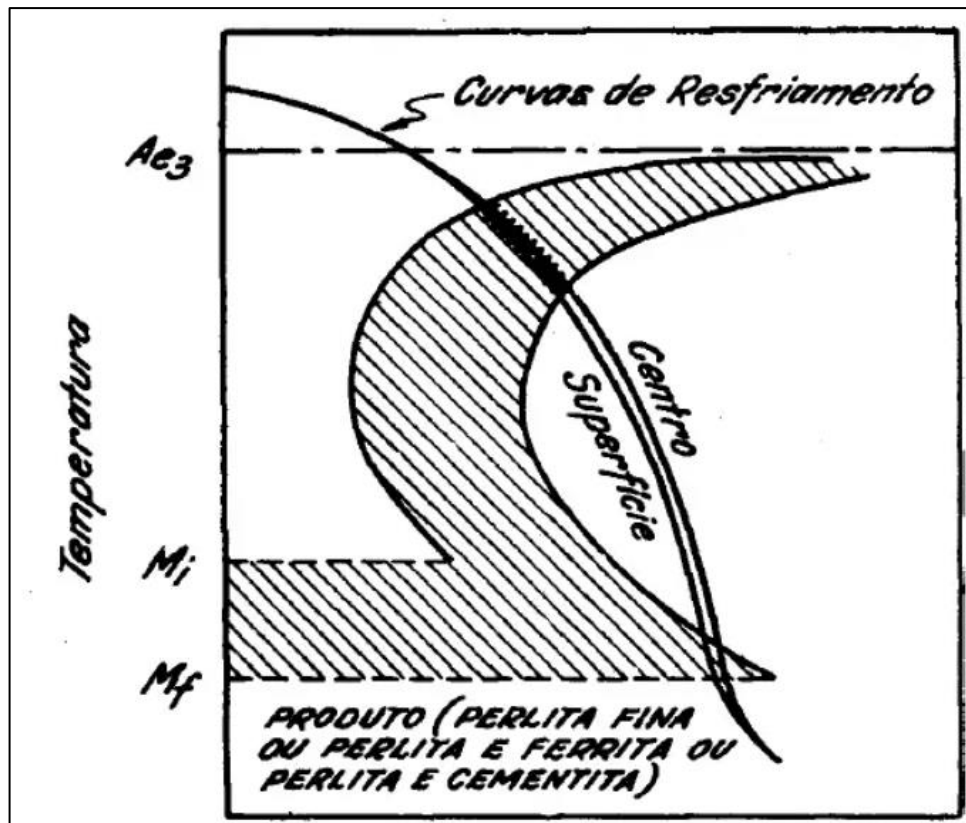
3.1.4.1 Recozimento

Recozimento é um tratamento térmico onde o material é exposto a uma temperatura elevada por um período e posteriormente é resfriado. É realizado com a finalidade de aliviar tensões, reduzir a resistência, aumentar a ductilidade e a tenacidade ou ainda produzir uma microestrutura específica. O processo de recozimento acontece em três estágios: (1) aquecimento até a temperatura desejada, (2) manutenção da temperatura, (3) resfriamento normalmente até a temperatura ambiente (CALLISTER, 2008).

3.1.4.2 Normalização

Tratamento térmico similar ao recozimento pelo menos com relação aos objetivos desejados. O tratamento consiste no aquecimento do aço até uma temperatura acima da zona crítica e em seguida é feito o resfriamento ao ar. A Figura 5 esquematiza esse tratamento onde para os aços hipoeutetóides pode ser considerado que a temperatura de aquecimento fique acima da linha A_3 , já para os aços hipereutetóides a linha A_{cm} (CHIAVERINI, 1986).

Figura 5 - Diagrama esquemático de transformação para normalização



Fonte: Chiaverini (1986).

A normalização é aplicada para refinar a granulação grosseira de peças de aço fundido principalmente. É usada também como tratamento preliminar à têmpera e ao revenido visando obter uma estrutura mais uniforme do que a laminação, reduzir a tendência ao empenamento e facilitar a solução de carbonetos e elementos de liga (CHIAVERINI, 1986).

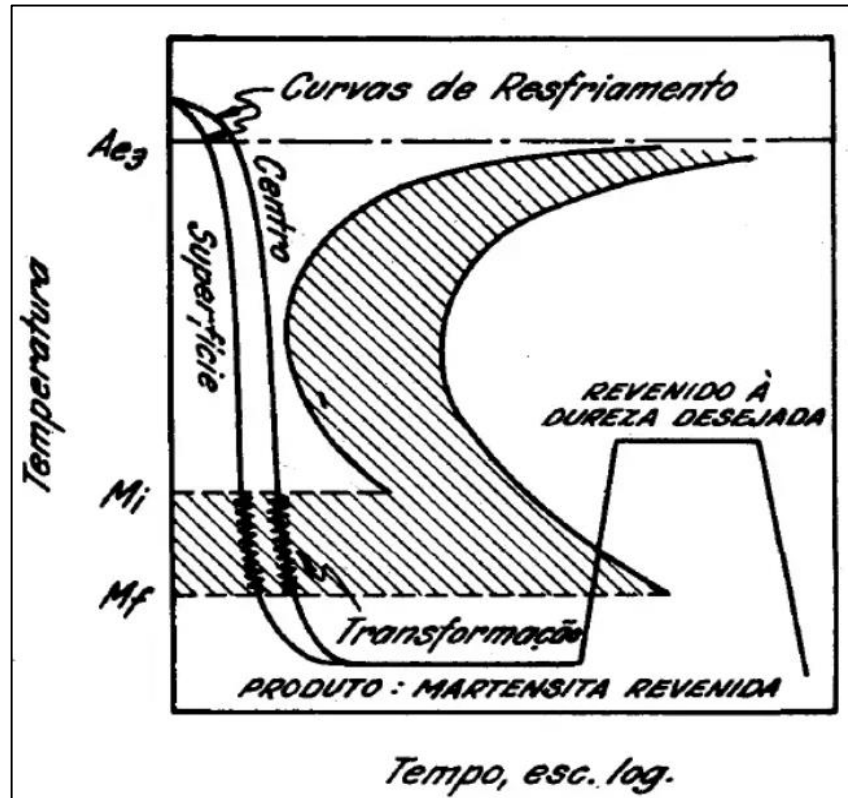
3.1.4.3 Têmpera

A têmpera é realizada com o resfriamento rápido do aço de uma temperatura maior que a sua temperatura crítica, aproximadamente 50°C para os aços hipereutetóides, podendo ser realizada em meios como água, salmoura, óleo e até mesmo no ar (CHIAVERINI, 1986).

A temperabilidade está relacionada à capacidade de um aço endurecer pela transformação martensítica, propriedade essa que determina a profundidade abaixo da superfície temperada onde o aço está endurecido, ou ainda a severidade da têmpera necessária para atingir a dureza a uma dada profundidade. O processo de temperabilidade é aumentada pela presença de elementos de liga, como manganês, molibdênio, cromo e níquel, sendo o níquel o elemento que menos influencia dentre os citados (GROOVER, 2014).

A Figura 6 esquematiza o processo de têmpera.

Figura 6 - Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido



Fonte: Chiaverini (1986).

A têmpera tem por finalidade a obtenção da estrutura martensítica e para que essa estrutura ocorra é necessário que a curva de resfriamento passe à esquerda do cotovelo da curva “C” (Figura 6) evitando assim a transformação da austenita. As propriedades mecânicas obtidas com o processo de têmpera é o aumento do limite de resistência à tração do aço e aumento da dureza, porém pode ocorrer também uma redução da ductilidade, tenacidade e aparecimento de apreciáveis tensões internas que podem ser atenuados ou eliminados pelo revenido (CHIAVERINI, 1986).

3.1.4.4 Revenimento

O processo de revenimento refere-se ao aquecimento dos aços martensíticos para melhoramento da ductilidade. Há diversos processos envolvidos no revenimento como segregação de carbono nos defeitos da rede, transformação da austenita retida, recuperação e recristalização da estrutura martensítica e precipitação de carbonetos (MAIA, 2010).

O revenimento geralmente acompanha a têmpera e é recomendado que seja realizado logo após o processo de têmpera para reduzir a perda de peças por ruptura, o que pode ocorrer se o processo de revenimento levar muito tempo para ser feito. O revenido elimina a maioria dos inconvenientes gerados na têmpera, ainda alivia ou remove as tensões internas, corrige as excessivas durezas e fragilidade do material e aumenta sua ductilidade e resistência ao choque (CHIAVERINI, 1986).

Ainda segundo Chiaverini (1986), as transformações que podem ocorrer com as variações de temperaturas são:

- **Temperatura entre 25° e 100°C:** há a segregação ou redistribuição do carbono em direção as discordâncias. Ocorre mais em aços de alto carbono;
- **Variação de temperatura entre 100° e 250°C:** entre essas temperaturas acontece a precipitação de carboneto de ferro (Fe_3C) do tipo épsilon. A dureza Rockwell começa a ser reduzida podendo alcançar 60HRC
- **De 200° a 300°C:** ocorre o processo de transformação da austenita em bainita. Nesse estágio a dureza Rockwell ainda continua a ser reduzida.
- **Variação entre 250° e 350°C:** é formado o carboneto metaestável. A Dureza Rockwell continua sendo reduzida alcançando valores de aproximadamente 50HRC.
- **De 400° a 600°C:** Há uma recuperação da subestrutura de discordâncias. Os carbonetos de ferro assumem uma forma esferoidal sendo mantida uma estrutura de ferrita fina. A dureza Rockwell varia entre 45 e 25HRC.
- **Temperatura entre 500° e 600°C:** Ocorre somente nos aços que contém Ti, Cr, Mo, V, Nb, ou W em sua composição. Nessa variação de temperatura há precipitação de carbonetos de liga.
- **Variação de temperatura entre 600° e 700°C:** Há a recristalização e o crescimento de grão a cementita precipitada assume a forma esferoidal já a ferrita apresenta forma equiaxial. A estrutura formada é muito tenaz e de baixa dureza. Dureza Rockwell varia entre 5 e 20.

3.2 NORMA API 5CT

A demanda por produtos tubulares cresce em decorrência da descoberta de novos campos de petróleo. Nesse meio, a utilização de produtos certificados por instituições reconhecidas internacionalmente, como a API, aumenta a chance de sucesso nas operações. Os produtos

certificados pela API 5CT necessitam que os processos especiais sejam padronizados pelo fabricante com a finalidade de garantir a qualidade, assim todos os processos especiais devem apresentar certificado de qualidade. A norma API 5CT apresenta os graus dos tubos de revestimento e produção através de letras e números associados com o grau de resistência mecânica requerido (MELO, 2013).

Na indústria de petróleo e gás é comumente utilizado os tubos classificados de acordo com a norma API (*American Petroleum Institute*). A norma API 5CT trata de faixas de composições química, propriedades mecânicas e processos de fabricação, podendo ainda abordar a resistência à corrosão em meios que contêm sulfetos (SILVA, 2016).

Tubos utilizados na transmissão e prospecção de petróleo são da classe API 5CT (objeto de estudo deste trabalho) e API-5L. A norma API 5CT estabelece as condições técnicas de fornecimento de tubos de aço para condução e prospecção de petróleo e perfuração de poços (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010). Os dois últimos números presentes na nomenclatura indicam os valores mínimos de limite de tensão de escoamento em ksi, por exemplo, um aço API 5CT N80 possui um valor mínimo de tensão de escoamento de 80 ksi ou 550 MPa.

