

RAFAEL JOSE PAULO TEIXEIRA

**Avaliação da tenacidade Charpy-V de um tubo de aço API 5CT N80Q temperado e
revenido a 600°C**

Rafael Jose Paulo Teixeira

Avaliação da tenacidade Charpy-V de um tubo de aço API 5CT N80Q temperado e revenido a 600°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 (a): Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

Guaratinguetá - SP
2018

T266a	Teixeira, Rafael José Paulo Avaliação da tenacidade Charpy-V de um tubo de aço API 5CT N80Q temperado e revenido a 600°C / Rafael José Paulo Teixeira – Guaratinguetá, 2019. 63 f : il. Bibliografia: f. 60 Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019. Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento 1. Aço - Fadiga. 2. Aço – Tratamento térmico. 3. Soldagem. I. Título. CDU 669.14
-------	--

Luciana Máximo

Bibliotecária CRB-8/3595

RAFAEL JOSE PAULO TEIXEIRA

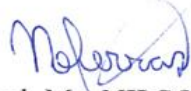
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “**GRADUADO EM**
ENGENHARIA MECÂNICA”

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

Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


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


Tecnol. Me. NILSON ANEAS FERRAZ
UNESP-FEG


Eng. Me. DANIEL AUGUSTO RAINHA ROLANDO
Membro Externo

Dezembro de 2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus pelo dom da vida e por sua obra universal;

à minha família, pela educação, ensinamentos e apoio incessável em todos os momentos da minha vida. Suporte fundamental para formação do meu caráter e personalidade, sem eles não vejo sentido. Agradecimento especial para meus pais, Marco e Denise, para meus irmãos Diego e Tiago, aos meus avós Tonhão e Wilma, às memórias de meus avós Lauro e Waldice e à minha companheira Stefanny que ao longo de minha vida me deram força e apoio nas decisões tomadas;

ao meu orientador Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento, pela prestatividade e paciência em ensinar e suportar o desenvolvimento deste estudo;

aos meus amigos pelo companheirismo e momentos de descontração que se fizeram fundamentais no decorrer dos anos;

à UNESP e todos os seus colaboradores que, de alguma forma, tornaram este trabalho possível, em especial ao técnico Célio pelas ajudas prestadas para o desenvolvimento deste trabalho.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando
nos mantemos fiéis a nós mesmos”

Friedrich Nietzsche

TEIXEIRA, Rafael Jose Paulo. **Avaliação da tenacidade Charpy-V com entalhe agudo de um tubo de aço API 5CT N80Q temperado e revenido a 600°C**. 2018. 60 f. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

RESUMO

A alta demanda por combustíveis fósseis, óleo e gás, têm promovido o investimento no desenvolvimento de novas tecnologias que permitam a exploração destes combustíveis em ambientes ainda mais hostís e desconhecidos, como em águas ultra-profundas. Tal investimento está presente no plano de desenvolvimento das principais empresas do setor no mundo. Nos aços microligados, se encontram grande parte dos esforços de desenvolvimentos tecnológicos, e este estudo propõe uma rotina de tratamentos térmicos para a obtenção de elevada resistência ao impacto, resultando em elevada resistência mecânica e tenacidade. O principal objetivo do presente trabalho é avaliar a tenacidade ao impacto de um aço API 5CT grau N80 tipo Q temperado e revenido à 600 [°C], através de ensaios de dureza e de impacto Charpy-V. Foram ainda analisados a validade de um ensaio em cdp (corpo de prova) alternativo, de seção abaulada, retirado diretamente da parede do tubo, com o objetivo de reduzir custos dos ensaios, e o efeito de um entalhe mais agressivo, de raio reduzido, com o objetivo de avaliar uma situação mais severa como o caso de uma trinca. Os resultados obtidos nos ensaios validam a proposta da rotina de tratamentos térmicos, visto que a energia absorvida no ensaio de impacto à 0 [°C] foi de 154,05 [J], valor muito superior ao especificado pela norma API 5CT (27 [J]). A análise dos dados entre os cdps indica uma forte dependência da área da secção transversal e da temperatura do ensaio, outros fatores como geométrico e orientação do entalhe podem ser significantes para a obtenção de uma correlação válida para o uso de um cdp alternativo. A análise da influência do raio do entalhe não apresentou dados significativos e conclusivos.

PALAVRAS-CHAVE: Aço. API 5CT N80Q. Revenimento. Charpy.

TEIXEIRA, Rafael Jose Paulo. **Charpy-V impact toughness analysis with sharp notch of a API 5CT N80Q tube quenched and tempered at 600°C**. 2018. 60 p. Undergraduate Thesis (Mechanical Engineering Graduation) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

ABSTRACT

The high demand for fossil fuels Gas & Oil have promoted the investment on developing new technologies that allow exploring those fuels in unknown and hostiles environments such as ultra-deep water. Such investments are seen in the business plan of the most important companies of the sector in the world. In HSLA steels are a great piece of the technology developing enforcements and this paper proposes a heat treatment routine envisioning great impact resistance resulting in high resistance and tenacity. The major goal of this study is to analyze the notch toughness of an API 5CT grade N80 type Q quenched and tempered at 600 [°C] through hardness and Charpy-V notch impact test. I was also analyzed the validity of using an alternative specimen with cambered section taken directly from the tube wall looking for tests cost reduction and the effect of a more aggressive notch with a smaller bottom radius with the objective to evaluate the material in a harsher situation such as a crack. The test result validates the proposed heat treatment routine as the absorbed energy in the impact test at 0 [°C] was 154,05 [J] a much higher value than the specified in the API 5CT standard. Through data analysis it is concluded that there is a strong dependence on the cross-section area of the specimen and the test temperature, other coefficients such as geometric and notch orientation may be important to the validation of a test with an alternative specimen. Analyzing the notch bottom radius influence it shows non-conclusive an insignificant data.

KEYWORDS: Steel. API 5CT N80Q. Tempering. Charpy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição da matriz energética Brasileira.	14
Figura 2. Lâminas d'água dos reservatórios perfurados no Brasil.	15
Figura 3. Profundidade dos reservatórios perfurados no Brasil.	16
Figura 4. Sistemas da Sonda de Perfuração.	17
Figura 5. Sistema Reel-Lay.	18
Figura 6. Esquema de classificação para as várias ligas ferrosas.	21
Figura 7. Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido.	26
Figura 8. Temperatura do revenido vs dureza e resistência ao choque.	27
Figura 9. Locais típicos para retirada de amostras para teste.	31
Figura 10. Orientação da amostra para ensaio Charpy.	32
Figura 11. Dimensões do corpo de prova Charpy.	33
Figura 12. Fluxo de produção e controle de qualidade.	35
Figura 13. Esquema da laminação controlada com e sem o resfriamento acelerado.	37
Figura 14. Seção de tubo API 5CT grau N80 tipo Q.	39
Figura 15. Corte dos cdps em eletroerosão a fio.	40
Figura 16. Seção transversal das amostras.	41
Figura 17. Área da seção resistente ao impacto dos corpos de prova abaulado e usinado.	41
Figura 18. Dimensões dos corpos de prova.	42
Figura 20. Diagrama Fe-C.	43
Figura 21. Austenitização dos corpos de prova.	44
Figura 22. Durômetro WOLPERT.	45
Figura 23. Pontos de medição de dureza.	46
Figura 24. Equipamento de ensaio de impacto Charpy.	47
Figura 25. Meios de resfriamento dos corpos de prova: a) Gelo; b) Gelo + Sal (NaCl) + Alcool; c) Gelo seco; d) Nitrogênio Líquido.	48
Figura 26. Microscópio EPIHOT 200 e câmera AxioCam ERc 5s.	49
Figura 27. Demonstração do impacto no pêndulo nos cdps usinado e abaulado.	53
Figura 28. Superfícies de fratura. A) 0 [°C]; B) -20 [°C]; C) -72 [°C].	56
Figura 29. Microestrutura do Aço API 5CT grau N80 tipo Q temperado e revenido à 600 [°C] com ampliação de 50X.	57

Figura 30. Microestrutura do Aço API 5CT grau N80 tipo Q temperado e revenido à 600 [°C]
com ampliação de 100X. 58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química, fração mássica [%].....	29
Tabela 2. Requisitos de tensão e dureza.	30
Tabela 3. Requisitos de energia mínima absorvida Charpy para tubos.	30
Tabela 4. Tamanho de corpo de prova necessário para tubos temperados e revenidos.	33
Tabela 5. Dimensões dos corpos de prova e fatores de redução.	34
Tabela 6. Composição química do aço API 5CT N80 tipo Q.	39
Tabela 7. Dados do ensaio de dureza.	50
Tabela 8. Análise estatística da dureza.	51
Tabela 9. Resultados do ensaio de impacto Charpy V em cdp usinado.	52
Tabela 10. Resultados do ensaio de impacto Charpy V em cdp abaulado.	52
Tabela 11. Avaliação da influência da geometria do cdp na energia absorvida.....	53
Tabela 12. Avaliação da influência do raio de fundo do entalhe na energia absorvida.	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área
A ₁	Temperatura de Austenitização
Ar	Área resistente
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga e – Deformação ε – Deformação verdadeira
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Cdp	Corpo de prova
HSLA	<i>High Strength Low Alloy</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
OCTG	<i>Oil Country Tubular Goods</i>
O&G	<i>Oil and Gas</i>
P _{cm}	Percentual de Carbono Médio
ΔE	Variação de energia absorvida
%p	Porcentagem em massa

SÍMBOLOS

ε	Alongamento
σ_e	Limite de escoamento
σ_r	Limite de resistência
Al	Alumínio
C	Carbono
Cu	Cobre
Cr	Cromo
Mo	Molibidênio
Mn	Manganês
MnS	Sulfeto de manganês
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
P	Fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
Ti	Titânio
V	Vanádio

SUMÁRIO

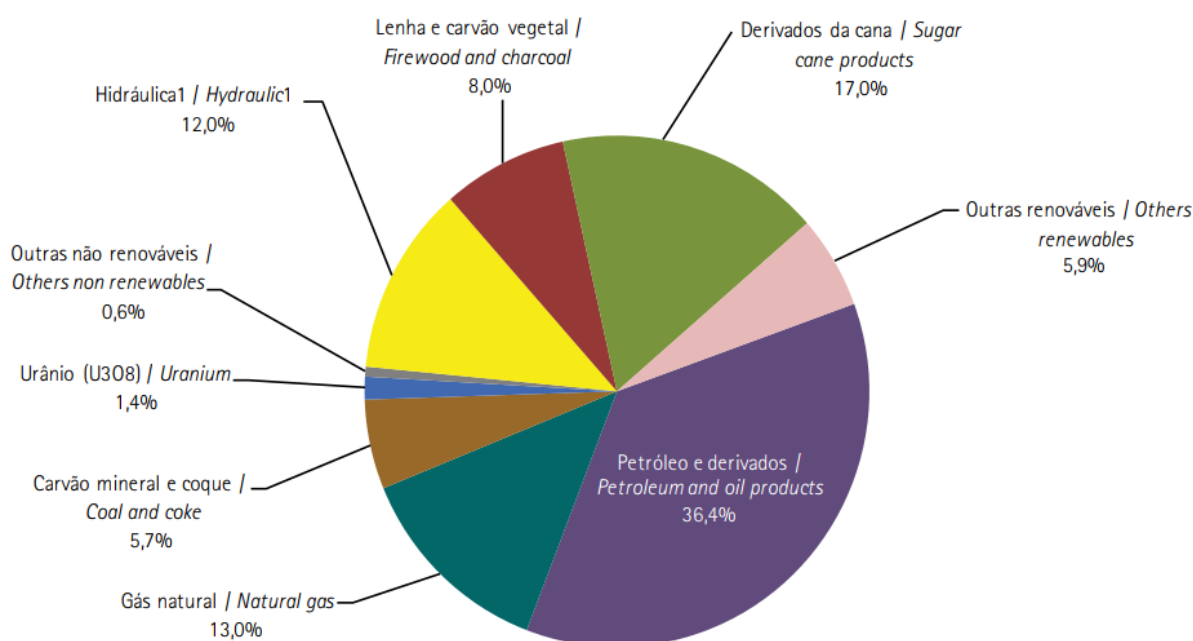
1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVO.....	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	Erro! Indicador não definido.
3.1	AÇOS.....	20
3.1.1	Classificação dos aços	20
3.1.1.1	Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)	21
3.1.2	Efeito dos elementos de liga nos aços	23
3.1.3	Carbono equivalente em aços ligados	25
3.1.4	Tratamentos térmicos em aços ARBL	25
3.1.4.1	Têmpera	26
3.1.4.2	Revenimento	27
3.2	NORMA API 5CT	28
3.2.1	Aço API 5CT grau N80Q	29
3.2.2	Ensaio de dureza conforme API	30
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
4.2.1	Tratamento térmico	43
4.2.2	Ensaio de dureza	45
4.2.3	Ensaio de impacto Charpy V	46
4.2.4	Análise metalográfica	48
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
5.1	ENSAIO DE DUREZA	50
5.2	ENSAIO DE IMPACTO CHARPY V	51

5.3	ANÁLISE METALOGRÁFICA.....	56
6	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

Os combustíveis fósseis têm a maior representatividade na matriz energética brasileira, estes correspondem a 54,7% da oferta interna de energia (EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2018). O petróleo atua como principal fonte energética e sua versatilidade tem sido decisiva para a extensão de suas aplicações e expansão em todos os países, sendo um dos vetores do processo de globalização (FGV PROJETOS, 2012). Esta Indústria apresenta um histórico de crescimento rápido para atender à demanda do mercado mundial pelos vários subprodutos gerados a partir da extração de óleo e gás dos combustíveis fósseis (VILAS BÔAS, 2012).

Figura 1. Distribuição da matriz energética Brasileira.



Fonte: EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (2018)

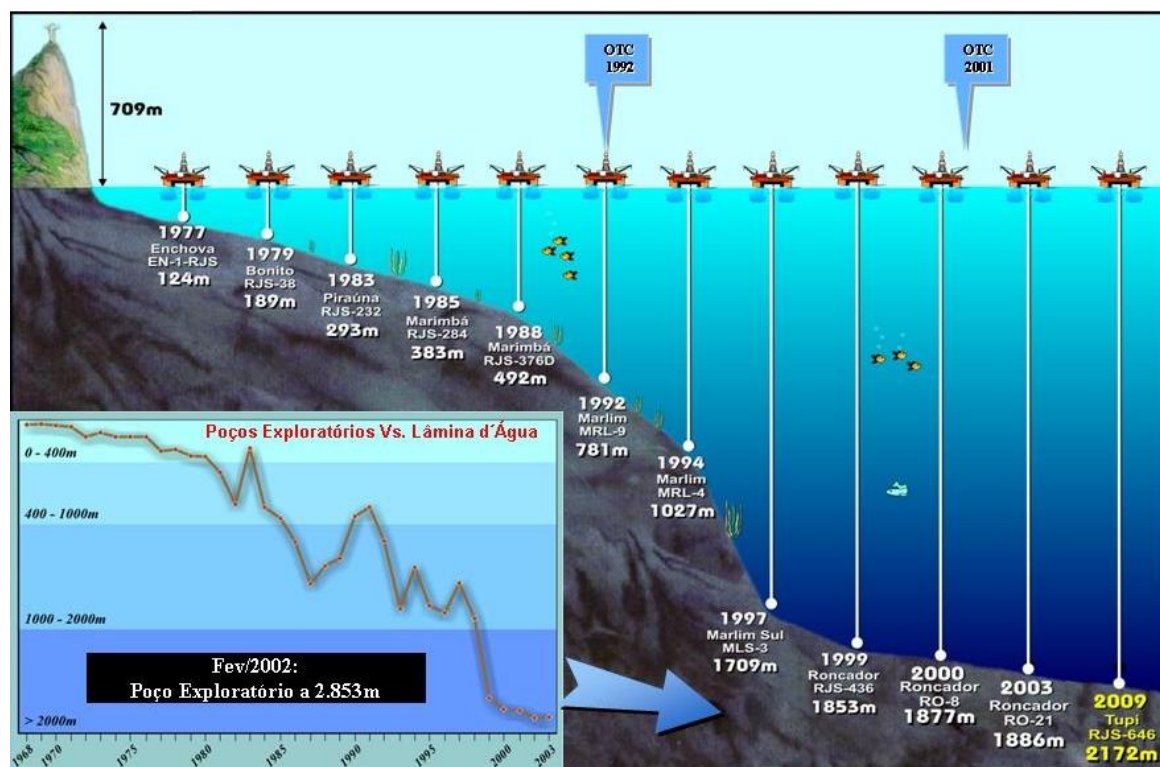
A busca de petróleo é uma aposta que envolve a mobilização de grande volume de investimentos sob elevado nível de risco (FGV PROJETOS, 2012). A exploração do petróleo em águas profundas (entre 300 m e 1500 m abaixo da lâmina d'água) e especialmente ultraprofundas (acima de 1.500 m de profundidade), como é o caso do pré-sal, é um dos principais motivos da demanda de avanços e inovações tecnológicos da indústria petrolífera

brasileira. (MORAIS, 2013; SORRIJA, 2016). Desde 2005, o volume das descobertas em águas ultraprofundas tende a deslocar a fronteira de produção para essas áreas nas próximas décadas (FGV PROJETOS, 2012).

A descoberta do pré-sal data de 2006 e tem desviado as atenções do mundo, então focadas na produção da cana-de-açúcar para fabricação de etanol, no contexto de crise energética e preocupações ambientais (GOUVEIA, 2010b). Estas descobertas estão entre as mais importantes em todo o mundo na última década. Essa província é composta por grandes acumulações de óleo leve, de excelente qualidade e com alto valor comercial (PETROBRAS, 2018a). Estima-se que a camada pré-sal tenha uma área de 112 mil [km²], dos quais 41 mil [km²] já foram licitados e concedidos. Essa camada tem aproximadamente 800 [km] de comprimento e, em algumas áreas, 200 [km] de largura (LIMA, 2008). As novas profundidades representam grandes desafios tecnológicos e econômicos em matéria de sísmica, perfuração, produção e caracterização das reservas (FGV PROJETOS, 2012).

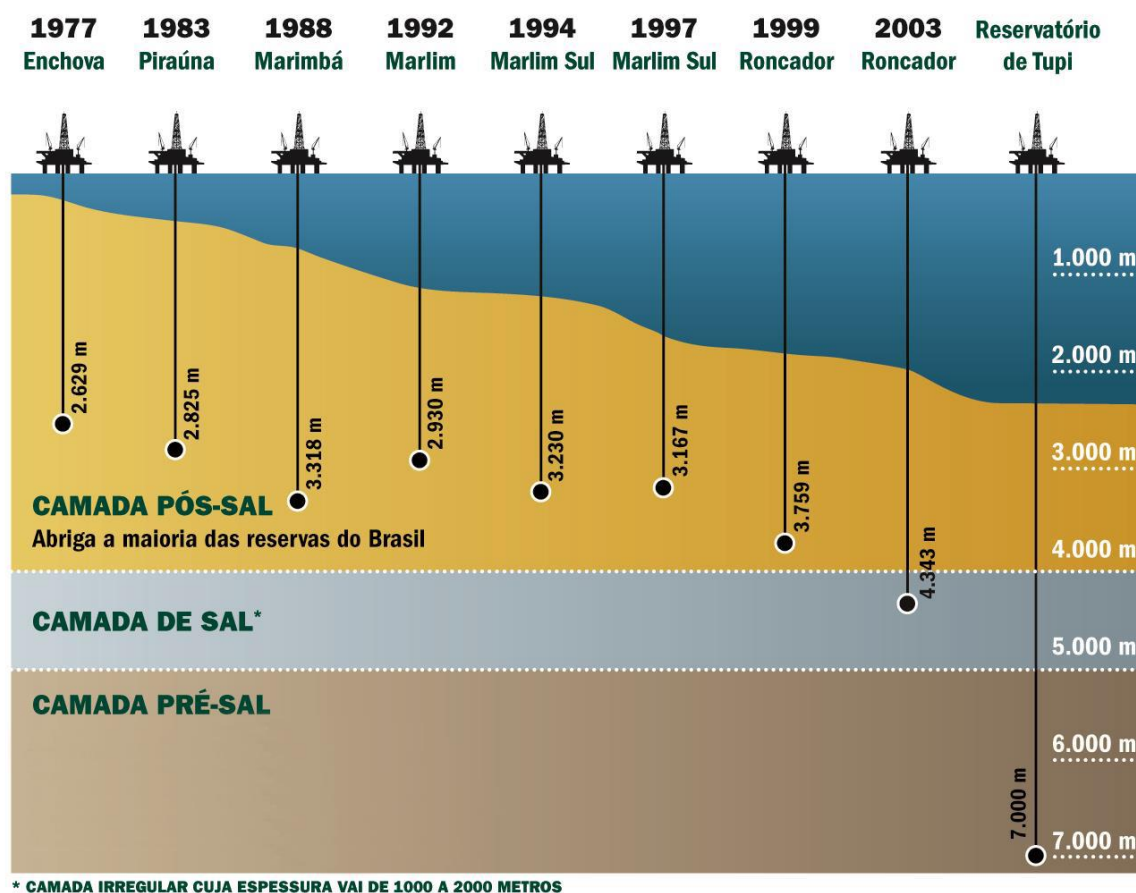
As Figuras 2 e 3 apresentam o avanço da extração de petróleo na costa brasileira em termos de lâminas de água dos poços e dos reservatórios, respectivamente, perfurados pela Petrobras no decorrer dos anos.

Figura 2. Lâminas d'água dos reservatórios perfurados no Brasil.



Fonte: Adaptado de Agência Petrobras (2013)

Figura 3. Profundidade dos reservatórios perfurados no Brasil.



Fonte: Agência Petrobras (2013)

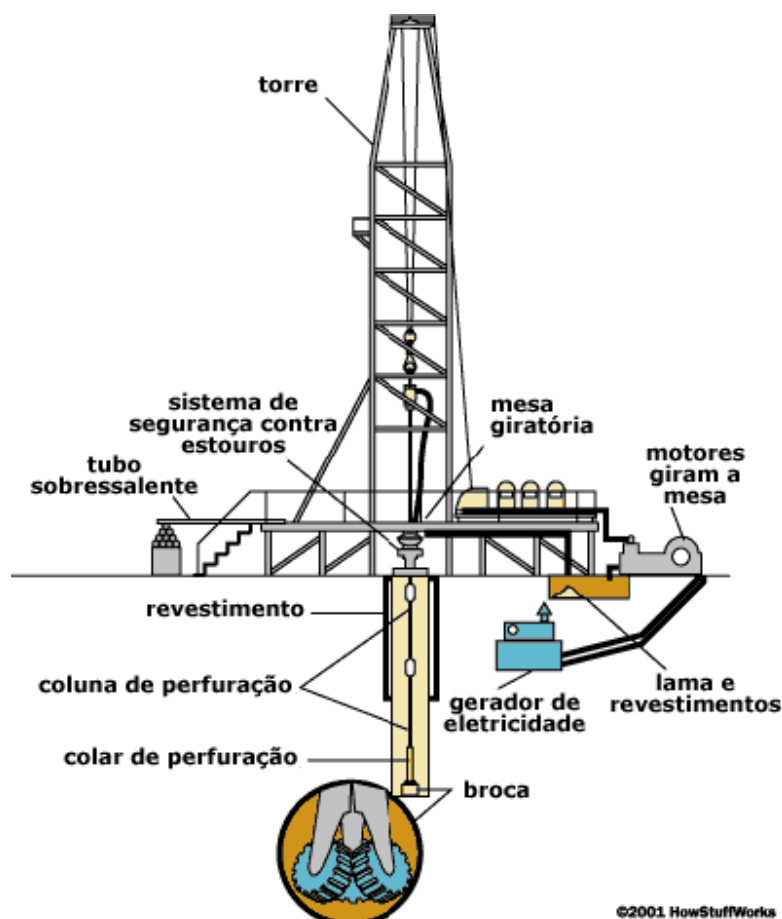
A descoberta de novos reservatórios, ainda mais profundos e mais afastados da costa, tem afetado toda a indústria. Foram necessárias novas tecnologias, envolvendo novos equipamentos e fluidos para suportarem condições mais hostis, com pressões e temperaturas cada vez mais altas, fazendo com que os projetos ficassem mais sofisticados, caros e demorados, aumentando também os riscos dos projetos.