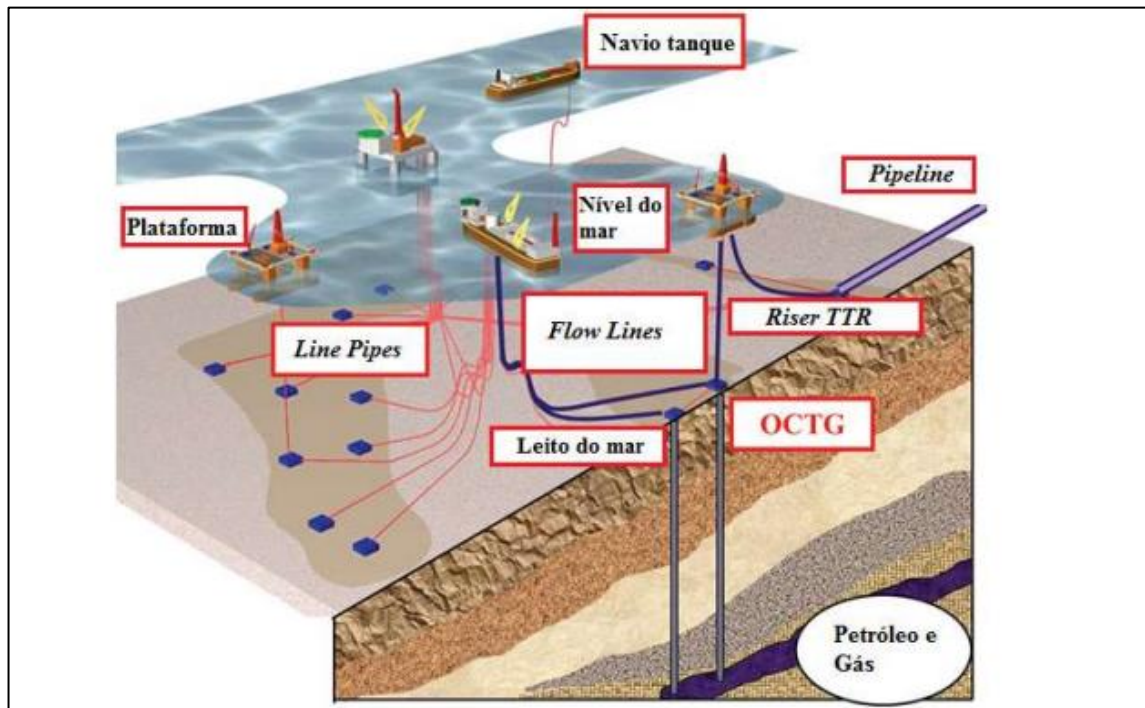
Os tubos petrolíferos são divididos em três grupos *Line pipes*, *OCTG* e *Drill pipe* detalhados a seguir:

1. ***Line pipes***: Utilizados normalmente para transporte dos fluidos dos campos de produção para os tanques de armazenamento. São identificados pelos códigos A25, A, B ou X seguidos por dois números que indicam o limite de escoamento em ksi (TEIXEIRA, 2019);
2. ***Oil Country Tubular Goods (OCTG)***: Tubos utilizados na indústria de petróleo e gás para produção de petróleo, podem ser do tipo *casing* e *tubing*. Os tubos do tipo *casing* fazem parte da coluna de revestimento sendo usados no revestimento das paredes do poço perfurado e para mantê-lo aberto para permitir a produção, já os tubos do tipo *tubing* constituem a coluna que conecta o reservatório a cabeça do poço sendo classificados de acordo com o tipo de fluido que transportam. Os tubos de perfuração constituem a coluna de perfuração e estão expostos ao torque da broca, vibrações, tração devida ao próprio peso da coluna, elevadas pressões internas exercida pelo fluido de perfuração, flexão imposta pela direção não vertical de perfuração, e a erosão pelo atrito com a formação rochosa e com o cascalho carregado pelo fluido ascendente (SILVA, 2016);

3. **Drill pipe:** São utilizados para perfuração de poços. São designados por uma letra seguida por dois ou três dígitos que indicam o limite de escoamento em ksi (TEIXEIRA *apud* VILAS BOAS, 2019).

A Figura 7 apresenta um esquema acerca das tubulações, onde é possível observar alguns dos tubos citados anteriormente, utilizados nas atividades de prospecção e condução de petróleo e gás de uma instalação *offshore*.

Figura 7 - Esquema de extração de petróleo e gás em um meio *offshore*



Fonte: Sorrija 2016 *apud* Sagara (2015).

3.2.1 Aço API 5CT grau N80Q

Aços para fabricação de tubos são desenvolvidos com o a finalidade de se obter alta resistência mecânica mantendo adequada a tenacidade e soldabilidade. Os tubos desenvolvidos com aço de alta resistência mecânica permitem uma menor espessura de parede e em consequência uma redução de peso por comprimento de tubo. A fabricação de aços API no Brasil tem utilizado conceitos baseados na seleção adequada da composição química, bem como, dos parâmetros de laminação controlada a fim de obter a resistência mecânica desejada (BRITO, NUNES, *et al.*, 2000).

Os aços API possuem baixo teor de enxofre (S) e pequenas quantidades de impurezas de segunda fase, como óxidos e inclusões (TEIXEIRA, 2019).

A Tabela 2 mostra as limitações impostas pela norma API 5CT para as composições químicas de cada grau.

Tabela 2 - Composição química, fração mássica [%]

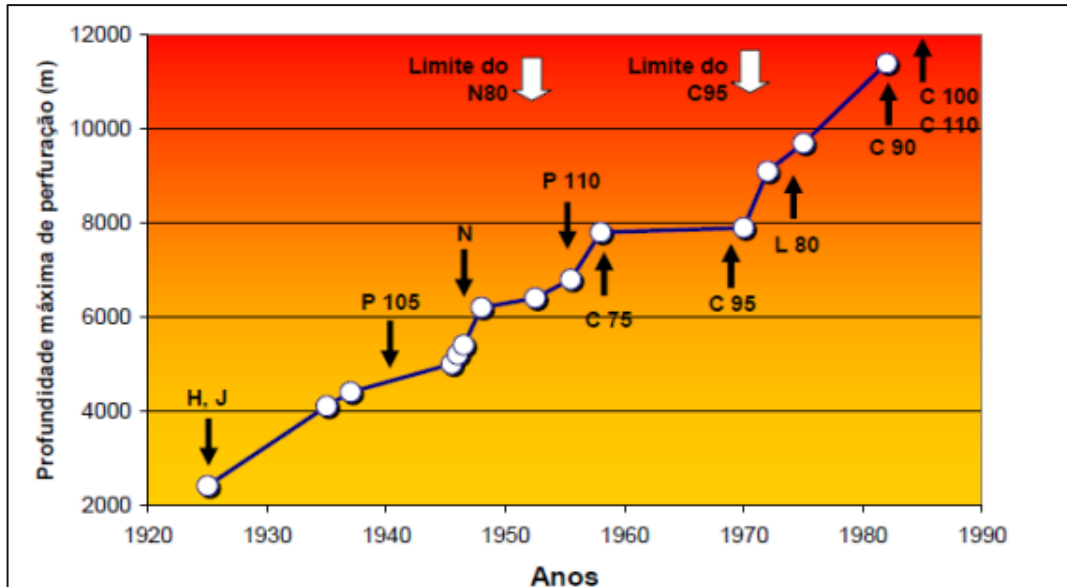
Grupo	Grau	Tipo	C		Mn		Mo		Cr		Ni	Cu	P	S	Si
			min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	min.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.	máx.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	H40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
	J55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
	K55	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
	N80	1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
	N80	Q	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
2	M65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
	L80	1	—	0,43	—	1,9	—	—	—	—	0,25	0,35	0,03	0,03	0,45
	L80	9Cr	—	0,15	0,3	0,6	0,9	1,1	8	10	0,5	0,25	0,02	0,01	1
	L80	13Cr	0,15	0,22	0,25	1	—	—	12	14	0,5	0,25	0,02	0,01	1
	C90	1	—	0,35	—	1,2	0,25	0,85	—	1,5	0,99	—	0,02	0,01	—
	C90	2	—	0,5	—	1,9	—	N/A	—	N/A	0,99	—	0,03	0,01	—
	C95	—	—	0,45	—	1,9	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	0,45
	T95	1	—	0,35	—	1,2	0,25	0,85	0,4	1,5	0,99	—	0,02	0,01	—
	T95	2	—	0,5	—	1,9	—	—	—	—	0,99	—	0,03	0,01	—
	P110	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
4	Q125	1	—	0,35	1,35	—	0,85	—	1,5	0,99	—	0,02	0,01	—	—
	Q125	2	—	0,35	—	1	—	N/A	—	N/A	0,99	—	0,02	0,02	—
	Q125	3	—	0,5	—	1,9	—	N/A	—	N/A	0,99	—	0,03	0,01	—
	Q125	4	—	0,5	—	1,9	—	N/A	—	N/A	0,99	—	0,03	0,02	—
	Q125	4	—	0,5	—	1,9	—	N/A	—	N/A	0,99	—	0,03	0,02	—

Fonte: Adaptado de American Petroleum Institute (2010).

O grau dos tubos petrolíferos deve ser escolhido de acordo com a profundidade de operação, uma vez que, devem ser capazes de suportar as tensões inerentes do meio e suportar o peso da própria coluna de tubos. Com relação a participação mássica dos elementos químicos a norma é muito abrangente possibilitando aos fabricantes o desenvolvimento dos graus de acordo com suas experiências e processos de fabricação de cada empresa (MELO, 2013).

A Figura 8 mostra a evolução do aço em função da máxima profundidade de perfuração.

Figura 8 - Evolução dos aços de acordo com a máxima profundidade de operação



Fonte: Melo (2013).

As Tabelas 3 e 4 apresentam os requisitos de resistência mecânica, dureza e tenacidade ao impacto requeridos pela norma API 5CT.

Tabela 3 - Propriedades Mecânicas requeridas pela norma API 5CT

Grupo	Grau	Tipo	Alongamento total sob carga (ϵ)	Limite de escoamento (σ_e) [MPa]		Limite de resistência (σ_r) (min.)	Dureza (máx.)		Espessura de parede	Variação de dureza permitida
			[%]	min.	máx.	[Mpa]	[HRC]	[HBR]	[mm]	[HRC]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	H40	—	0,5	276	552	414	—	—	—	—
	J55	—	0,5	379	552	517	—	—	—	—
	K55	—	0,5	379	552	655	—	—	—	—
	N80	1	0,5	552	758	689	—	—	—	—
	N80	Q	0,5	552	758	689	—	—	—	—

Fonte: Adaptado de American Petroleum Institute (2010).

Tabela 4 - Energia mínima absorvida Charpy para tubos

Grau	Energia absorvida mínima para ensaio transversal [J]	Energia absorvida mínima para ensaio longitudinal [J]
N80Q, L80, C90, C95, T95	19	27
P110	20	41

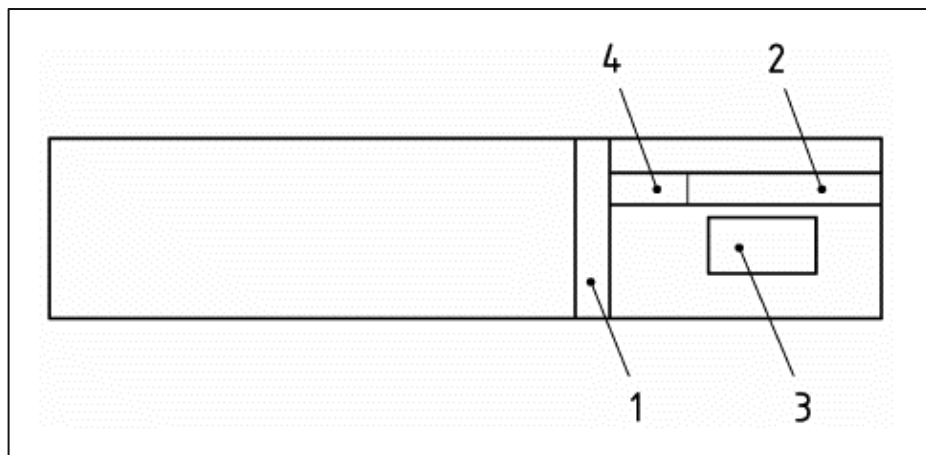
Fonte: Adaptado de American Petroleum Institute (2010).

3.2.2 Ensaio de dureza conforme API

Para a realização do ensaio de dureza, as amostras devem ser retiradas dos locais que estão indicados na Figura 9 levando em consideração o objetivo do ensaio. De acordo com a norma API as superfícies de testes devem estar paralelas ao solo e estarem livres de imperfeições, lubrificantes, material alheio e camada de óxido (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

Os testes de dureza precisam estar em conformidade com as normas ISO 6506-1 ou ASTM E10 para ensaio Brinell, já para o ensaio Rockwell devem estar em conformidade com a ASTM E18 ou ISO 6508-1 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

Figura 9 - Locais indicados para retirada de amostras



Fonte: Adaptado de American Petroleum Institute (2010).

Sendo:

1. Anel para teste de dureza;
2. Corpo de prova para ensaio de tração;
3. Corpo de prova para ensaio de impacto;
4. Corpo de prova para ensaio de dureza.

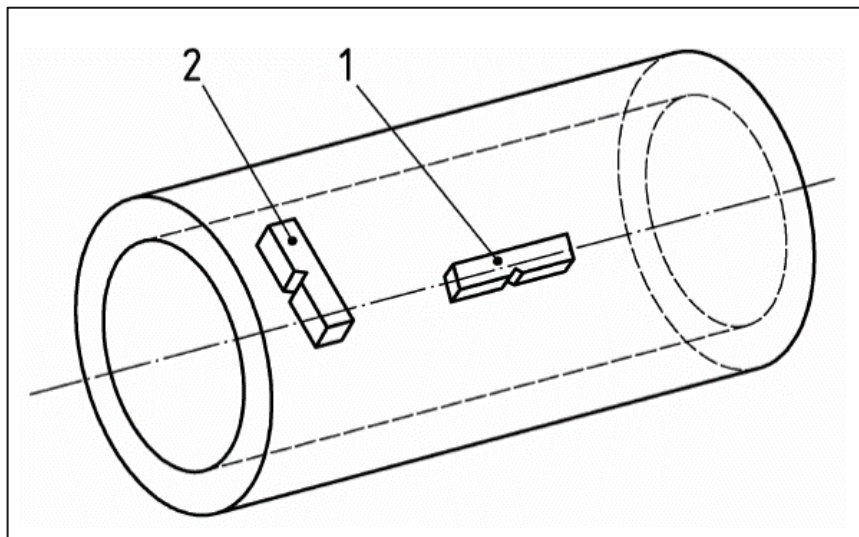
3.2.3 Ensaio de impacto Charpy-V conforme API

O ensaio de impacto Charpy-V deve obedecer a forma especificada na norma ASTM A370 ou ASTM E23.

Os valores encontrados no ensaio de impacto devem ser arredondados para o inteiro mais próximo para que eles sejam avaliados conforme aos requisitos da norma API 5CT. Quanto ao valor obtido de energia de um grupo de corpos de prova deve ser apresentado como um único número inteiro e se necessário deve ser arredondado. O arredondamento deve ser feito sempre em conformidade com o método ISO 80000-1 ou ASTM E29 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

As amostras devem ser retiradas da parede do tubo de acordo com as orientações apresentadas na Figura 10 não devendo ser retiradas amostras de tubos aplainados. No caso de tubos soldados a solda deve ser posicionado no entalhe sempre que a amostra for transversal ISO 80000-1 ou ASTM E29 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

Figura 10 - Orientação para retirada de amostras em tubos para realização do ensaio de impacto Charpy - V



Fonte: Adaptado de American Petroleum Institute (2010).

Na Figura 10 a orientação indicada pelo número 1 representa a amostra longitudinal e o 2 a amostra transversal.

É recomendado que todas as amostras devem ser 10 mm x 10 mm e o entalhe deve ser orientado perpendicularmente ao eixo do tubo (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

Na Tabela 5 é apresentado conforme a norma API os valores mínimos de espessura de parede de tubos para confecção dos corpos de prova a serem utilizados no ensaio de impacto Charpy-V nas dimensões $\frac{3}{4}$ e $\frac{1}{2}$.

Tabela 5 - Dimensões dos corpos de provas para tubos conforme a norma

Especificação do tubo	Espessura de parede necessária para usinagem de amostras para ensaio Charpy (min.) [mm]		
	Inteiro	3/4	1/2
1.050	11,97	9,47	6,97
1.315	11,77	9,27	6,77
1.660	11,6	9,1	6,6
1.900	11,52	9,02	6,52
2.063	11,48	8,98	6,48
2-3/8	11,42	8,92	6,42
2-7/8	11,34	8,84	6,34
3-1/2	11,28	8,78	6,28
4	11,25	8,75	6,25

Fonte: American Petroleum Institute (2010).

A energia mínima absorvida no ensaio Charpy para corpos de prova de escala reduzida deve ser corrigida por um fator de correção, sendo a multiplicação do fator de redução apresentado na Tabela 6 pela energia mínima para um corpo de prova de tamanho inteiro, porém se a especificação de energia absorvida corrigida for menor que 11 J não poderá ser feito o uso do corpo de prova de tamanho reduzido (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

Tabela 6 - Dimensão dos corpos de provas e fatores de redução

Corpo de prova (CDP)	Dimensões [mm]	Fator de redução
Inteiro	10,0 x 10,0	1,00
3/4	10,0 x 7,5	0,80
1/2	10,0 x 5,0	0,55

Fonte: American Petroleum Institute (2010).

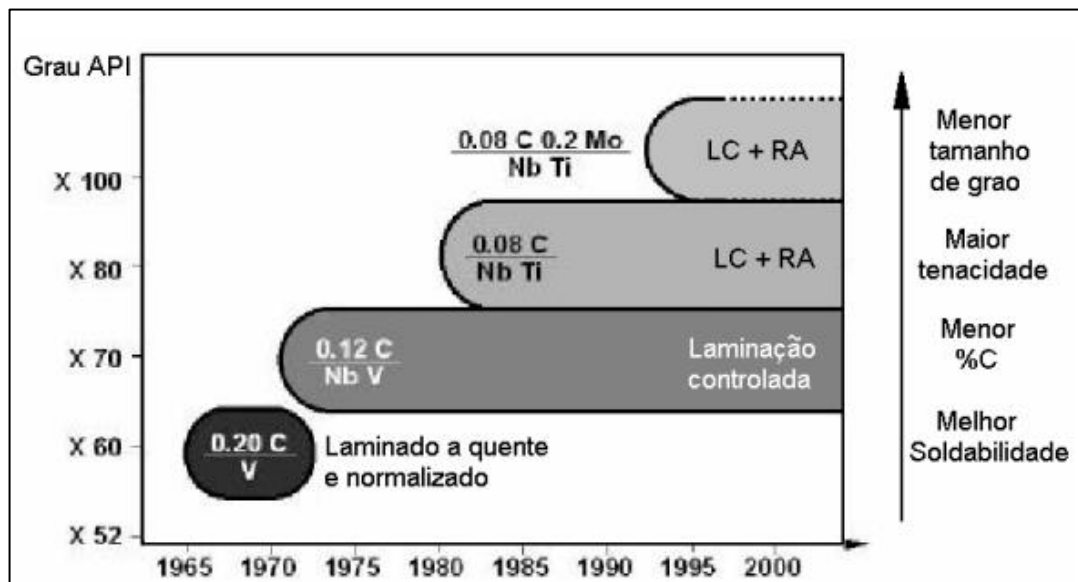
No que se refere a temperatura do ensaio a norma estabelece que o ensaio deve ser realizado à zero graus Celsius (°C) para todos os grupos exceto para os graus J55 e K55 para estes o ensaio deve ser realizado a temperatura de 21 °C. A variação de temperatura permitida pela norma é de mais e menos 3 °C (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

3.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS TUBOS

No desenvolvimento de aços para tubos as propriedades são controladas através da microestrutura que é função da composição química do aço e do processo de fabricação. A demanda por aços com alta resistência mecânica, boa tenacidade e soldabilidade tem levado ao desenvolvimento de novos processos na fabricação das chapas dentre estes processos estão o processo de laminação controlada e resfriamento acelerado (BATISTA, 2011).

A Figura 11 mostra o desenvolvimento dos aços para dutos no decorrer dos anos onde RA refere-se à resfriamento acelerado e LC à laminação controlada.

Figura 11 - Desenvolvimento dos aços para tubos



Fonte: Batista (2011).

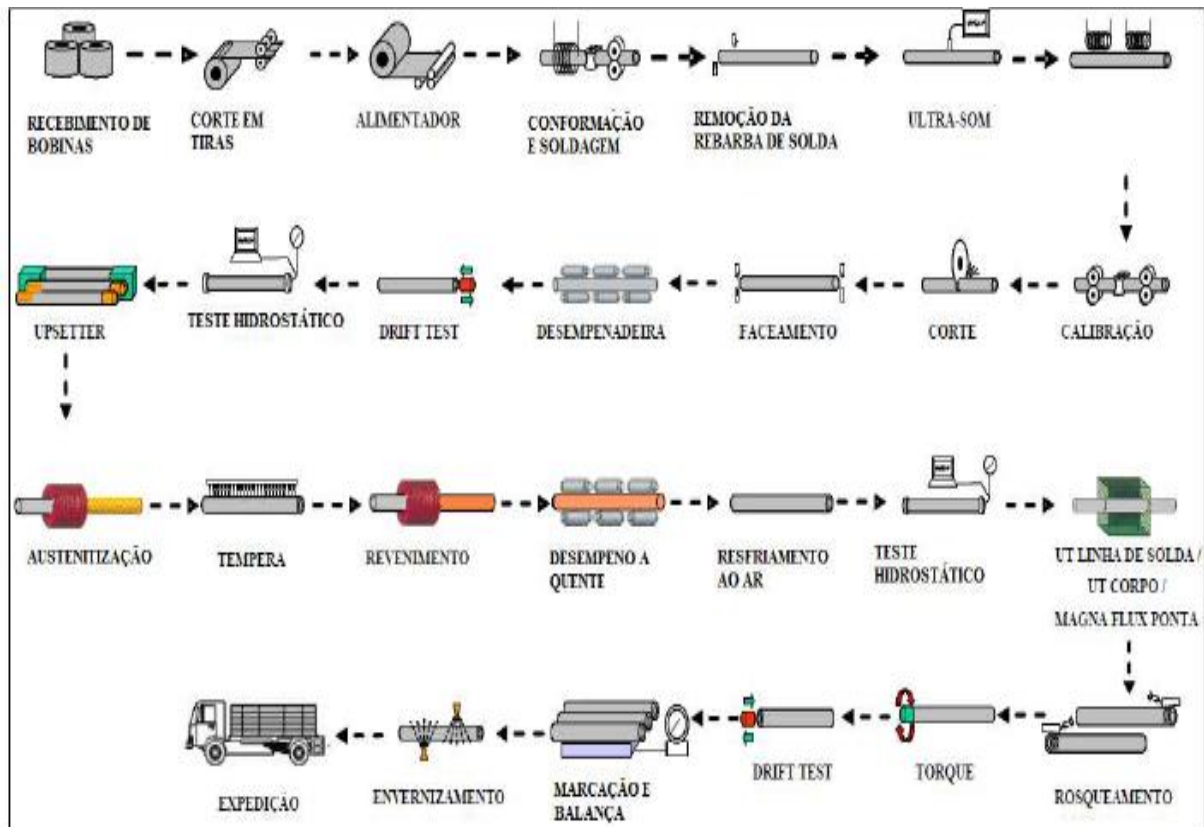
De acordo com Sorrija *apud* Barbosa (2016) e Apolo Tubulars S.A. (2015), para os tubos de graus N80 tipo Q o processo de fabricação é composto pelas etapas descritas abaixo:

- Desbobinamento das chapas (com as composições químicas de acordo com o especificado pela norma API 5CT);
- Conformação mecânica das chapas em uma geometria tubular;
- Soldagem elétrica por indução;
- Tratamento térmico da solda;
- Calibração e testes iniciais;
- Tratamento térmico de têmpera e revenimento;

- Por fim são realizados os testes finais, ensaios não destrutivos e operações de acabamento.

A Figura 12 ilustra o processo de fabricação dos tubos utilizados na indústria de petróleo e gás com a finalidade de obter tubos que atendam as especificações da norma API 5CT.