Para que a descoberta e operação com eficiência em águas profundas seja possível, novas tecnologias vêm se desenvolvendo de forma conjunta com universidades e centros de pesquisas (PETROBRAS, 2018a). O Plano de Negócios e Gestão 2018-2022 da Petrobras prevê investimentos de US\$ 74,5 bilhões, sendo 81% deste valor para a área de Exploração e Produção (PETROBRAS, 2018b).

As tubulações utilizadas para prospeção marítima de óleo e gás podem ser rígidas ou flexíveis. A instalação destas tubulações é muito complexa e as condições de operação são extremamente severas e para que se garanta a integridade estrutural da tubulação no momento da instalação e na operação muitas variáveis devem ser controladas.

Na figura 3 vemos uma ilustração de um sistema de sonda de perfuração para extração de petróleo.

Figura 4. Sistemas da Sonda de Perfuração.



Fonte: TECNOPETRO BR (2008)

Devido ao fato de os dutos flexíveis estarem chegando ao seu limite tecnológico de capacidade de utilização em grandes profundidades, a utilização de dutos rígidos nas instalações marítimas em águas profundas vem ganhando grande representatividade. Apesar desta tecnologia apresentar um custo mais elevado, esta solução ganha mais apoio das empresas exploradoras a cada ano. A limitação das tubulações rígidas está relacionada principalmente com limite de tamanho das embarcações disponíveis no mercado (VILAS BÔAS, 2012).

Atualmente os métodos mais comuns de instalação de dutos pela superfície são os métodos *S-Lay*, *J-Lay* e *Reel-Lay*, sendo o último o mais rápido no lançamento e apresenta o melhor custo-benefício, podendo ser até dez vezes mais rápidos que os métodos *S-Lay* e *J-Lay* (GOUVEIA, 2010a; NETTO; et al., 2008). No método *Reel-Lay* (Figura 4), a fabricação do

tubo, soldagem e embobinamento em carretéis de grande diâmetro, é feita em terra e então a bobina é levada na embarcação para instalação.

Figura 5. Sistema Reel-Lay.



Fonte: HUISMAN (2018)

O inconveniente deste método é o fato de que deformações plásticas são induzidas no tubo no momento do embobinamento e no momento da instalação, o que pode afetar as propriedades mecânicas do tubo. A variação das propriedades mecânicas pode gerar o chamado Efeito Bauschinger que consiste na diminuição da tensão de escoamento quando, após a deformação em uma dada direção, ocorre deformação na direção oposta (VILAS BÔAS, 2012). Este efeito pode afetar a resistência, a ductilidade, a tenacidade, a resistência ao colapso e a suscetibilidade à corrosão do aço.

2 OBJETIVO

Os principais objetivos deste trabalho são:

- Avaliação da resistência ao impacto de um tubo de aço API 5CT grau N80 tipo Q temperado e revenido a 600 [°C] por meio de ensaio de impacto Charpy V;
- Validação dos resultados com base nos requisitos da norma API 5CT;
- Avaliação da viabilidade de um ensaio com corpo de prova alternativo, de seção abaulada, retirado diretamente da parede do tubo como objeto de validação do material. Esta análise visa a redução de custo na execução dos testes nas empresas fabricantes;
- Análise do efeito de um entalhe mais agressivo, de raio de fundo de 0,1 [mm], com objetivo de avaliar o material em uma condição mais crítica, como o caso de uma trinca inclusa.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 AÇOS

Aços são ligas essencialmente Fe-C, com teores de carbono menores do que 2 [%p], podendo ou não ter adição de outros elementos de liga em concentrações apreciáveis para obtenção de melhores propriedades (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Esta categoria de liga ferrosa é a mais usada e difundida no mundo, devido a sua fabricação em larga escala ser econômica, além de proporcionarem uma vasta gama de aplicações por serem capazes de atender diferentes propriedades mecânicas através de seu processamento (CARVALHO, 2015).

3.1.1 Classificação dos aços

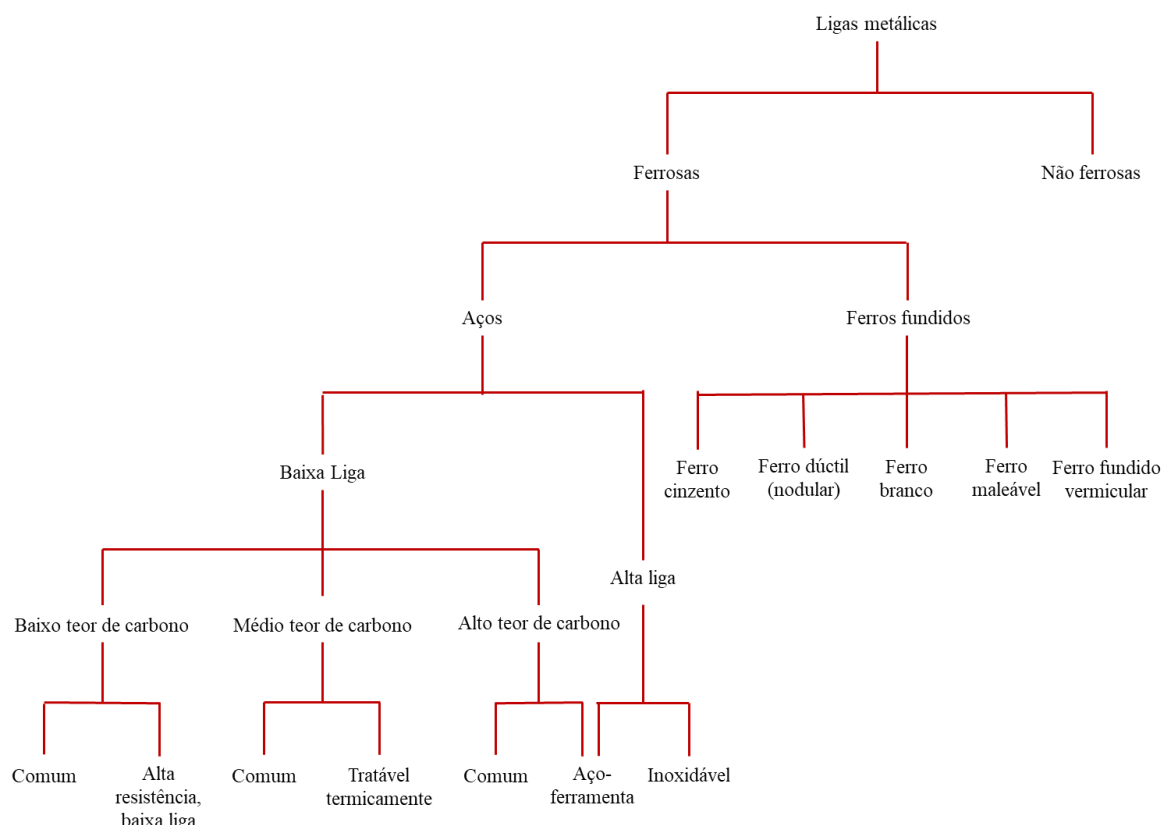
Aços podem ser classificados em diversos sistemas com base em:

- Composição química;
- Processos de fabricação;
- Métodos de acabamento;
- Forma;
- Microestrutura;
- Nível de resistência;
- Tratamento térmico, etc.

O método de classificação mais usual é através de sua composição química, sendo esta a mais utilizada para especificações técnicas do material (ASM INTERNATIONAL, 1990; CARVALHO, 2015).

A Figura 5 apresenta as principais classes de ligas metálicas com base em sua composição química.

Figura 6. Esquema de classificação para as várias ligas ferrosas.



Fonte: Callister; Rethwisch (2012)

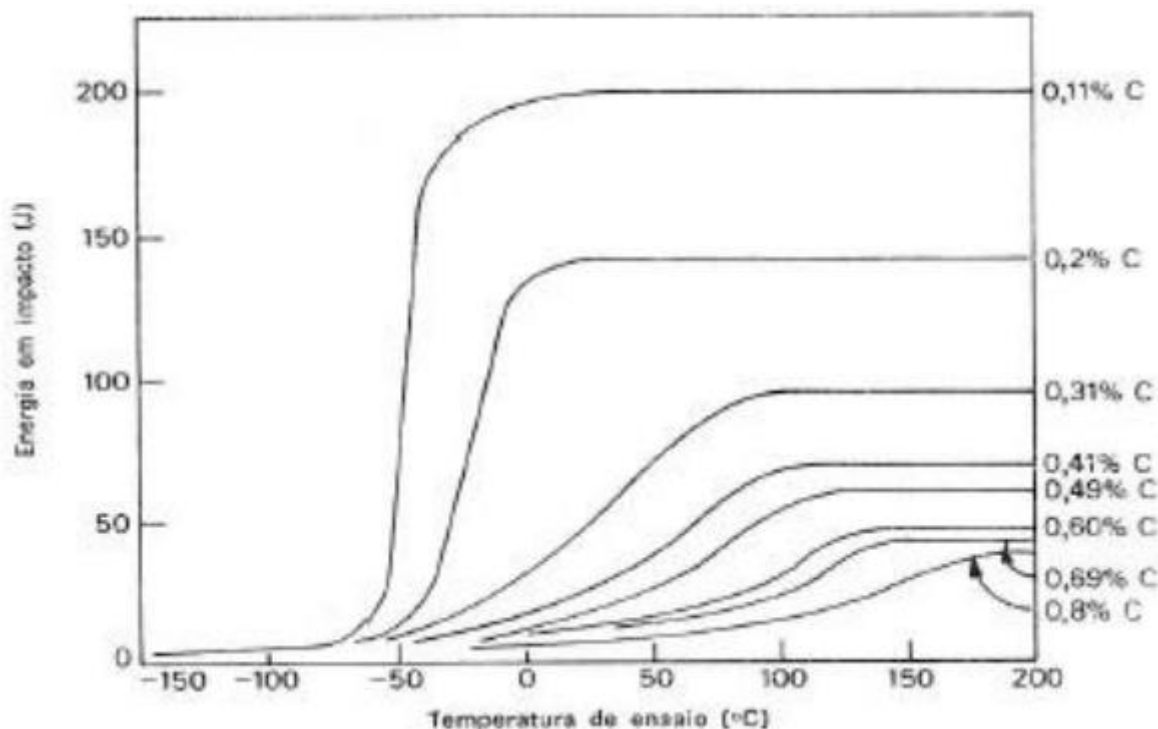
3.1.1.1 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)

Anteriormente aos desenvolvimentos dos aços microligados e da laminação controlada, os mecanismos de endurecimento eram adições de carbono e manganês, com adições de até 0,4 [%p] de C e 1,5 [%p] de Mn se atingia limites de escoamento da ordem de 400 [Mpa]. Porém, esta prática afetava negativamente a tenacidade ao impacto e a soldabilidade do material, visto que a tenacidade ao impacto reage de forma proporcionalmente inversa à fração volumétrica de perlita. Outro fator também afetado pelo percentual de carbono é a temperatura de transição dúctil-frágil, a figura 6 apresenta esta relação (LINO, 2017).

Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL ou HSLA -*high strength low alloy*) são aços microligados, ou seja, aços contendo adições de elementos microligantes como Cu, Mo, Ni, Nb, Ti e V, cujas concentrações combinadas podem chegar a 10%p. Sua microestrutura ferrítica-perlítica mais refinada e capacidade de endurecimento por precipitação lhe

proporcionavam maior resistência mecânica (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; GORNI, 2008).

Figura 7. Efeito do teor de carbono na tenacidade ao impacto e nas curvas de transição dúctil-frágil de aços carbono.



Fonte: Lino (2017)

A necessidade de se obter materiais de elevada resistência mecânica acompanhada de suficiente rigidez e ductilidade trouxe o desenvolvimento de aços de alta resistência com o objetivo de melhorar a performance e durabilidade para operação em ambientes severos (ROSADO; WAELE; VANDERSCHUEREN, D., HERTELE, 2013).

A maioria destes aços ARBL apresentam aumento de resistência por tratamento térmico, podendo apresentar limites de resistência à tração superiores à 480 [MPa]. Os elementos de liga destes aços formam precipitados capazes de controlar o tamanho e o crescimento dos grãos. Eles apresentam uma maior resistência à corrosão que aços-carbono comuns além de serem mais dúcteis, conformáveis e usináveis (CALLISTER; RETHWISCH, 2012; CARVALHO, 2015; COLPAERT, 1994)

3.1.2 Efeito dos elementos de liga nos aços

Aços para aplicação em dutos rígidos em ambientes *offshore* requerem características como: Alta resistência à tração; Boa ductilidade; Boa tenacidade à fratura e Soldabilidade. Escolher um aço para uma determinada instalação requer o balanço de suas propriedades (VILAS BÔAS, 2012).

Ligas de aço representa um grupo extremamente complexo, a combinação de elementos de liga e tratamentos térmicos resultam em uma infinidade de microestruturas e propriedades. Deve-se notar que o efeito de um elemento de liga em particular é afetado pela presença de outros (ASM INTERNATIONAL, 1990).

Abaixo estão apresentados os principais elementos ligantes para aço e seus principais efeitos na estrutura, quando analisados individualmente:

- **Carbono (C):** Conhecido como o principal elemento endurecedor nos aços, sua concentração determina o tipo de aço a ser produzido. Maiores quantidades de carbono resultam em um aço mais resistente, duro, temperável e de melhor acabamento superficial, porém, em contrapartida a ductilidade e soldabilidade são oneradas com a adição deste elemento (ASM INTERNATIONAL, 1990; CARVALHO, 2015).
- **Fósforo (P):** Elemento indesejável na maioria das aplicações, forma um fosfeto de ferro (Fe_3P) quando em elevadas concentrações. Pode ser adicionado em aços de fácil usinagem pois melhora a usinabilidade (ASM INTERNATIONAL, 1990).
- **Enxofre (S):** Elemento prejudicial para a maioria dos aços e normalmente controlados em teores muito baixos, sendo especificados um limite máximo para este elemento.. O enxofre, apesar de influenciar pouco nas propriedades longitudinais, reduz consideravelmente a ductilidade e tenacidade transversal, além de reduzir a soldabilidade e piorar o qualidade superficial. Assim como o fósforo, o enxofre pode ser adicionado com o objetivo de melhorar a usinabilidade do material (ASM INTERNATIONAL, 1990).
- **Manganês (Mn):** Tem menor tendência à macrosegregação do que qualquer outro elemento. É extremamente benéfico para a qualidade superficial em todas as concentrações de carbono, além de contribuir para o aumento da dureza, resistência e especialmente da temperabilidade. Reduz a ductilidade e

soldabilidade, porém em níveis mais baixos do que o carbono. O manganês, por reagir com o enxofre formando sulfeto de manganês (MnS), reduz a fragilidade causada pelo enxofre (ASM INTERNATIONAL, 1990; CARVALHO, 2015).

- **Silício (Si):** Excelente desoxidante e largamente utilizado na produção de aço para este fim, porém, como resultado da desoxidação pode gerar inclusões não metálicas (impurezas). É menos eficiente no aumento da resistência e dureza do que o manganês e tem tendência apiorar a qualidade superficial especialmente em aços de baixo teor de carbono (ASM INTERNATIONAL, 1990).
- **Cobre (Cu):** Elemento benéfico para a resistência à corrosão quando presente em teores maiores do que 0,20 [%p]. Em elevados teores, o cobre é prejudicial para o trabalho a quente, e por isso, afeta a solda por forjamento. Possui tendência moderada de segregar (ASM INTERNATIONAL, 1990).
- **Cromo (Cr):** Elemento muito utilizado para aumento da resistência à corrosão e oxidação, aumento da dureza, aumento da resistência à quente ou melhorar a resistência à abrasão em aços de alto carbono. Pode ser utilizado como elemento endurecedor e é frequentemente utilizado em conjunto com elementos que elevam a tenacidade, como o níquel, resultando em propriedades mecânicas superiores. O cromo contribui para o aumento da resistência mecânica em altas temperaturas e é utilizado para estas aplicações em conjunto com o molibidênio. É também conhecido como um formador de carbonetos, como elemento estabilizador da ferrita (ASM INTERNATIONAL, 1990; CARVALHO, 2015).
- **Níquel (Ni):** Muito utilizado para aumento da tenacidade e temperabilidade, sua utilização em combinado com cromo produz aços com maiores níveis de resistência à fadiga, tenacidade ao impacto e maior capacidade de endurecimento. Por não formar carbeto, permanece em solução sólida na ferrita, aumentando a resistência e tenacidade da fase ferrita. Aços ao níquel são mais fáceis de serem tratados termicamente pois o níquel reduz a taxa crítica de resfriamento abaixando a temperatura de transformação eutetóide e retardando a formação de carbonetos (ASM INTERNATIONAL, 1990; SHIOTA, 2015).
- **Molibidênio (Mo):** Sua principal característica é a endurecibilidade. É normalmente adicionado em teores entre 0,10 e 1,00 [%p]. Atua como estabilizador da ferrita e promove o aumento da resistência e dureza por solução sólida, bem como a temperabilidade, por reduzir consideravelmente a taxa de

reação em comparação com o aço-carbono. Pode induzir endurecimento secundário no revenimento de aços temperados. Os aços ligados que contêm 0,15 a 0,30 [%p] de Mo apresentam uma suscetibilidade minimizada à fragilização por têmpera (ASM INTERNATIONAL, 1990).

- **Alumínio (Al):** É amplamente utilizado como desoxidante e para controle de tamanho de grão. Quando adicionado em quantidades específicas, controla o crescimento de grão da austenita. É o elemento mais eficaz para o controle de tamanho de grão. Forma inclusões indesejáveis denominadas aluminas (ASM INTERNATIONAL, 1990).

3.1.3 Carbono equivalente em aços ligados

O carbono equivalente fornece um valor numérico da contribuição da composição química combinada de diferentes elementos de liga. Medindo o carbono equivalente, sabemos avaliar a temperabilidade do aço (ASM INTERNATIONAL, 1990; CALOI, 2008).

A fórmula do P_{cm} (Equação 1), desenvolvida no Japão por Ito e Bessyo para aços com baixo teor de carbono, para os quais a fórmula CE não é adequada, é usualmente usada para aços modernos como os aços API, onde a quantidade de carbono não passa de aproximadamente 0,11%p (CALOI, 2008).

$$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (1)$$

3.1.4 Tratamentos térmicos em aços ARBL

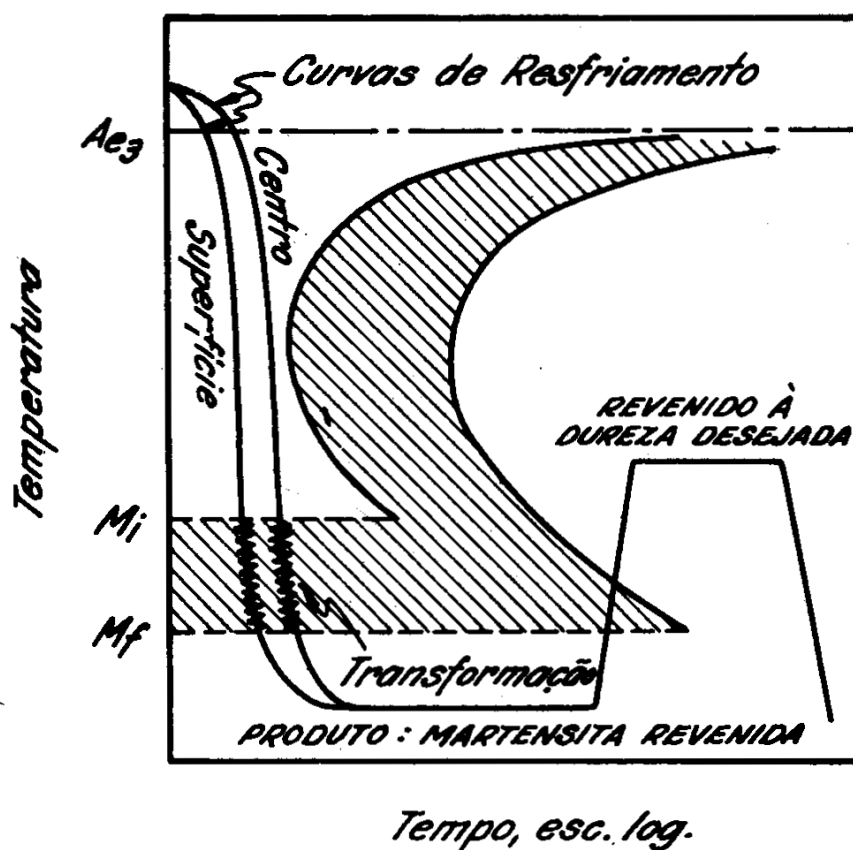
Os tratamentos térmicos são amplamente utilizados como mecanismo de endurecimento através de transformação de fases, em geral a partir da obtenção da martensita, que, ao contrário da transformação da perlita que envolve tanto a redistribuição dos átomos de carbono e mudança estrutural, a transformação da martensita envolve apenas mudança na estrutura cristalina. Os efeitos e severidade do endurecimento estão relacionados a diversos fatores, entre

eles a velocidade de resfriamento e a temperatura em que a transformação ocorre (CARVALHO, 2015).

3.1.4.1 Têmpera

Têmpera é o tratamento térmico de resfriamento rápido de um aço de uma temperatura superior à temperatura crítica (aproximadamente 50 [°C] acima da linha A_1) em um meio como óleo, água, salmoura ou ar. A figura 7 abaixo apresenta um esquemático da operação de têmpera e revenimento. Para que o objetivo da têmpera de obtenção da martensita seja bem sucedido, deve-se prover que a curva de resfriamento passe à esquerda da curva de transformação da austenita, conforme demonstrado (CHIAVERINI, 1986).

Figura 7. Diagrama esquemático de transformação para têmpera e revenido.