Figura 12 - Processo de fabricação de tubos API 5CT



Fonte: Cortesia: Apolo Tubulars S.A. (2016).

3.3.1 Laminação controlada

A laminação controlada é o processo em que os estágios de laminação possuem a sua temperatura controlada, a quantidade pré-determinada de redução em cada passe e a temperatura de acabamento estritamente definida. Esse processo é usado para obtenção de aços empregados em dutos, pontes e estruturas *offshore*, por exemplo. A finalidade da laminação controlada é basicamente deformar o grão de austenita durante o processo de laminação para obter grãos de ferrita finos durante o resfriamento. Em consequência desse procedimento tem-se um aumento na resistência mecânica e tenacidade e uma redução do aumento de carbono em aços de alta resistência e baixa liga possibilitando uma maior soldabilidade dos aços (SILVA, 2004).

Nas aplicações navais, petrolíferas e estruturais, têm-se usado aços microligados. O desenvolvimento desses aços nesse campo é justificado pelas melhores características de tenacidade para níveis relativamente altos de resistência mecânica e boa soldabilidade, bem como, o preço menor em relação aos materiais tratados termicamente, sendo suas características finas obtidas por meio da laminação. Nesse ponto a laminação controlada é indispensável para obtenção das propriedades citadas anteriormente a partir das ligas microligadas de Nb, Ti e/ou V. A laminação controlada juntamente com o resfriamento monitorado com a combinação entre temperatura e deformação a quente tendem a aumentar os valores de tenacidade e resistência mecânica (FERNANDES, 2011).

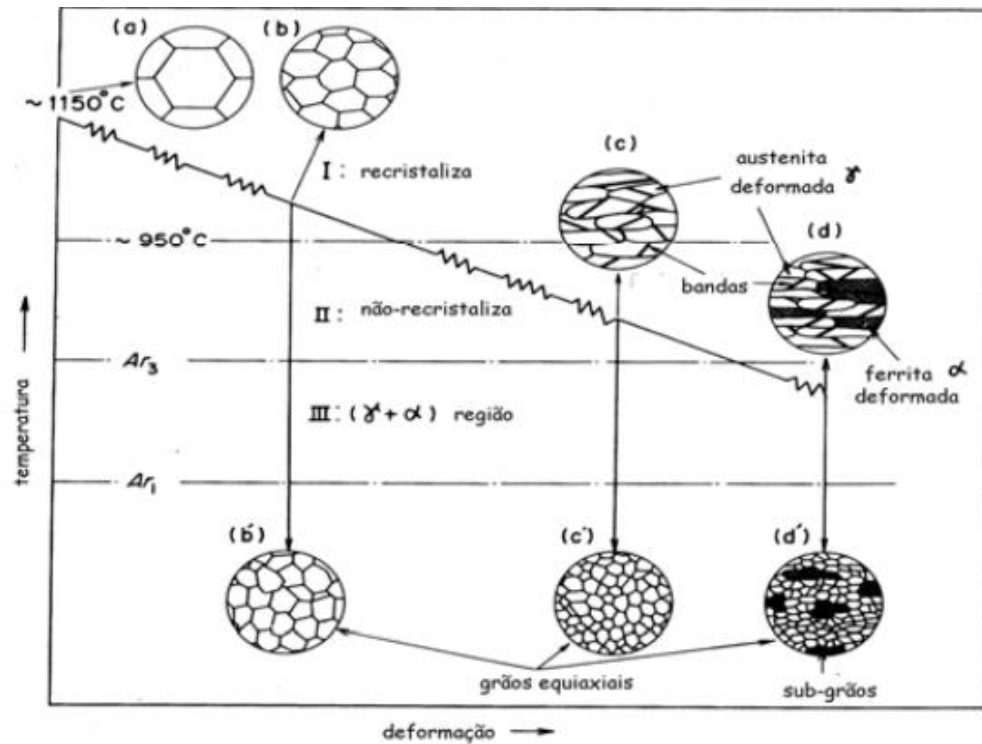
A laminação controlada diminui significativamente o tamanho do grão da austenita e aumenta o seu grau de encruamento. Após a transformação surge uma microestrutura ferrítica final refinada elevando sobremaneira a tenacidade do produto. O processo de laminação controlada toma partido basicamente da supressão da recrystalização da austenita entre os passes de deformação a quente que acontecem a temperaturas baixas (PLAUT, GORNI, *et al.*, 2009).

De acordo com Plaut, Gorni *et al.* (2009), a deformação é aplicada em três regiões de temperaturas:

- I. **Região de altas temperaturas:** na qual a austenita deformada é recrystalizada a cada passe promovendo assim o refino do grão através de ciclos consecutivos de deformação e recrystalização;
- II. **Região de temperaturas intermediárias:** na qual a austenita é deformada sem ocorrência de recrystalização entre passes ocorrendo assim um encruamento que é acumulado em cada passe o que contribui para um maior número de sítios disponíveis para nucleação da ferrita;
- III. **Região de temperaturas abaixo da A_{r3} :** Onde há uma mistura de ferrita e austenita. A ferrita sofre encruamento o que leva a um aumento da resistência mecânica do material, já a austenita sofre um encruamento adicional o que contribui ainda mais para o aumento do número de sítios para nucleação de ferrita de grão mais fino que na região II.

A determinação das temperaturas é extremamente importante para se projetar um esquema de laminação controlada. A Figura 13 apresenta as três regiões de laminação controlada discutidas anteriormente.

Figura 13 - Etapas da Laminação controlada com as respectivas mudanças microestruturais



Fonte: Plaut, Gorni, *et al.* (2009).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Trata-se do levantamento da curva de tenacidade para dois tipos de corpo de prova (CDP) retirados da parede de um tubo de aço API 5CT N80 do tipo Q, um conforme ASTM E23 e outro com entalhe agudo. Os ensaios foram realizados com as temperaturas aproximadas de 0 / 26,6 / -18°C. Foi feita a têmpera do CDP e revenido a 200°C e em seguida o teste Charpy-V.

4.1 MATERIAIS

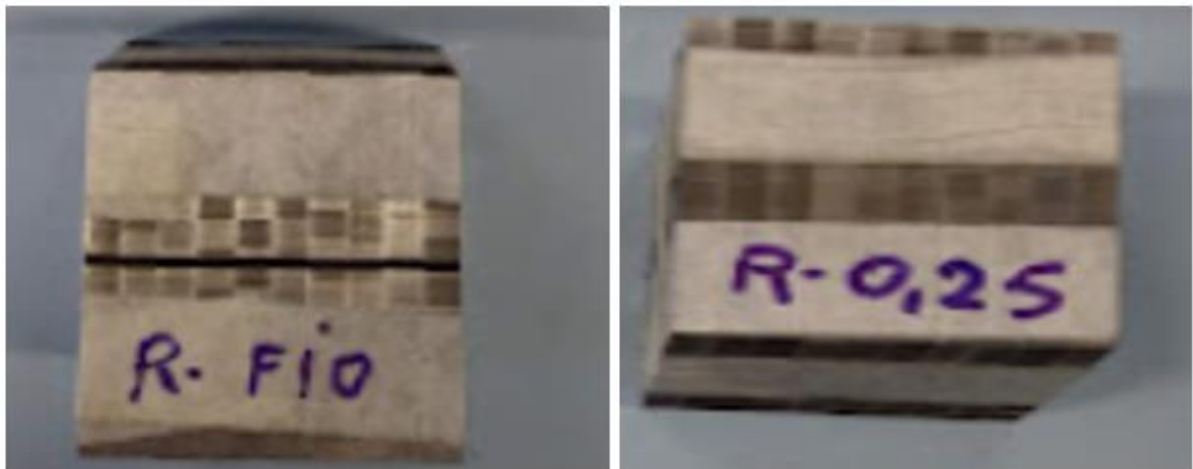
Para este estudo avaliou-se um tubo OCTG de aço API de grau N80Q. O aço em questão possui limite de escoamento mínimo de 80 ksi ou 552 MPa, suas principais características são alta resistência e baixa liga, excelente tenacidade e soldabilidade. O aço foi fornecido para estudo pela empresa Apolo Tubulars S.A. nas dimensões: diâmetro externo de 73,02 mm e espessura de parede de 5,51 mm. O aço foi cedido em forma de tubo e a partir deste foram confeccionados corpos de prova conforme Figuras 14 e 15, para as análises.

Figura 14 - Corpos de prova fabricados para análise



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 15 - Corpos de prova fabricados para análise raio 0,1 e 0,25 mm



Fonte: Elaborado pela autora.

A composição química do aço utilizado no estudo está representada na Tabela 7.

Tabela 7 - Representação da Composição química do aço API 5CT N80 tipo Q

Elemento	Experimental		Norma API 5CT N80 tipo Q
	Valor encontrado [%]	Incerteza [%]	Valor máximo [%]
C	0,3010	$\pm 0,0060$	--
S	0,0030	$\pm 0,0020$	0,03
P	0,0280	$\pm 0,0010$	0,03
Si	0,2500	$\pm 0,0200$	--
Mn	1,3700	$\pm 0,0700$	--
Cr	0,0180	$\pm 0,0018$	--
Ni	< 0,0230	--	--
Mo	0,0025	$\pm 0,0246$	--
Al	0,0300	$\pm 0,0040$	--
Cu	0,0800	$\pm 0,0090$	--

Fonte: Adaptado de Sorrija (2016).

Os corpos de prova foram retirados da parede do tubo no sentido longitudinal, por meio do processo de eletroerosão a fio, conforme ilustra a Figura 16.

Figura 16 - Corte dos corpos de prova em eletroerosão a fio

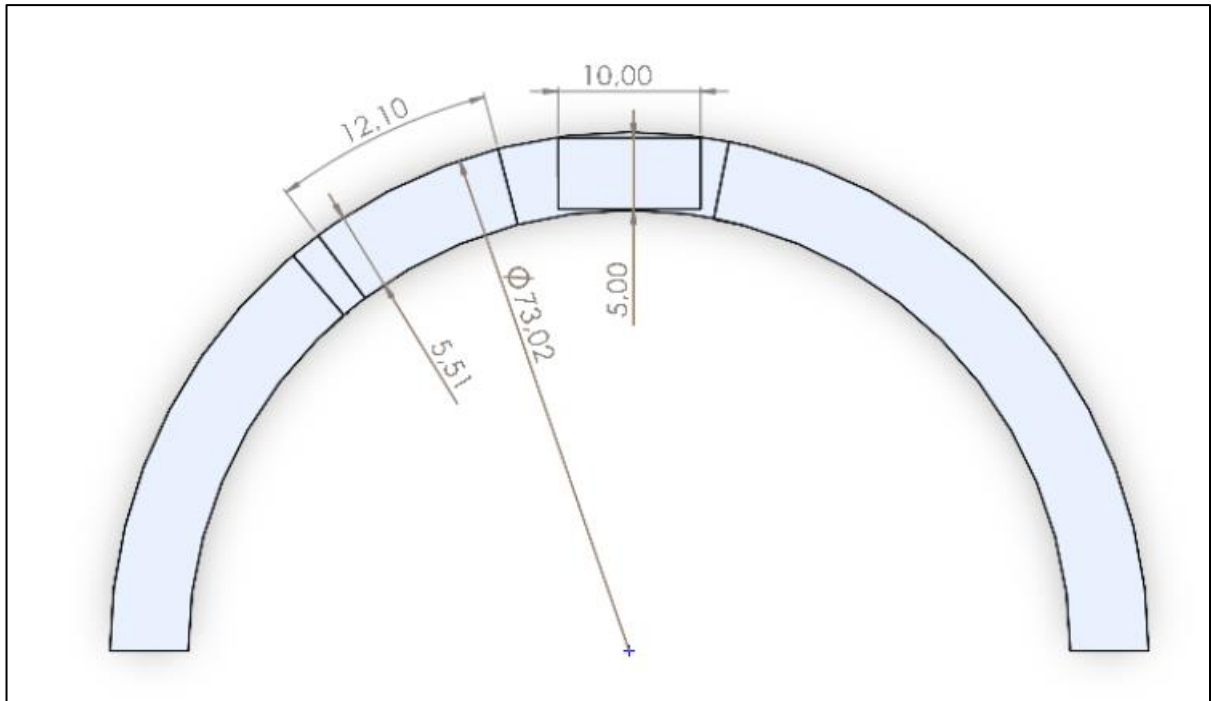


Fonte: Teixeira (2018).

Foram retiradas 80 amostras da parede do tubo nas posições indicadas na Figura 17. Foram confeccionadas 40 amostras abauladas e 40 usinadas, sendo metade de cada tipo de amostra com entalhe normalizado e agudo, para ser feita uma análise comparativa entre os dois tipos

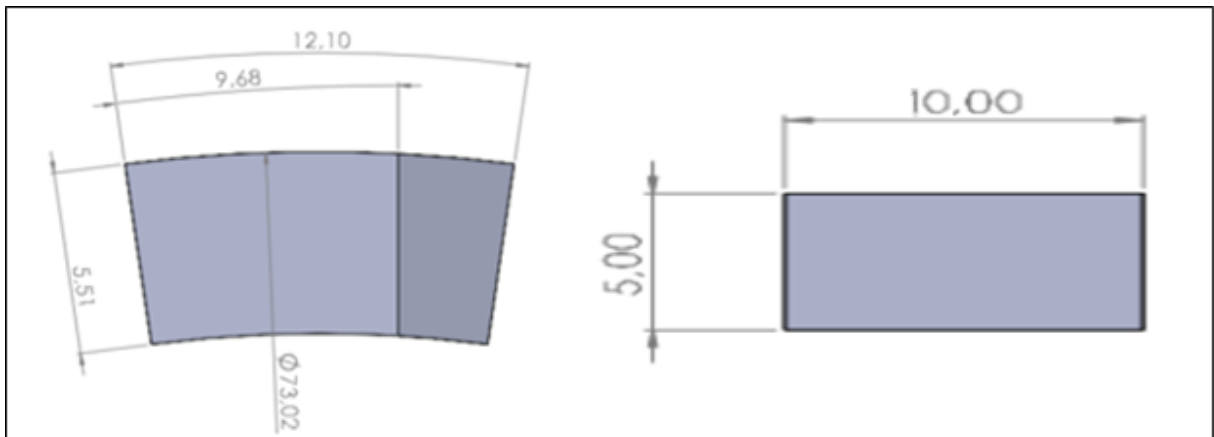
Cada grupo de amostra possui dois tipos diferentes raios de entalhe sendo de 0,1 mm e 0,25 mm.

Figura 17 - Secção transversal das amostras



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 18 - Área da seção resistente ao impacto dos corpos

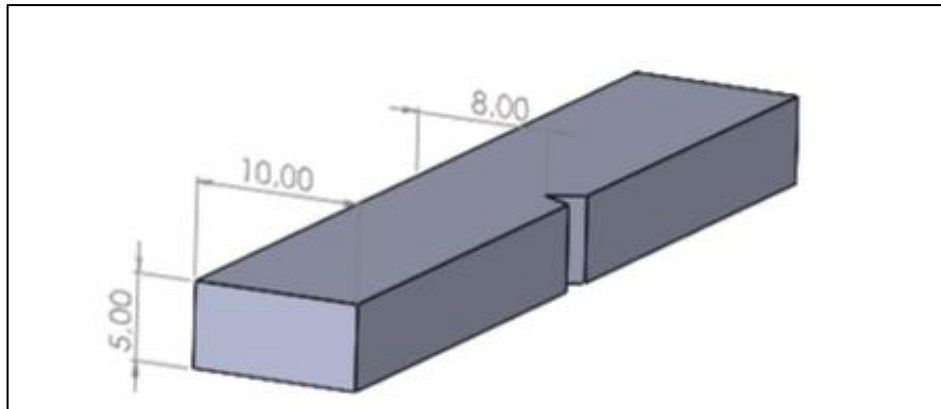


Fonte: Elaborado pela autora.

A área do corpo de prova abaulado corresponde a 51,21 mm² e a área do corpo de prova usinado é de 40,00 mm².

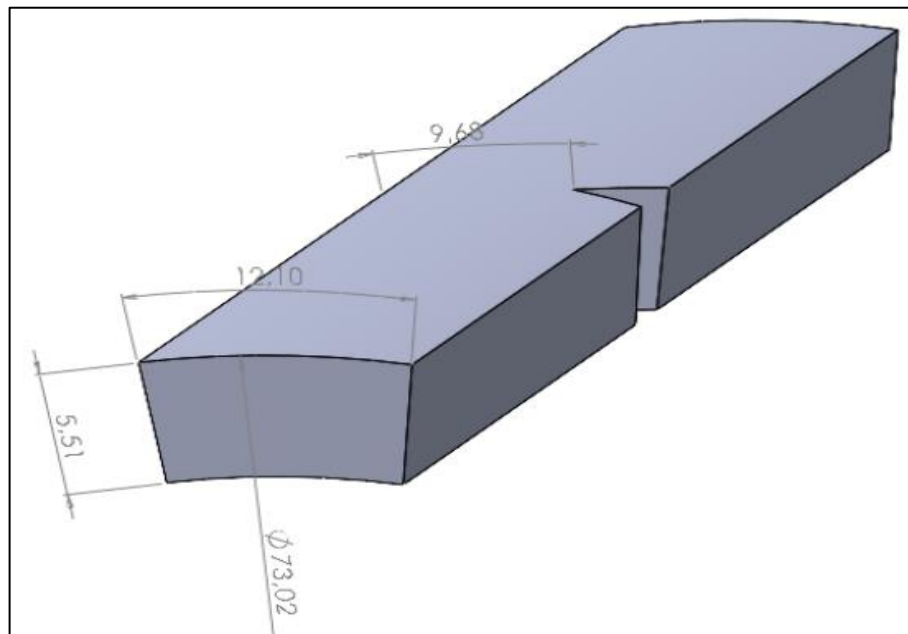
A Figura 19 ilustra os corpos de prova abaulado e usinado com as dimensões e raio de entalhe.

Figura 19 - Dimensão do corpo de prova



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 20 - Dimensão corpo de prova abaulado



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2 MÉTODOS

Foram realizadas 4 combinações de ensaios com os corpos de provas com duas geometrias diferentes e dois tipos de entalhes, sendo eles:

- corpo de prova e raio de entalhe normatizado;
- corpo de prova normatizado e com raio de entalhe agudo;
- corpo de prova abaulado com entalhe normatizado; e
- corpo de prova abaulado sendo o entalhe com raio agudo.

Os ensaios com corpos de prova abaulados retirados diretamente da parede do tubo sem passar por nenhum tratamento superficial para realização do ensaio tem por objetivo analisar o seu desempenho em relação ao corpo de prova normatizado, visando à redução de tempo de preparo da amostra e custo. As diferenças de raios de fundo do entalhe foram impostas para aproximar o corpo de prova a situações mais críticas em relação a norma.

Todos os ensaios nos corpos de provas normatizados foram feitos atendendo as especificações das normas API/ASTM.

Foram realizados os tratamentos térmicos de recozimento, têmpera e revenimento à 200 °C. Após cada processo, foi medida a dureza dos corpos de provas. Realizou-se também o ensaio de Charpy-V conforme norma.

4.2.1 Tratamento térmico

A priori as amostras foram submetidas ao tratamento de recozimento à 850 °C, conforme mostra a Figura 21, por quarenta minutos. O ensaio foi realizado com intuito de zerar quaisquer tratamentos térmicos realizados anteriormente nos corpos de prova que poderiam vir a interferir nas análises do material.

Figura 21 - Corpos de prova após o recozimento



Fonte: Elaborado pela autora.

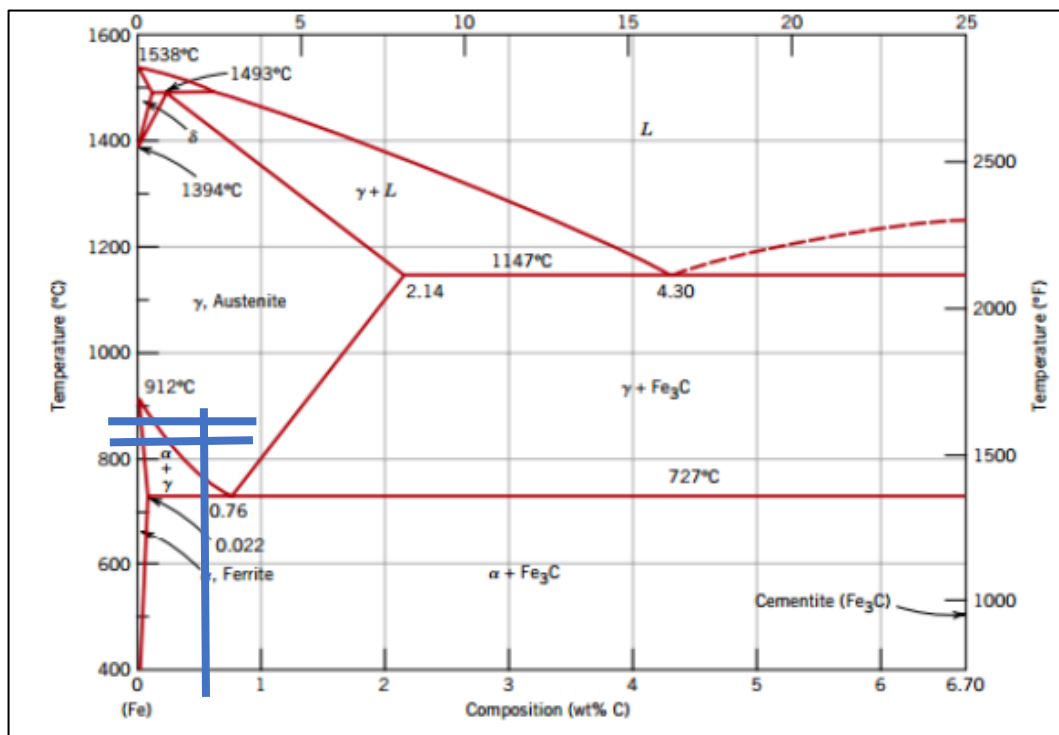
Para a realização da têmpera os corpos de prova foram divididos em pequenos lotes de 8 a 10 amostras.

Com o auxílio da Equação (2) e os dados da Tabela 7, foi possível obter a quantidade de carbono equivalente para o aço em estudo.

$$P_{cm} = 0,310 + \frac{0,250}{30} + \frac{1,370 + 0,080 + 0,018}{20} + \frac{0,023}{60} + \frac{0,0025}{15} + 0 + 0 = 0,3923 \% p C$$

Com o valor da quantidade de carbono calculado e com o auxílio do diagrama Fe-C, foi estimada a temperatura de austenitização do aço de 820 °C e a temperatura de aquecimento para a têmpera como sendo 870 °C, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22 - Diagrama Fe-C



Fonte: Adaptado de Callister (2012).

Sabendo a temperatura de aquecimento para a têmpera, o forno foi pré-aquecido a 720 °C em seguida foi inserido os corpos de prova e aquecidos até a temperatura 870 °C, mantendo uma taxa de aquecimento de aproximadamente 10 °C/min, após atingir a temperatura de 870 °C manteve-se essa temperatura por quarenta minutos. Assim que foi concluído o tempo na temperatura de austenitização os corpos de provas foram submetidos ao ensaio de têmpera em água.

As Figuras 23 e 24 mostram respectivamente o tipo de forno onde foi realizado o ensaio, os corpos de prova dentro do forno já prontos para serem temperados e o ensaio de têmpera,

Figura 23 - Fornos utilizados para austenitização das amostras



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 24 - Realização do ensaio de têmpera



Fonte: Elaborado pela autora.

Com a finalização do ensaio de têmpera os corpos de prova foram aquecidos novamente até atingir a temperatura de revenimento sendo está pré-definida de 200 °C. Atingida essa

temperatura, manteve-se por mais quarenta minutos nesta temperatura e em seguida os corpos de provas foram resfriados gradativamente ao ar.