Fonte: Chiaverini (1986)

Quando um aço é austenitizado e posteriormente resfriado, a austenita se transformará em outras microestruturas. Se resfriada lentamente, próxima às condições de equilíbrio, a

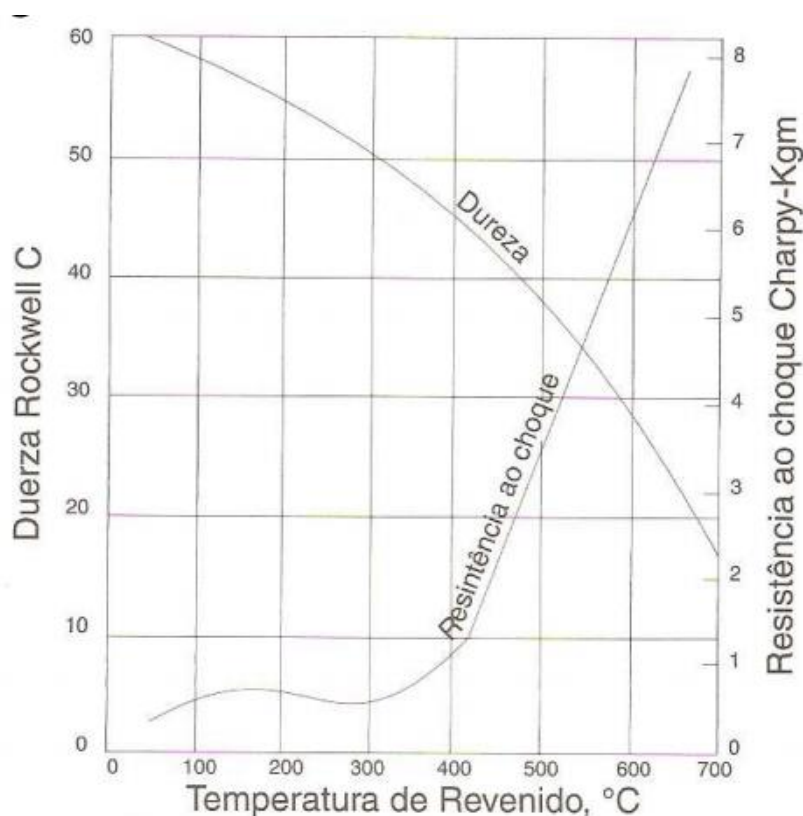
austenita se transformará em misturas de ferrita e cementita; se resfriada rapidamente, se transformará em martensita (CARVALHO, 2015).

3.1.4.2 Revenimento

Martensita é um composto extremamente resistente, porém em sua condição original é também extremamente frágil, portanto, faz-se necessário que após a realização da têmpera, o revenimento em uma faixa entre 150-700 [°C] seja aplicado para que o material apresente maior ductilidade e tenacidade (BHADESHIA; HONEYCOMBE, 2017).

A realização do revenimento após a têmpera é essencial para os aços estruturais. Esse tratamento térmico aumenta a ductilidade e tenacidade do material, tornando-o aplicável para as mais diversas aplicações, unindo assim alta resistência com tenacidade e ductilidade (CARVALHO, 2015). A figura 8 apresenta a influência da temperatura de revenimento nas propriedades do material.

Figura 8. Temperatura do revenido vs dureza e resistência ao choque.



Fonte: Chiaverini (1986)

A temperatura do revenido pode ser escolhida de acordo com a combinação de propriedades mecânicas que se deseja no aço temperado.

Como apresentado por CHIAVERINI (1986), de acordo com a temperatura do revenido ocorrem as seguintes transformações:

- 400-600 [°C]: Recuperação da subestrutura de discordância. Esferoidização da cementita, mantida estrutura de ferrita fina acicular. Redução da dureza Rockwell para aproximadamente 30 [HRC];
- 500-600 [°C]: Em aços contendo Ti, Cr, Mo, V, Nb ou W, ocorre o chamado “endurecimento secundário”, que é a precipitação dos carbonetos de liga;
- 600-700 [°C]: Recristalização e crescimento de grão, estrutura muito tenaz e de baixa dureza.

3.2 NORMA API 5CT

A norma internacional API 5CT especifica as condições técnicas de fornecimento de tubos de aço para condução e produção de petróleo e perfuração de poços (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

Os tubos petrolíferos são divididos em três grandes grupos:

1. *Line pipes* – Tubos para transporte dos fluidos dos campos produtores para os tanques de armazenamento. São designados pelos códigos A25, A, B ou X seguidos por dois números referentes ao limite de escoamento em ksi;
2. OCTG (*Oil Country Tubular Goods*) – Tubos para produção de petróleo e gás ou revestimento dos poços (*tubing* e *casing*, respectivamente). São designados pelos códigos M, J, K, N, L, T, P, Q ou C seguida por dois ou três dígitos referentes ao limite de escoamento em ksi;
3. *Drill pipe* – Tubos para perfuração de poços, em sua extremidade está instalado a broca de perfuração do poço. São designados por uma letra seguida por dois ou três dígitos referentes ao limite de escoamento em ksi (VILAS BÔAS, 2012).

A norma em questão é dividida em diversos graus, sendo a escolha feita em função da profundidade de operação do poço, pois determina as tensões inerentes ao meio e o peso próprio da coluna de tubos que deverá ser suportado (MELO, 2013).

3.2.1 Aço API 5CT grau N80Q

Aços de alta resistência como os aços API, possuem um elevado refinio de grão e pureza. Estes aços são caracterizados pelo baixo teor de S e quantidade pequena de impurezas de segunda fase, como óxidos e inclusões (ROSADO; WAELE; VANDERSCHUEREN, D., HERTELE, 2013).

A Tabela 1 apresenta as limitações impostas pela norma API 5CT para as composições químicas de cada grau.

Tabela 1. 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	—
3	P110	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
	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	—
4	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: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (2010).

Nota-se que, no geral, a norma é bastante flexível quanto a participação em massa de cada elemento químico, abrindo espaço para os fabricantes desenvolverem seus materiais dentro de

cada grau conforme sua experiência e processos de fabricação próprios de cada empresa (MELO, 2013). Enquanto os requisitos para a composição química dos aços API são mais amenos e abrangentes, os requisitos pertinentes às propriedades mecânicas (resistência, dureza e tenacidade ao impacto) são mais restritos e severos. As Tabelas 2 e 3 apresentam os requisitos especificados pela norma para estas propriedades.

Tabela 2. Requisitos de tensão e dureza.

Grupo	Grau	Tipo	Alongamento total sob carga (ϵ)	Limite de escoamento (σ_e) [Mpa]		Limite de resistência (σ_r) (min.) [Mpa]	Dureza (máx.)		Espessura de parede [mm]	Variação de dureza permitida [HRC]
				min	máx.		[HRC]	[HBR]		
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: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (2010).

Tabela 3. Requisitos de energia mínima absorvida Charpy para tubos.

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

Fonte: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (2010).

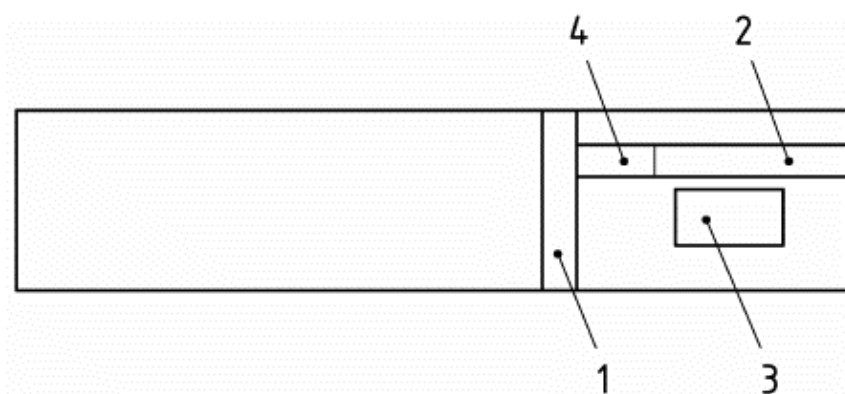
3.2.2 Ensaio de dureza conforme API

As amostras para teste de dureza devem ser extraídas dos locais indicados na figura 6 de acordo com a finalidade do ensaio. As superfícies de teste devem estar paralelas ao solo, livres

de imperfeições, camada de óxido, material alheio e lubrificantes (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

Os testes de dureza devem ser feitos em atendimento às normas ISO 6506-1 ou ASTM E10 para ensaio de dureza Brinell e ISO 6508-1 ou ASTM E18 para ensaio de dureza Rocwell (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

Figura 9. Locais típicos para retirada de amostras para teste.



Fonte: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (2010).

Legenda:

- 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

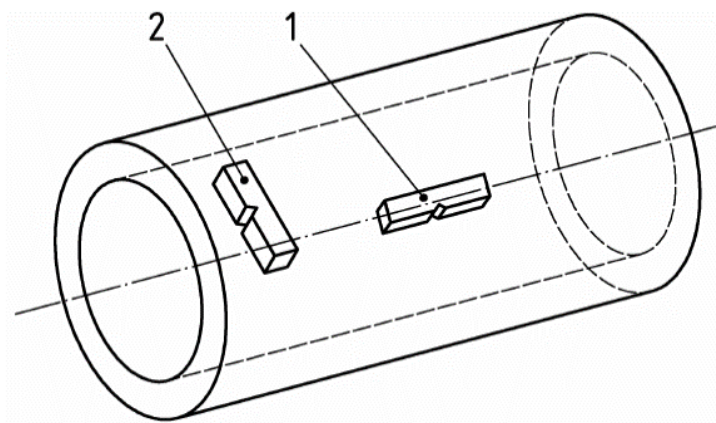
O ensaio de impacto Charpy V deve ser feito de forma especificada na norma ASTM A370 ou ASTM E23.

Para que os resultados sejam avaliados quanto à conformidade com os requisitos da norma API 5CT, os valores obtidos nos experimentos devem ser arredondados para o inteiro mais próximo. O valor de energia ao impacto de um grupo de corpos de prova (por exemplo a média de 3 ensaios) deve ser expressado como um número inteiro, arredondado se necessário.

O arredondamento deve ser feito em atendimento ao método ISO 80000-1 ou ASTM E29 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

A figura 7 representa as orientações das amostras a serem retiradas do produto, em atendimento ao requerido de cada grau. As amostras não podem ser confeccionadas a partir de tubos aplainados. Se o tubo a ser testado for soldado usando uma amostra transversal, a solda deve ser posicionada no entalhe.

Figura 10. Orientação da amostra para ensaio Charpy.



Fonte: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (2010).

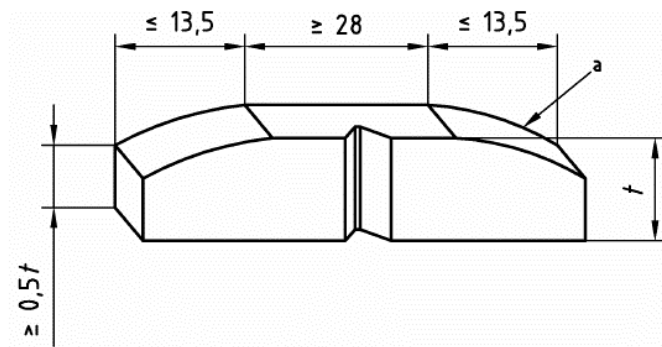
NOTA: Todas as amostras devem ser 10 [mm] x 10 [mm] se possível. O entalhe deve ser orientado perpendicularmente ao eixo do tubo (normal à superfície).

Legenda:

- 1 – Amostra longitudinal;
- 2 – Amostra transversal.

Se necessário, para possibilidade de teste transversal em uma maior quantidade de tubos de pequenas espessuras, a superfície acabada do corpo de prova pode conter a curvatura do diâmetro externo do produto, desde que sejam atendidos os requisitos da figura 11.