Ao final de cada tratamento térmico, foi medida as durezas Rockwell das amostras com a finalidade de verificar se o andamento dos tratamentos estava de acordo com o esperado e a fim de garantir o atendimento a norma ASTM.

4.2.2 Ensaio de dureza

Ao final de todos os tratamentos térmicos descritos no corpo deste trabalho, foi medida a dureza de algumas amostras selecionadas aleatoriamente. Foram selecionados somente os corpos de provas usinados conforme pede a norma ASTM E18 e em seguida foram lixados a seco e manualmente para que as carepas não interferissem no resultado da medida de dureza. As medidas foram determinadas com uso do durômetro, Figura 25, de marca WOLPERT, pertencente ao Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP,

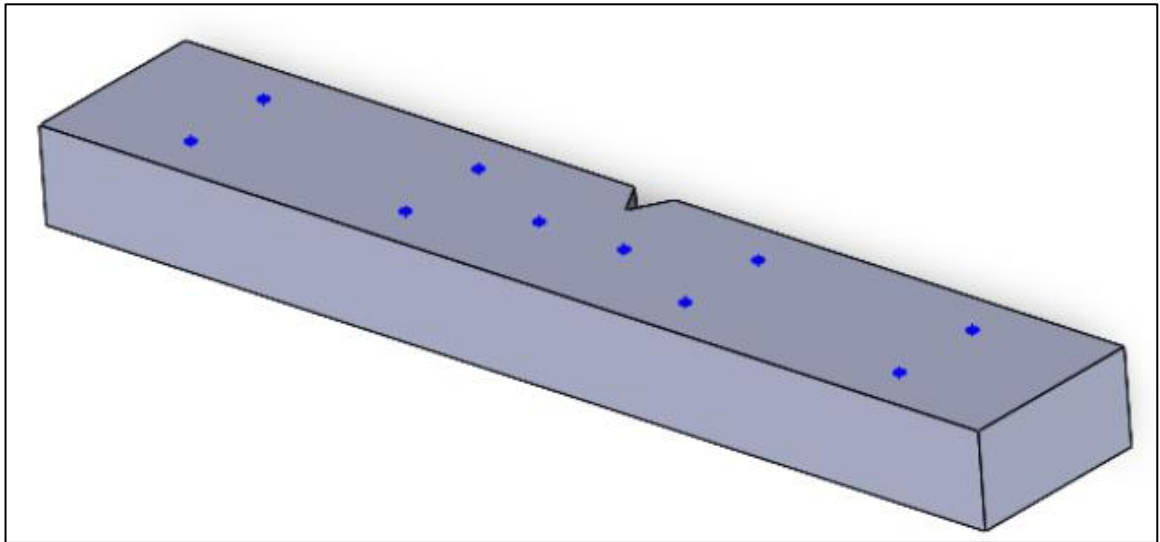
Figura 25 - Durômetro



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 26 ilustra os pontos onde foi medida a dureza sendo o lado visível da figura tratado neste trabalho como lado A e não visível de lado B.

Figura 26 - Pontos de medição de dureza



Fonte: Elaborado pela autora.

4.2.3 Ensaio de impacto Charpy-V

Os ensaios de impacto Charpy tipo V foram realizados em dois tipos de corpos de prova um atendendo a norma ASTM E 370 e API 5CT, conforme mostram as Figuras 27 e 28; e outro de geometria alternativa.

Foi utilizada para a realização do ensaio a máquina mostrada na Figura 29, disponibilizada pelo Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP.

Os ensaios foram realizados em diferentes temperaturas sendo elas:

- Temperatura ambiente, medida no dia do experimento em 26,6 °C.
- Zero (0 °C) graus Celsius.
- -18 °C.

Em cada temperatura foi ensaiado pelo menos dois corpos de provas.

Na realização do ensaio foi utilizado os materiais a seguir:

- Gelo para a temperatura de 0 °C.
- Mistura de gelo, sal e álcool Etílico Absoluto para temperatura de -18 °C.

Os corpos de provas foram imersos nesses meios por aproximadamente 20 minutos para que houvesse uma melhor distribuição da temperatura em todo o corpo de prova e em seguida realizou-se o ensaio de impacto.

Figura 27 - Corpo de Prova confeccionado para elaboração do ensaio de Impacto



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 28 - Corpo de Prova confeccionado para elaboração do ensaio de Impacto



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 29 - Máquina utilizada no ensaio de impacto



Fonte: Elaborado pela autora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ENSAIO DE DUREZA

Para a realização da medição de dureza foram lixados corpos de provas escolhidos aleatoriamente a fim de remover a carepa para que ela não interferisse nos resultados. A Tabela 8 apresenta os valores obtidos para os corpos de prova temperado e revenido a 200 °C, de forma que as posições dos pontos da amostra estão apresentadas na Figura 26, sendo o lado A exposto pela figura e o lado B o lado oposto não visível na figura.

Tabela 8 - Dados do ensaio de dureza

Pontos	Dureza (HRC) (Temperado)		Dureza (HRC) (Revenido)	
	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B
1	37,8	38,3	31,0	31,8
2	32,2	34,5	30,8	32,5
3	39,5	37,5	29,2	30,7
4	32,2	40,5	30,7	32,0
5	34,0	28,0	31,7	29,0
6	27,8	29,3	30,0	31,2
7	30,3	29,5	31,7	33,2
8	27,2	31,0	31,3	31,7
9	32,0	30,7	31,0	32,3
10	27,7	28,8	30,8	31,8
Média	32,1		22,83	
Desvio Padrão	4,3		2,03	
Coeficiente de Variação	0,1351		0,0889	

Fonte: Elaborado pela autora.

Com os resultados obtidos no ensaio de dureza é possível observar um menor coeficiente de variação da dureza no corpo de prova revenido o que sugere uma boa homogeneização do CDP após o revenimento. Observou-se ainda que houve uma redução considerável do valor de dureza saindo de 32,1 HRC para 22,83 HRC essa redução já era esperada em decorrência da temperatura de revenimento empregada de 200 °C. Tendo como finalidade aliviar as tensões

para melhorar a tenacidade dos CDP, levando em consideração que a dureza é reduzida em função do tempo e da temperatura de revenimento.

5.2 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY-V

O ensaio foi dividido em duas partes com o intuito de ter maior controle dos resultados e melhor análise das variações geométricas dos CDP's. Na primeira etapa do ensaio foram testados os corpos de prova de geometria abaulada e os corpos de provas usinados com entalhe normatizado; e na segunda etapa os corpos de prova abaulado e usinados com raio de fundo agudo. Para a realização do ensaio, foram analisadas 3 temperaturas diferentes e com 3 CDP's em cada temperatura sendo elas: 0 °C, 26,5 °C e -18 °C.

A norma API estabelece que quando o ensaio Charpy-V for realizado com corpos de prova *sub-sized* os resultados do ensaio devem ser corrigidos por fator de redução de 0,55 para CDP $\frac{1}{2}$ size. Para os resultados do ensaio Charpy-V os dados já corrigidos estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados do ensaio Charpy-V realizado no corpo de prova usinado

Raio do Entalhe [mm]	T [°C]	E (méd.) [J]	Desvio Padrão	Cv (E)
0,1	26,5	36,41	0,18	0,50
0,1	0	34,33	0,26	0,75
0,1	-18	20,98	0,67	3,17
0,25	26,5	44,79	0,11	0,26
0,25	0	44,79	0,11	0,24
0,25	-18	31,59	0,88	2,78

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 10 - Resultados do ensaio Charpy-V para o corpo de prova abaulado

Raio do Entalhe [mm]	T [°C]	E (méd.) [J]	Desvio Padrão	Cv (E)
0,1	26,5	41,16	0,15	0,37
0,1	0	39,20	0,15	0,39
0,1	-18	27,13	0,66	2,44
0,25	26,5	50,74	0,08	0,15
0,25	0	50,97	0,12	0,24
0,25	-18	37,52	0,64	1,70

Fonte: Elaborado pela autora.

Os dados obtidos na realização do ensaio estão em conformidade com a norma API 5CT, uma vez que, o raio do entalhe normatizado, sendo este de 0,25 mm, quando ensaiado a temperatura de zero graus Celsius (0 °C) foi encontrado o valor de $\approx 45,0$ J que é maior do que a energia mínima, de 27 J, exigida pela norma para o grau N80Q, conforme está indicado na Tabela 4, sugerindo assim que o material apresentou uma boa resposta à tempera e ao revenido à 200 °C.

A seguir a Tabela 11 apresenta uma comparação entre o corpo de prova de geometria abaulado, o qual foi retirado diretamente da parede do tubo, e o corpo de prova usinado conforme especifica a norma ASRM E23. A comparação tem por finalidade avaliar a influência das geometrias dos CDP's assim como estabelecer uma correlação na variação da energia de impacto absorvida.

Tabela 11 - Análise comparativa da influência da geometria
(coeficiente de correção 0,55 para abaulado)

Raio do Entalhe [mm]	T [°C]	E média [J]				Var.
		Usinado	D.P	Abaulado	D.P	
0,1	26,5	36,41	0,18	41,16	0,15	13,06%
0,1	0	34,33	0,26	39,20	0,15	14,20%
0,1	-18	20,98	0,67	27,13	0,66	29,33%
0,25	26,5	44,79	0,11	50,74	0,08	13,27%
0,25	0	44,79	0,11	50,97	0,12	13,80%
0,25	-18	31,59	0,88	37,52	0,64	18,77%
		Estatísticas		0,1 mm	0,25 mm	
Var. [%]		Média		18,87%	15,28%	
(Variação de energia relativo ao corpo de geometria usinado)		Desvio Padrão		0,07	0,02	
		Coef. Variação		0,39	0,16	

Fonte: Elaborado pela própria autora.

Tabela 12 - Análise comparativa da influência do raio de fundo do entalhe na energia absorvida

Tipo	T [°C]	E média [J]				Var.
		0,1 [mm]	D.P	0,25 [mm]	D.P	
USINADO	26,5	36,41	0,18	44,79	0,11	23,03%
	0	34,33	0,26	44,79	0,11	30,48%
	-18	20,98	0,67	31,59	0,88	50,58%
ABAULADO	26,5	41,16	0,15	50,74	0,08	23,25%
	0	39,20	0,15	50,97	0,12	30,03%
	-18	27,13	0,66	37,52	0,64	38,29%
		Estatísticas		USINADO	ABAULADO	
Var. [%]		Média		34,70%	30,52%	
(Variação de energia relativo ao corpo de geometria usinado)		Desvio Padrão		0,12	0,06	
		Coef. Variação		0,34	0,20	

Fonte: Elaborado pela própria autora.