Figura 11. Dimensões do corpo de prova Charpy.



Fonte: AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (2010)

NOTA: Dimensões em milímetros.

A tabela 4, a seguir, apresenta os valores de espessura mínima de parede calculada para confecção dos corpos de prova para o ensaio de impacto Charpy V, levando em consideração as amostras nas dimensões inteiro (10x10 [mm]), 3/4 e 1/2.

Tabela 4. Tamanho de corpo de prova necessário para tubos temperados e revenidos.

Especificação do tubo	Espessura de parede necessária para usinagem de amostras para ensaio Charpy (min.)		
	[mm]		
	Inteiro	3/4	1/2
1	2	3	4
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: Adaptado de AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (2010)

Para corpos de prova de tamanho em escala reduzida, a energia mínima absorvida em ensaio de impacto Charpy V deve ser o resultado da multiplicação da energia mínima para um corpo de prova de tamanho inteiro, apresentado na tabela 3, por um fator de redução apresentado na tabela 5. No entanto, não se deve utilizar um corpo de prova de tamanho

reduzido se a especificação da energia absorvida corrigida for menor do que 11 [J] (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

Tabela 5. Dimensões dos corpos de prova e fatores de redução.

CDP	Dimensões [mm]	Fator de redução
1	2	3
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)

A temperatura do ensaio deve ser de 0 [°C] para todos os grupos, com exceção do grupo 1 graus J55 e K55. Os graus J55 e K55 devem ser ensaiados a 21 [°C]. Temperaturas alternativas podem ser especificadas no contrato de fornecimento ou selecionada pelo fabricante para qualquer grau. A tolerância da variação da temperatura, para aceitação do ensaio é de ± 3 [°C] (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

3.3 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS TUBOS

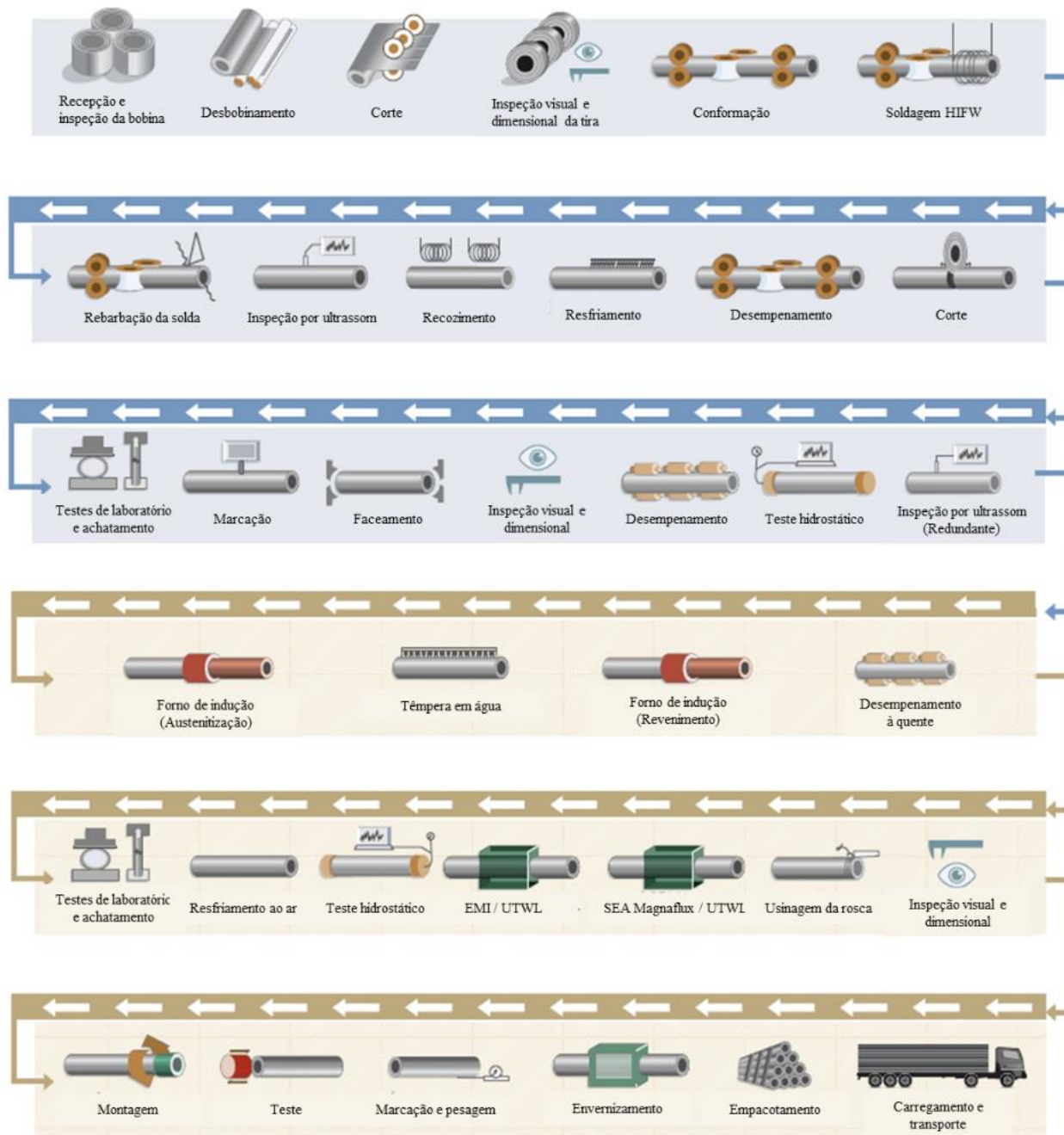
Com o emprego de gás de carvão para iluminação residencial e pública, na Inglaterra do século XIX, houve uma grande demanda de tubos para seu transporte, o que estimulou investidores a buscarem formas mais rápidas e baratas para sua produção. Dentre as diversas formas desenvolvidas para produção de tubos, destaca-se a produção a partir de uma chapa retangular, conformada em forma de U e em seguida soldagem das bordas sobrepostas longitudinalmente (HIPPERT JÚNIOR, 2004).

Com a descoberta do petróleo na Pensilvânia em 1858, uma nova demanda para tubos surgiu. A primeira tubulação bem sucedida de petróleo, com aproximadamente 4,0 [Km] de extensão e 2 [pol] de diâmetro, foi instalada em 1863. Esta tubulação movimentou 800 barris de petróleo por dia (KIEFNER; TRENCH, 2001).

Segundo (SANTOS; MACIEL, 2015), tubulação, termo bastante amplo, é um conjunto de dutos, válvulas, bombas, controladores de fluxo, etc. Um duto, por sua vez, é entendido

como um equipamento industrial formado pela montagem sucessiva de vários segmentos iguais, resultando em uma linha de condução efetiva de fluido (gás ou líquido).

Figura 12. Fluxo de produção e controle de qualidade.



Fonte: Adaptado de APOLO TUBULARS (2015)

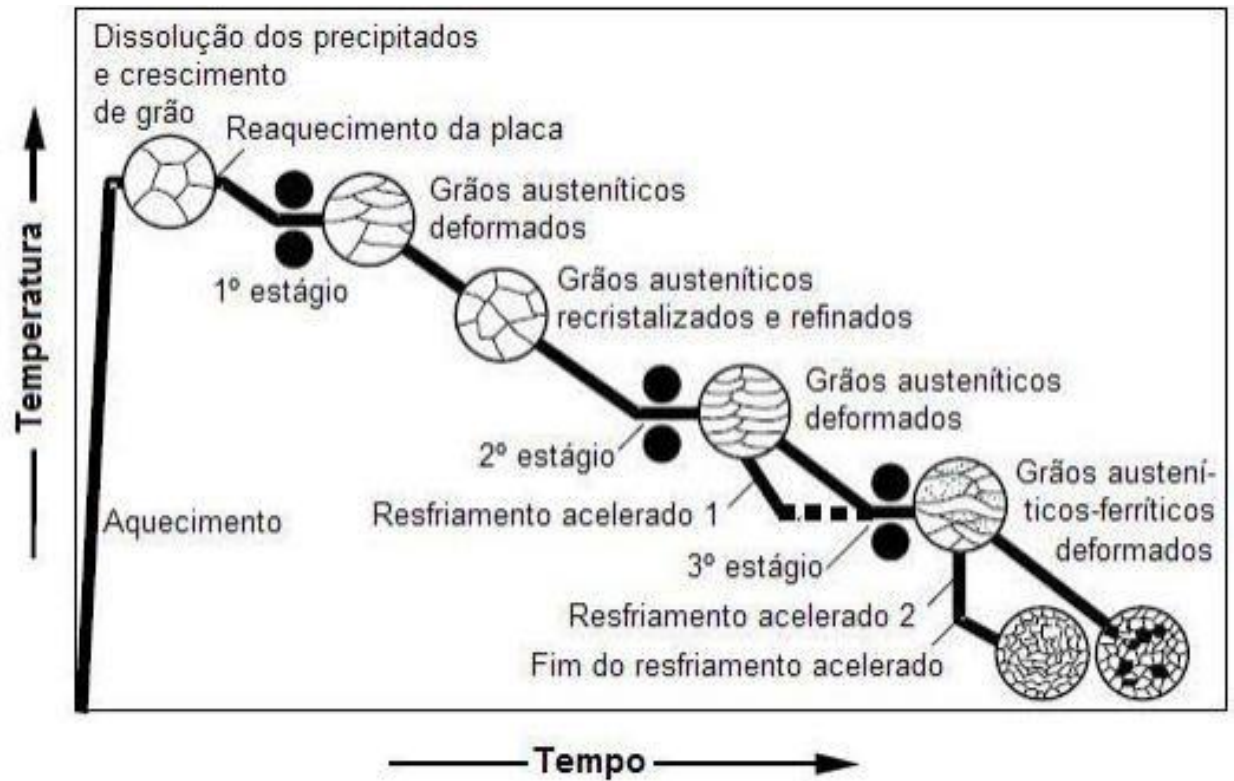
3.3.1 Laminação controlada

Desenvolvido na década de 1960 e sob constante evolução, o processo de laminação controlada tem como objetivo produzir aços com reduzida adição de elementos de liga e com bons resultados de resistência mecânica, ductilidade, tenacidade e soldabilidade. Este processo é caracterizado pelo condicionamento da austenita na região da não recristalização, resultando em um número maior de sítios de nucleação de grãos de ferrita durante o resfriamento contínuo do material após a laminação (LINO, 2017).

Na laminação controlada, o aumento da resistência mecânica do material é conseguido pelo refino da microestrutura, e não pelo endurecimento do material devido à adição de elementos de liga formadores de precipitados. Por causa disso, o resultado final é um material com teores reduzidos de elementos de liga (baixo carbono equivalente), resultando em um aço com boa soldabilidade e baixo custo (LOPES, 2010).

Essa intensa redução no tamanho de grão permite aumentar simultaneamente a resistência mecânica e a tenacidade da chapa, permitindo diminuir os teores de elementos de liga do aço, especialmente C (GORNÍ, 2008). O processamento termomecânico segue uma estratégia bem definida onde as reduções (graus de deformação plástica), temperaturas e etapas são controladas para produção do aço conforme requisitos. As etapas do processamento termomecânico estão representados na figura 13 (LINO, 2017).

Figura 13. Esquema da laminação controlada com e sem o resfriamento acelerado.



Fonte: Sant'anna (2006)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia a ser utilizada neste trabalho consiste na fabricação de corpos de prova retirados da parede de um tubo de aço API 5CT N80 tipo Q, tratamento térmico de tempera e revenimento, medição da dureza, mapeamento da temperatura de transição dúctil-frágil e análise metalográfica do material estudado. Desta forma pôde-se analisar e caracterizar as propriedades mecânicas e microestruturais do material resultado da rotina de tratamento proposta para ser utilizado em tubos de transporte de petróleo e gás.