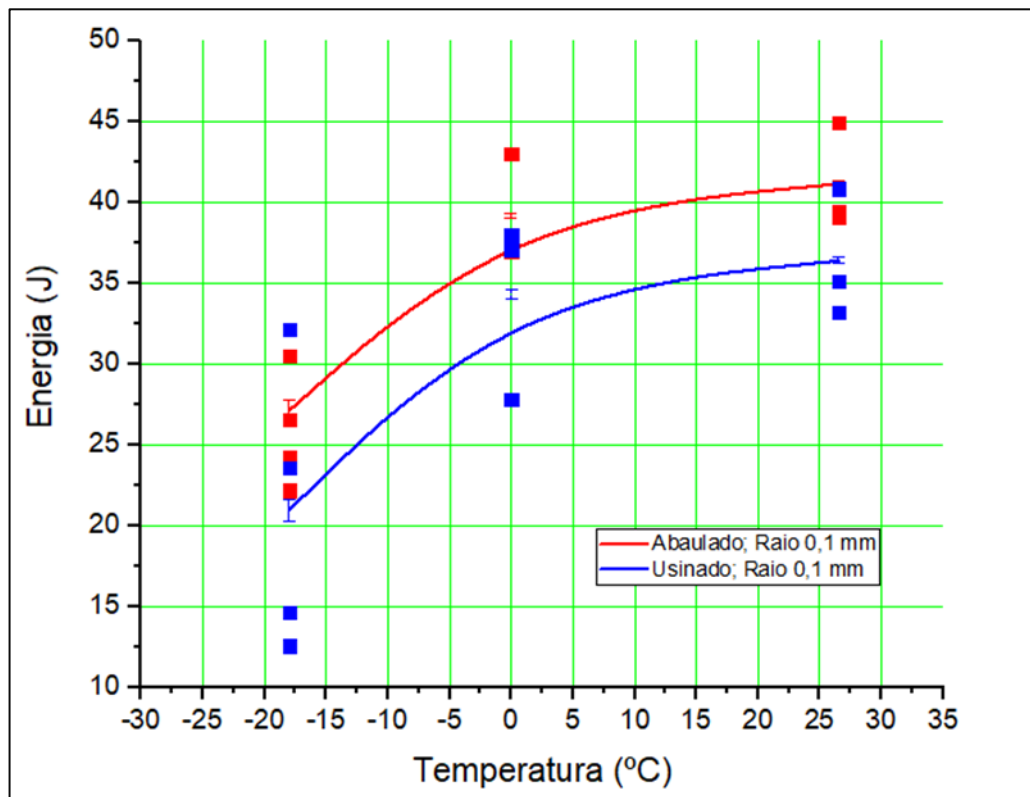
O tratamento térmico com revenimento realizado na temperatura de 200 °C foi bem-sucedido uma vez que aumentou a tenacidade do tubo e manteve as demais propriedades dentro da norma API. A temperatura de transição foi definida em torno de -18 °C, temperatura que apresentou significativa redução de tenacidade e aumento do desvio padrão quando comparada as temperaturas ambientes e zero graus Celsius, como pode ser observado na Tabela 11, o que pode ser explicado de acordo com Espezua (2010), pelo fato de na região de regime de transição dúctil-frágil a tenacidade à fratura de aços ferríticos apresentarem acentuada dispersão causando sérias dificuldades para a caracterização do material.

A temperatura de transição dúctil-frágil ficou em torno de -18 °C o que é confirmado através do maior desvio padrão mostrado pela análise das Tabelas 9 e 10, bem como pela dificuldade de determinar as características das fraturas entre dúctil ou frágil. A região de transição é considerada crítica para um projeto por nesta região ser difícil prever/determinar o comportamento do aço, o que torna necessário o conhecimento da faixa de transição dúctil-frágil para determinar o emprego do aço em condições mais severas, sendo o comportamento da curva de tenacidade para a esquerda uns dos objetivos deste trabalho para assim aumentar a empregabilidade do aço microligado. Faz-se necessário a realização de mais ensaios em temperaturas próximas a -18°C para determinar com maior precisão a faixa de temperatura, no entanto para fins deste trabalho a determinação da temperatura próxima é satisfatória.

Ao analisar a geometria dos CDP's é observado que o principal parâmetro que influencia na absorção de energia é área de secção, A_r . Os corpos de provas abaulados, que não foram confeccionados conforme pede a norma, apresentam uma área de secção aproximadamente 28% maior que os CDP's usinados, tanto para o raio normatizado quanto para o raio agudo. Conforme as Figuras 30 e 33, a diferença de energia se manteve constante em todo o ensaio independente da temperatura. Analisando a Tabela 11 é observado que a temperatura de 0 °C e 26,5 °C a diferença média para as duas temperaturas é em torno de 13%, na temperatura de -18 °C essa diferença aumenta, o que ocorre devido os ensaios terem sido realizados na zona de transição dúctil-frágil apresentando instabilidade, característica que foi discutida anteriormente, sendo assim a temperatura de -18 °C não pode ser usada como referência confiável. Os dois tipos de entalhes normatizado e o 0,10 mm tiveram o mesmo comportamento, ou seja, corpos de provas de parâmetro diferentes tendo em comum apenas o comparativo das geometrias, indica uma correlação entre a área de secção e a energia absorvida, podendo assim através de mais ensaios estabelecer uma correlação numérica entre a geometria e a absorção de energia o que seria capaz de viabilizar ensaios realizados direto em corpos de provas abaulados com resultados confiáveis e com menor custo.

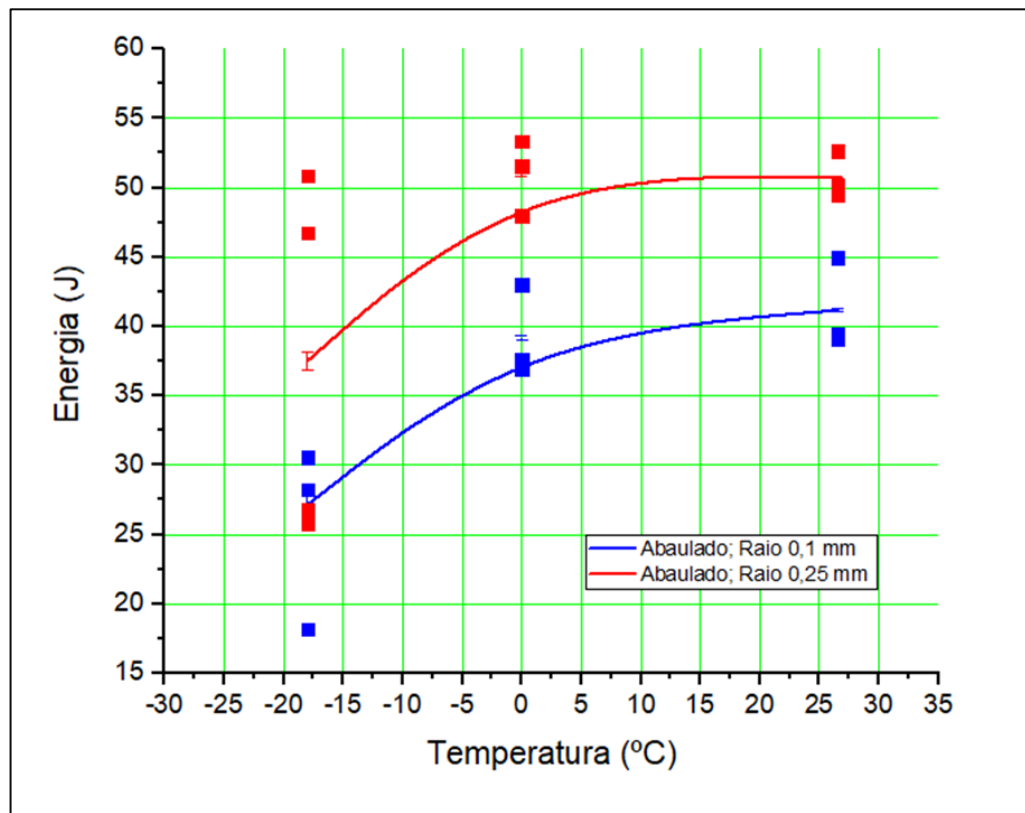
O estudo comparativo entre os raios de entalhe normatizado e o de 0,10 mm tinha como objetivo determinar a influência do tamanho do raio de entalhe através disto fazer uma estimativa do comportamento de uma trinca real que possui o raio de fundo tendendo a zero é esperado que a resistência ao impacto diminua tendo em vista que a criticidade do entalhe aumenta. Através da Tabela 12 é possível observar que tanto os CDP's usinados quanto dos abaulados possuíram uma variação média em torno de 30% indicando que o raio de entalhe influencia significativamente no comportamento do CDP em relação a absorção de energia de impacto. As Figuras 31 e 32 apresentam o deslocamento real da curva de absorção de impacto para a esquerda. Contudo apesar do ensaio com um entalhe de raio de fundo mais agudo não representar uma trinca real ainda assim pode ser uma opção mais conservadora e segura perante a representada pela norma API 5CT.

Figura 30 - Curva de Comparação do raio de entalhe de 0,10 mm entre a geometria dos CPD's abaulado e usinado



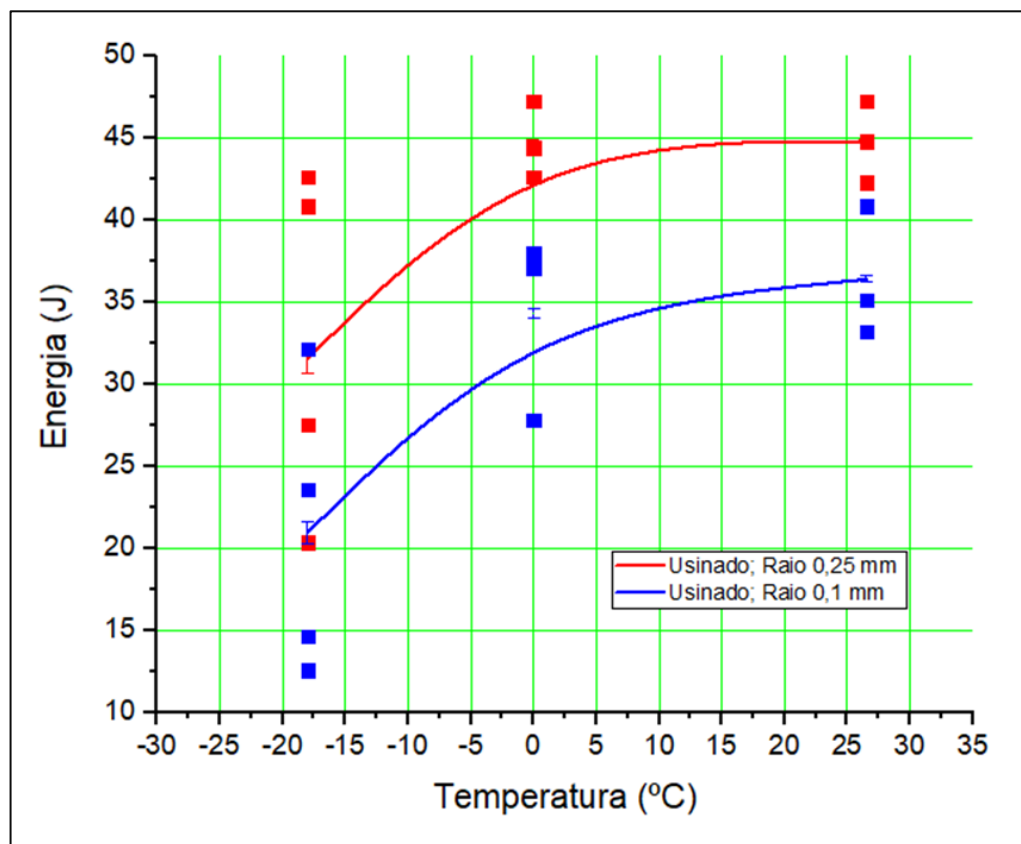
Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 31 - Curva de Comparação do raio de entalhe de 0,10 mm e 0,25 mm dos CDP's abaulados.