4.1 MATERIAIS

O objeto de estudo deste trabalho é um tubo OCTG de aço API 5CT de grau N80Q, com limite de escoamento mínimo de 80 ksi ou 552 [MPa], o qual apresenta como principais características: alta resistência e baixa liga, excelente tenacidade e soldabilidade. O material foi fornecido pela empresa Apolo Tubulars, na forma de seções lineares de tubos, como apresenta a Figura 14, com diâmetro externo de 73,02 [mm] e espessura de parede de 5,51 [mm]. Os tubos foram obtidos a partir de chapas laminadas e fabricados conforme o ciclo apresentado na figura 12.

Figura 14. Seção de tubo API 5CT grau N80 tipo Q.



Fonte: Próprio autor

Conforme analisado por SORRIJA (2016), a composição química do aço API N80 tipo Q é apresentada na tabela 6, abaixo.

Tabela 6. 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)

As amostras foram retiradas dos segmentos de tubo, através do processo de eletroerosão a fio, na posição longitudinal conforme mostra a figura 15.

Figura 15. Corte dos cdps em eletroerosão a fio.

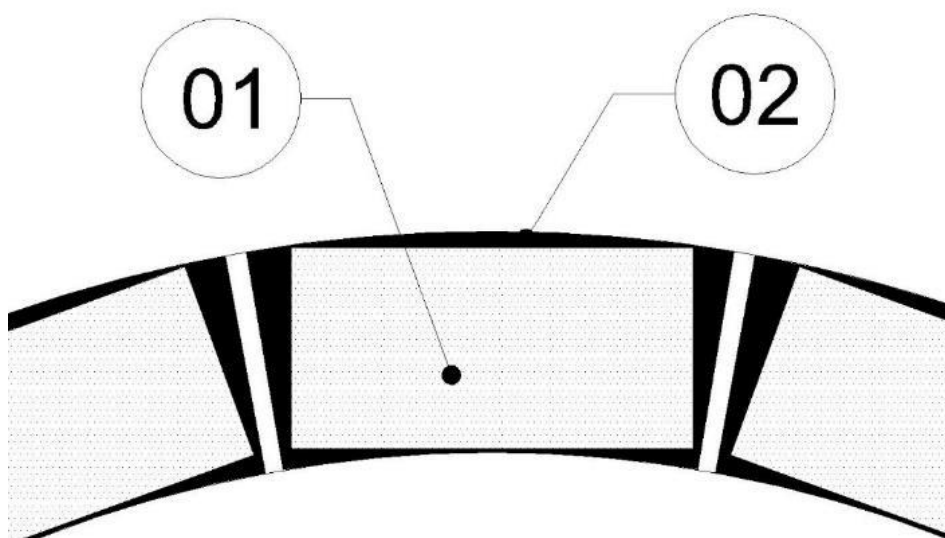


Fonte: Próprio autor

As amostras foram retiradas da parede do tubo com seção representada pelo item 02 da figura 16 abaixo. Chamaremos estas amostras (02) de corpos de prova abaulados, de seção curva conforme parede do tubo, e as amostras representadas pelo item 01 da figura abaixo de corpos de prova normatizado de seção retangular.

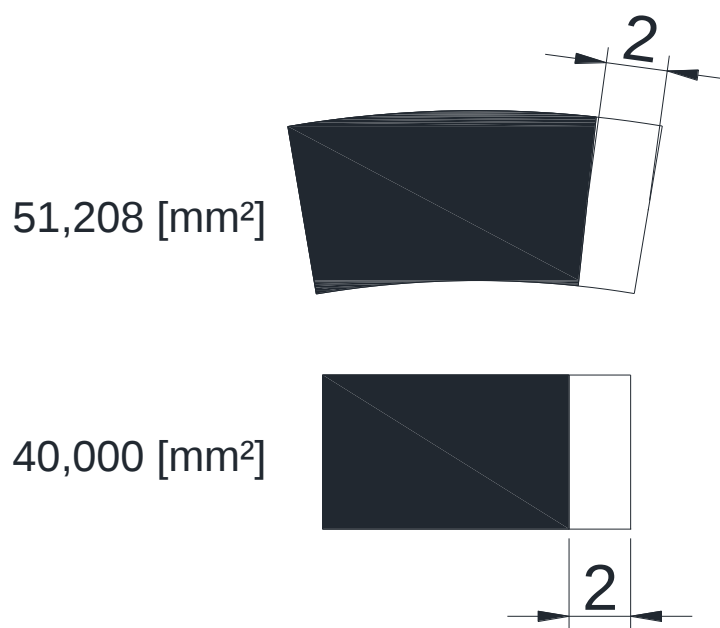
Foram produzidos 35 corpos de prova abaulados e 35 usinados para fins comparativos.

Figura 16. Secção transversal das amostras.



Fonte: Próprio autor.

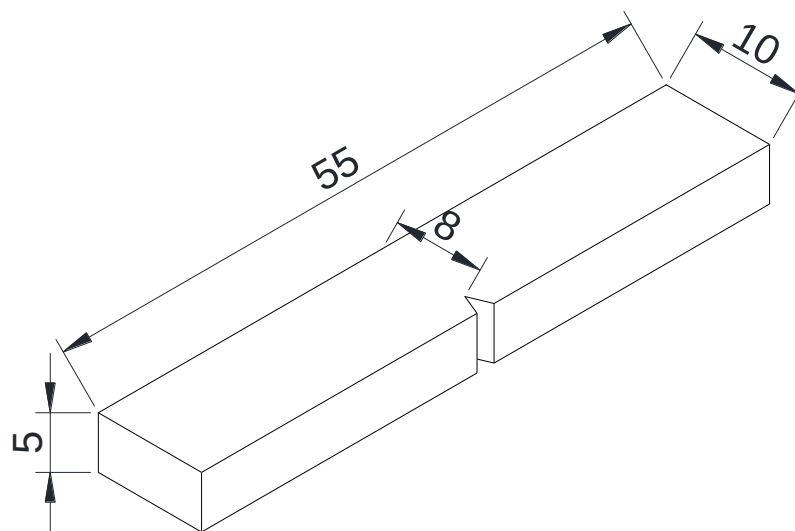
Figura 17. Área da seção resistente ao impacto dos corpos de prova abaulado e usinado.



Fonte: Próprio autor.

Os entalhes dos corpos de prova foram confeccionados em duas versões que se diferem apenas pelo raio de fundo do entalhe, sendo elas R0,2 [mm] e R0,25[mm], as demais especificações estão em atendimento às normas API 5CT e ASTM E23, como mostra a figura 17.

Figura 18. Dimensões dos corpos de prova.



Fonte: Próprio autor.

4.2 MÉTODOS

Foram ensaiados corpos de prova em quatro configurações distintas, sendo elas: corpo de prova normatizado com entalhe normatizado; corpo de prova normatizado com entalhe agudo; corpo de prova abaulado com entalhe normatizado e corpo de prova abaulado com entalhe agudo.

O intuito destas variações de corpo de prova é propor uma relação entre o corpo de prova abaulado, retirado diretamente da parede do tubo sem qualquer operação posterior, e o corpo de prova normatizado atendendo todas as especificações das normas. Esta relação visa reduzir custos e tempo de preparação do corpo de prova. A proposta das variações de raio de fundo do entalhe é avaliar o corpo de prova em uma situação mais severa, onde o entalhe se aproxima mais de uma situação de trinca, onde o raio de fundo tende à zero.

Os corpos de prova passaram por tratamento térmico de têmpera e revenimento a 600 [°C], avaliação de dureza do aço conforme fornecido, temperado e revenido, ensaio de impacto Charpy V e análise metalográfica do produto final.

4.2.1 Tratamento térmico

Os corpos de prova foram amarrados em pequenos fardos contendo entre 4 e 6 amostras cada, para se atingir uma taxa de resfriamento mais uniforme e um menor gradiente de temperatura.

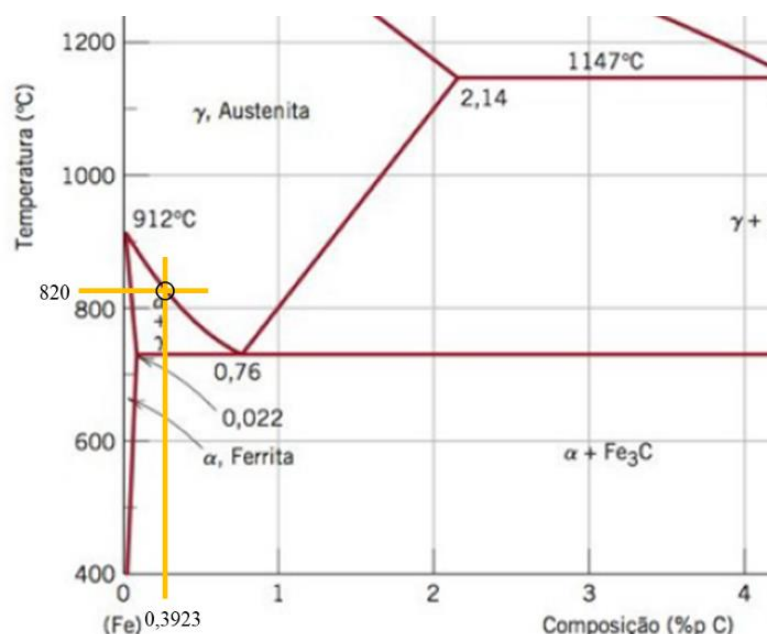
Através da equação 1 e dos dados da tabela 6, obteve-se o seguinte resultado de carbono equivalente para este aço.

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

$$= 0,3923 \text{ [\%p] C}$$

Com este dado, e com auxílio do diagrama Fe-C, estimou-se a temperatura de austenitização do aço em 820 [°C], e portanto, a temperatura de aquecimento para a têmpera em 870 [°C], como mostra a figura 18.

Figura 19. Diagrama Fe-C.



Fonte: Adaptado de Callister; Rethwisch (2012).

Os corpos de prova foram então inseridos em um forno pré-aquecido a 720 [°C] e aquecidos até 870 [°C], com taxa de aquecimento de 20 [°C/min.] e mantidos nesta temperatura

por 60 [min.]. Após o tempo na temperatura de austenitização, os corpos de prova foram temperados em água. O aquecimento foi feito em um forno EDG modelo 3P-S, conforme mostrado na figura 19.

Figura 20. Austenitização dos corpos de prova.



Fonte: Próprio autor.

Após a têmpera, verificou-se o sucesso do procedimento através de ensaio de dureza Rockwell. Os corpos de prova foram então reaquecidos novamente até a temperatura de revenimento, definida em 600 [°C], mantidos nesta temperatura por 60 [min.] e então resfriados

ao ar. A curva de tempo x temperatura do tratamento térmico aplicado neste ensaio é apresentada na figura 7.

4.2.2 Esaio de dureza

Após a realização da têmpera e do revenimento, dois corpos de prova aleatórios foram selecionados para ser feito um mapeamento de dureza, sendo um temperado e um revenido. Foram usados corpos de prova usinados, para atendimento à norma ASTM E18. A medição foi feita em um durômetro da marca WOLPERT modelo DIA-TESTOR, como mostrado na figura 20.