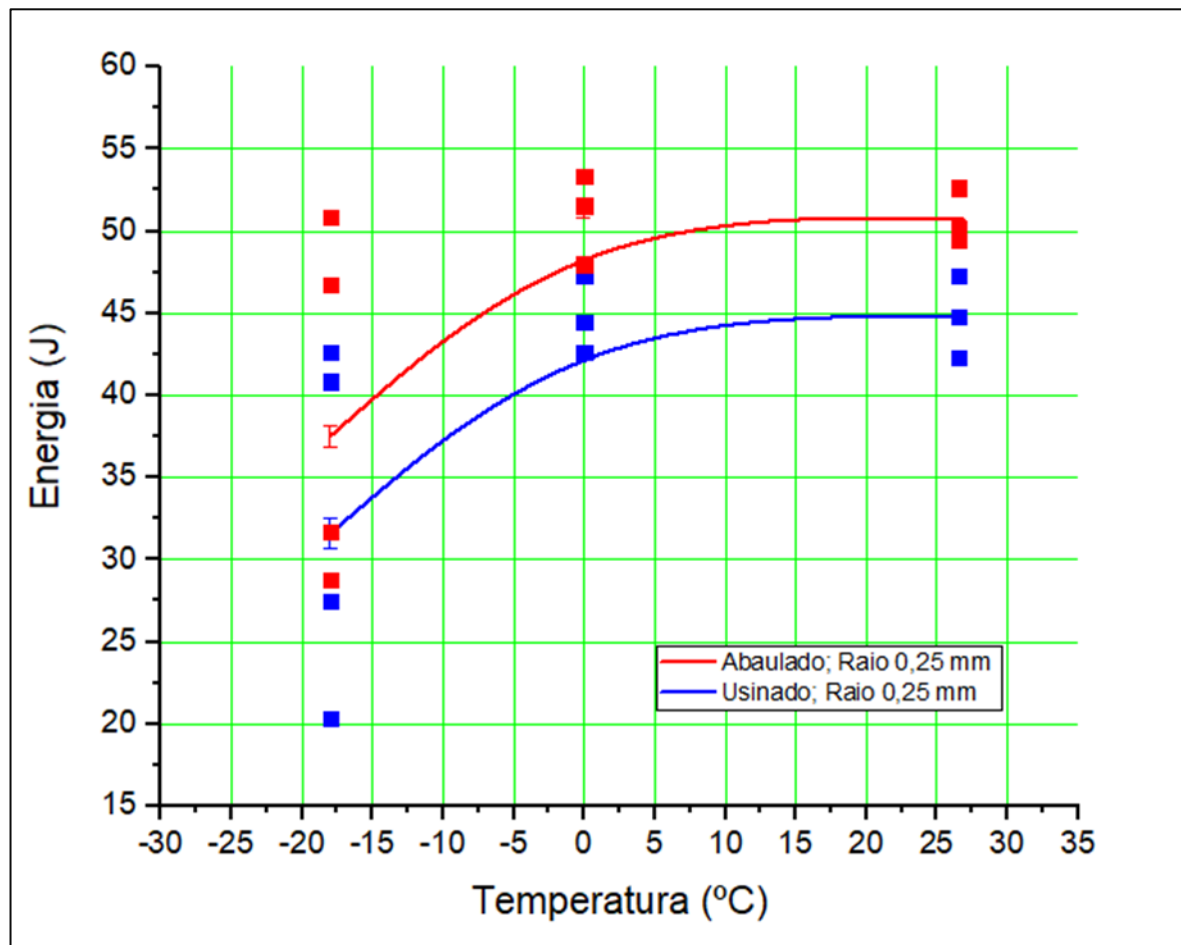
Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 32 - Curva de Comparação do raio de entalhe de 0,25 mm e 0,10 mm dos CDP's usinados



Fonte: Elaborado pela própria autora.

Figura 33 - Curva de Comparação dos raios de entalhes de 0,25 mm abaulado e usinado dos CDP's



Fonte: Elaborado pela própria autora.

5.3 SUPERFÍCIES FATURADAS

As Figuras 34 e 35 mostram respectivamente as superfícies fraturadas a 0 °C e -18 °C. O corpo de prova fraturado à 0 °C teve uma grande deformação plástica na raiz e nas abas da superfície o que caracteriza uma fratura dúctil. É possível observar que a transição de das fraturas de dúctil para frágil se deu a partir de aproximadamente -17 °C a -18 °C.

Figura 34 - Corpo de prova fraturado a 0 °C Figura 35 - Corpo de prova fraturado a -18 °C



Fonte: Elaborado pela própria autora.



Fonte: Elaborado pela própria autora.

6 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos na realização deste trabalho, bem como na pesquisa bibliográfica realizada, é possível afirmar os seguintes pontos abaixo descritos:

- Os tratamentos térmicos de recozimento, têmpera (em água) e revenimento, sendo este à temperatura de 200 °C, realizados nos corpos de provas mostraram-se bem-sucedidos, uma vez, que atenderam às exigências da norma API no quesito de tenacidade ao impacto elevando a resistência ao impacto para aproximadamente 45 J valor acima do que é requerido pela norma, de 27 J.
- Os corpos de provas de geometria abaulada possuem maior resistência ao impacto.
- O raio de entalhe influencia significativamente na absorção de energia de impacto, onde as amostras de raio de fundo de 0,10 mm (não normatizado) apresentaram uma redução na energia absorvida no impacto e manteve ainda as características da curva Charpy-V dos CDP's de raio normatizado tal fato sustenta a possibilidade de uso dos CDP's de raio 0,10 mm como uma alternativa mais conservadora a apresentada pela norma.
- A temperatura de transição dúctil-frágil ficou em torno de -17 a 18 °C o que é confirmado através do maior desvio padrão apresentado nas Tabelas 9 e 10 e ainda pelo grau de dificuldade de determinar as características das fraturas entre dúctil ou frágil, sendo necessário a realização de mais ensaios em temperaturas próximas a -18 °C para ter maior precisão da faixa de temperatura de transição.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE API 5CT. **Specification for casing and tubing**. United States of America: API, 2010.

BATISTA, G. Z. **Curvamento por indução de tubo da classe API 5L X80**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=8660@1>. Acesso em: 16 set. 2022.

BRITO, V. L. O. D. *et al.* **Evolução dos aços para tubos API utilizados no transporte de óleo e gás**. Faculdade de Engenharia Química de Lorena - USP. Lorena, p. 13. 2000.

CALDEIRA, E. A. **Processamento de um aço ARBL no laminador de tiras a quente da CST visando atender a norma API 5L, grau X 70**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8DGK9X>. Acesso em: 10 ago. 2022.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais uma itrodução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica: materiais de construção mecânica**. São Paulo: McGraw - Hill Ltda, 1986.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2005.

CHILQUE, A. R. A.; COSTA, P. S.; ROCHA, R. D. S. C. Caracterização metalúrgica de soldas depositadas em camadas sobre chapa de aço ARBL X80 utilizando o processo de soldagem robotizada com arame tubular. *In: CONGRESSO ANUAL DA ABM*, 70., 2015, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABM, 2015. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/download-pdf/caracterizacao-metalurgica-de-soldas-depositadas-em-camadas-sobre-chapa-de-aco-arbl-x80-utilizando-o-processo-de-soldagem-robotizada-com-arama-tubular>. Acesso em: 30 set. 2022.

EIRAS, R. Brasil: a potência do petróleo marítimo. **IDN - Revista Nação e Defesa**, Brasília, n.138, p. 117-129, 2014. Disponível em: <https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/22905>. Acesso em: 25 set. 2022.

ESPEZUA, S. V. P. **Avaliação da tenacidade à fratura na região de transição dúctil - frágil dos aços API 5L X70 e 80 utilizando a metodologia da curva mestra**. 2010. Tese (Doutorado em Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/105347/espezua_svp_dr_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 28 ago. 2022.

FERNANDES, P. E. A. **Avaliação da tenacidade à fratura da zona afetada pelo calor (ZAC) do aço API 5L X80 pelos processos SMAW e FCAW**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Naval e Oceânica) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo,

2011. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-30032012-121048/pt-br.php>. Acesso em: 18 ago. 2022.

FERREIRA, L. H. R.; JÚNIOR, J. M. M. Aplicação de aços API 5L X100 e X120 na construção de gasodutos na indústria de petróleo. *In: SEMINÁRIO DE PESQUISAS EM ENGENHARIA MECÂNICA*, 20., 2021, Niterói. **Seminário** [...]. Niterói: UFF, 2021. Disponível em: https://petmec.uff.br/wp-content/uploads/sites/288/2021/09/Ferreira_TCC2.pdf. Acesso em: 18 set. 2022.

GROOVER, M. P. **Introdução aos processos de fabricação**. Rio de Janeiro : LTC, 2014.

LAWELL, C.-Y. C. L. Estimating Supply and Demand in the World Oil Market. **The Journal of energy and development**, New York, v 34, p. 1-32, 2011. Disponível em: https://clinlawell.dyson.cornell.edu/oil_mkt_sd_paper.pdf. Acesso em: 24 set. 2022.

LIMA, T. D. D. **Desafios tecnológicos na exploração de petróleo em águas profundas: o sistema Petrobras de inovação**. 2015. Dissertação (Mestrado em Economia Industrial e da Inovação Tecnológica) - Faculdade de Ciências e Letras, Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2015. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/132629/000856012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 24 set. 2022.

LOURAL, M. S.; SILVA, C. G. R. S.; MORTARI, V. S. A Petrobras como agente do desenvolvimento produtivo no Brasil: importância e esvaziamento. *In: ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA INDUSTRIAL E INOVAÇÃO*, 4., 2019, Campinas. **Anais** [...]. Campinas: ENEI, 2019. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br/s3-sa-east-1.amazonaws.com/engineeringproceedings/enei2019/1.1-009.pdf>. Acesso em: 26 set. 2022.

MAIA, D. M. **Levantamento da cinética de revenimento de um aço-carbono ligado ao V, B, Cr, Ni e Mo**. 2010. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Física) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-967KDT>. Acesso em: 17 out. 2022.

MELO, L. C. R. **Desenvolvimento de tubo ARBL contendo 1Cr 0,2 Mo fabricado pelo processo ERW/HF destinado à indústria de petróleo e gás**. 2013. Dissertação (Mestrado em Materiais) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/94462>. Acesso em: 20 out. 2022.

MILANI, E. J. *et al.* Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 351-396, 2000. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbg/a/JGn9T8vGsmMZVRhGLZC95XP/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 15 set. 2022.

MORAIS, J. M. D. Repositório do Conhecimento do IPEA. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore**. Brasília, DF: Ipea, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/1147>. Acesso em: 24 set. 2022.

MORAIS, J. M. D. **Petrobras: uma história das explorações de petróleo em águas profundas e no pré-sal**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

PAULA, M. P. M. D. **Análise da influência dos parâmetros de soldagem na microestrutura e propriedades mecânicas de uma junta soldada de tubos sem costura API X70QS para aplicação linepipe sour service**. 2018. Dissertação (Mestrado em Metalurgia de Transformação) - Universidade Federal de Minas, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-B3DJPX>. Acesso em: 18 set. 2022.

PETROBRÁS. **Petrobrás BR**, 2022. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/quem-somos/perfil/>. Acesso em: 25 set. 2022.

PFEIL, W. **Estruturas de aço: dimensionamento prático**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

PLAUT, R. L. *et al.* Estudo das propriedades mecânicas do aço API X70 produzidos através da laminação controlada. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**. São Paulo, v.6, p. 7 -12, 2009. Disponível em: <https://tecnologiammm.com.br/article/10.4322/tmm.00601002/pdf/tmm-6-1-7.pdf>. Acesso em: 05 out. 2022.

SILVA, M. D. C. **Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço API 5L X80 e determinação experimental de curvas J-R para avaliação da tenacidade a fratura**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-11022005-162828/pt-br.php>. Acesso em: 10 out. 2022.

SILVA, P. N. D. **Desenvolvimento de tubo de aço API 5CT grau L80 com 1% cromo soldado por ERW/HFIW**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: https://minerva.ufrj.br/F/?func=direct&doc_number=000861591&local_base=UFR01#.ZApYHXbML-g. Acesso em: 20 set. 2022.

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. Dissertação (Mestrado em Materiais) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/138843>. Acesso em: 20 ago. 2022.

TEIXEIRA, R. **Avaliação da tenacidade charpy-v de um tubo API 5CT N 80Q temperado e revenido a 600°**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/216382>. Acesso em: 30 jul. 2022.

VALE, A. R. M. D. **Tratamento térmico**. Belén, PA: IFPA, 2011. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/12/09_tratamento_termico.pdf. Acesso em: 01 out. 2022.

VIEGAS, T. D. O. C.; ARANTES, L. S. **Exploração e produção de petróleo e gás em águas profundas**. Belo Horizonte, MG: Poisson, 2019. Disponível em: <https://poisson.com.br/2018/produto/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas-em-aguas-profundas-aspectos-economicos-regulatorios-e-tecnologicos/>. Acesso em: 15 out. 2022.

YSHII, L. N.; CHIODO, M. S. G. **Aplicação de aços de alta resistência em dutos de transporte de óleo e gás**: implicações sobre o projeto e construção. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/item/003109333>. Acesso em: 13 set. 2022.