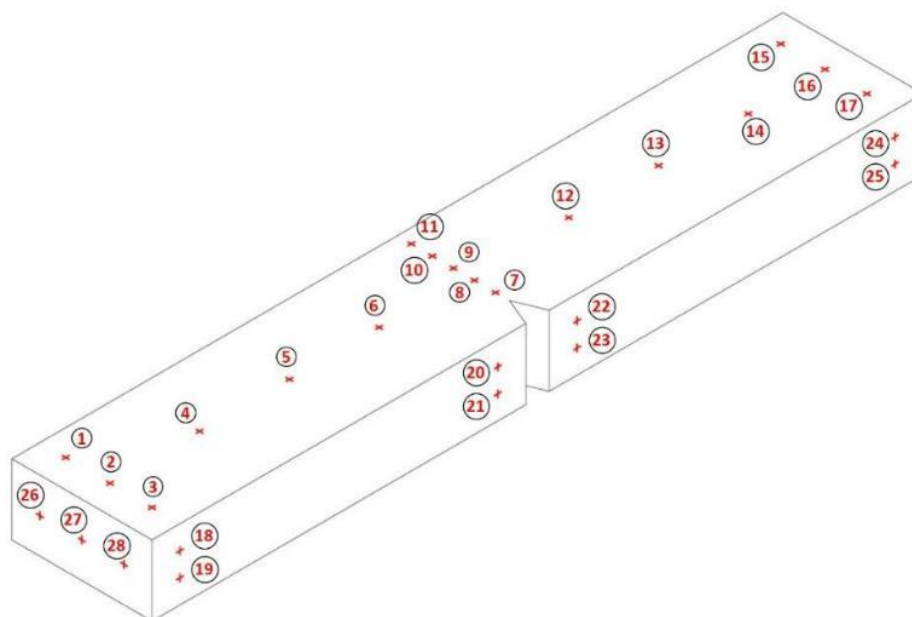
Figura 21. Durômetro WOLPERT.



Fonte: Autor Desconhecido.

A figura 21 localiza os pontos de medição de dureza, sendo que os pontos apresentados são referentes ao lado A do cdp e se repetem para o lado não visível.

Figura 22. Pontos de medição de dureza.



Fonte: Próprio autor.

4.2.3 Ensaio de impacto Charpy V

Os ensaios de impacto Charpy V foram realizados em corpos-de-prova confeccionados conforme recomendações da norma ASTM E 370 e API 5CT.

Os ensaios foram realizados em uma máquina alemã, de marca MOHR & FEDERHAFF AG, modelo 61 tipo PSW 30/15, conforme ilustrado pela figura 22.

Figura 23. Equipamento de ensaio de impacto Charpy.



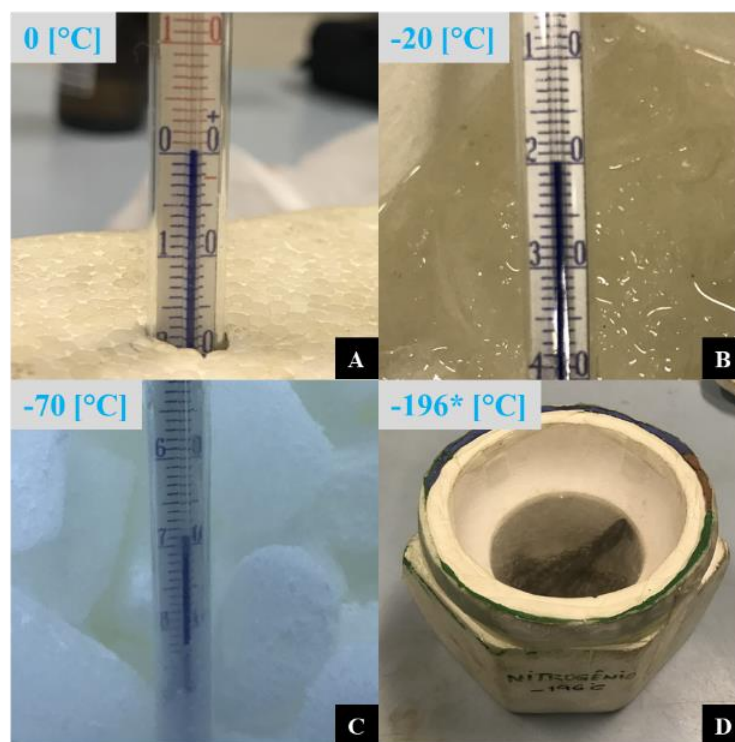
Fonte: Próprio autor.

Os ensaios de impacto Charpy V foram realizados em três temperaturas, +25 [°C] (temperatura ambiente), 0 [°C], -20 [°C] e -70 [°C], sendo analisados ao menos três corpos de prova em cada temperatura. Ainda, por disponibilidade de nitrogênio líquido no dia do ensaio, os corpos de prova usinado de entalhe agudo e abaulado de entalhe normatizado foram ensaiados a -196 [°C], para fins de curiosidade.

Os materiais utilizados para atingimento das temperaturas foram: Gelo para 0 [°C]; Gelo + Sal (NaCl) + Álcool Etílico Absoluto para -20 [°C]; gelo seco para -70 [°C] e nitrogênio líquido para -196 [°C]. Conforme ilustra a figura 23.

Os corpos de prova foram inseridos nos meios e mantidos por pelo menos 15 [min.] para homogeneização da temperatura. No momento do ensaio as caixas térmicas foram posicionadas ao lado da máquina de ensaio para que o processo de posicionamento do cdp e liberação da trava do pêndulo nao demorasse mais do que 5 [seg.].

Figura 24. Meios de resfriamento dos corpos de prova: a) Gelo; b) Gelo + Sal (NaCl) + Alcool; c) Gelo seco; d) Nitrogênio Líquido.



Fonte: Próprio autor.

4.2.4 Análise metalográfica

O ensaio metalográfico, que consiste na análise microscópica do material, tem por finalidade caracterizar a microestruturas do metal. Para que a análise microscópica seja possível, é necessário o polimento da superfície seguido de ataque químico para contraste das microestruturas.

A preparação das amostras para a análise foi feita em conformidade com as orientações da norma ASTM E3.

A amostra embutida foi primeiramente lixada com lixas de granulometria 100 até 2000 gradativamente. Posteriormente ao lixamento as amostras foram polidas em solução líquida de alumina e em pasta diamantada de 6 μ .

Em seguida, foi feito o ataque químico da superfície polida com Nital 2%, para revelar a microestrutura do material, destacando os contornos de grãos contrastando a fase ferrítica (área

clara) do constituinte perlítico (área escura). O ataque químico foi interrompido após 10 a 12 s com lavagem em água abundante, seguida de lavagem com álcool e secagem.

A metalografia foi feita em um microscópio modelo EPIHOT 200 da marca NIKON equipado com uma câmera AxioCam ERc 5s acoplada ao microscópio. Com o auxílio do *software* AxioVision foram extraídas imagens da microestrutura do material com ampliação de 100X, e, através do *software* ImageJ, as imagens foram tratadas para melhorar a nitidez e contraste.

O microscópio utilizado está ilustrado na figura 24, abaixo. As análises de microscopia ótica foram feitas no Laboratório de Análise de Imagens de Materiais do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT), da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá-UNESP.

Figura 25. Microscópio EPIHOT 200 e câmera AxioCam ERc 5s.



Fonte: Santos; Maciel (2015).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ENSAIO DE DUREZA

Para a medição da dureza, os corpos de prova escolhidos aleatoriamente foram lixados para remoção de camada de óxido, conforme especifica a norma. A Tabela 7 apresenta os valores obtidos para os corpos de prova temperado e revenido a 600 [°C].

Tabela 7. Dados do ensaio de dureza.

Ponto	Dureza [HRC] (Temperado)		Dureza [HRA] (Revenido)	
	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B
1	38	39	60	58
2	32	35	58	58
3	39	37	60	56
4	32	41	59	56
5	33	28	54	57
6	29	30	54	58
7	30	30	58	56
8	27	31	61	56
9	31	30	56	61
10	28	30	57	56
11	31	35	50	56
12	29	39	55	58
13	33	25	58	56
14	31	36	59	56
15	35	36	58	58
16	35	36	56	58
17	44	36	54	50
18	29	28	61	56
19	22	33	59	57
20	33	34	60	57
21	38	27	60	59
22	39	42	60	55
23	42	20	60	55
24	32	26	61	64
25	30	28	60	53
26	35	38	57	62
27	33	32	57	58
28	39	38	60	55

Fonte: Próprio autor.

A tabela 8 apresenta uma análise estatística dos resultados, onde pôde-se observar um menor coeficiente de variação da dureza no corpo de prova revenido, o que indica uma boa homogeneização do material após o revenimento.

Tabela 8. Análise estatística da dureza.

Medida	Temperado [HRC]	Revenido [HRA]
Média	33,00	58,00
Desvio Padrão	4,99	2,65
Coef. Variação	15,1%	4,6%

Fonte: Próprio autor.

Ainda se observou uma redução significativa do valor da dureza, que saiu de 33 [HRC] para 58 [HRA], conforme era esperado, devido a alta temperatura de revenimento empregada (600 [°C]), visto que as variações de dureza são função do tempo e da temperatura de revenimento (MARTINS, 2002).

5.2 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY V

Para que todas as variações de corpo de prova fossem analisadas devidamente e se tivesse o total controle dos resultados, o teste foi realizado em duas etapas, onde na primeira foram testados os corpos de prova abaulado de entalhe normatizado e usinado de entalhe agudo, e na segunda etapa foram realizados os testes nos cdps abaulado de entalhe agudo e usinado de entalhe normatizado.

Na primeira etapa, foram analisados 5 temperaturas com 3 amostras em cada, pois para esta etapa estava disponível no Departamento de Materias o nitrogênio líquido, que foi utilizado para análise do material em uma temperatura adicional ultra baixa.

Na segunda etapa, com a indisponibilidade de nitrogênio líquido, foram ensaiados 4 temperaturas distintas e 5 amostras em cada temperatura.

Devido ao fato de o ensaio ter sido realizado em corpo de prova *sub-sized*, de acordo com a norma API e conforme apresentado na tabela 5, faz-se necessário a correção dos resultados obtidos no ensaio por um fator de correção, de 0,55 para cdp ½ size (AMERICAN

PETROLEUM INSTITUTE, 2010). Os dados já corrigidos dos quatro ensaios estão apresentados nas tabelas 9 e 10 abaixo.

Tabela 9. Resultados do ensaio de impacto Charpy V em cdp usinado.

Raio do Entalhe	T [°C]	E (méd.) [J]	σE	Cv (E)
0,10	25,3	143,24	4,6798	3,27%
	0,0	150,96	1,6810	1,11%
	-20,0	155,72	7,3275	4,71%
	-72	103,42	27,7754	26,86%
	-196	7,13	0,0000	0,00%
0,25	25,3	152,63	3,4940	2,29%
	0,0	154,05	6,9148	4,49%
	-20,0	155,12	1,5948	1,03%
	-72	108,76	14,1747	13,03%

Fonte: Próprio autor.

Tabela 10. Resultados do ensaio de impacto Charpy V em cdp abaulado.

Raio do Entalhe	T [°C]	E (méd.) [J]	σE	Cv (E)
0,10	25,3	194,71	3,6367	1,87%
	0,0	184,72	11,5882	6,27%
	-20,0	171,53	14,2820	8,33%
	-72	109,83	11,1407	10,14%
0,25	25,3	171,17	7,7035	4,50%
	0,0	174,74	5,8233	3,33%
	-20,0	170,58	2,2238	1,30%
	-72,0	118,87	7,3275	6,16%
	-196	6,24	2,6745	42,86%

Fonte: Próprio autor.

Na tabela 9, raio do entalhe 0,25 [mm] e temperatura 0 [°C], encontra-se o valor da energia absorvida, em Joules, para o cdp ensaiado conforme especificação da norma API 5CT (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010), e, comparando este valor com a energia mínima necessária para o grau N80 tipo Q, apresentou excelente resposta, visto que absorveu uma energia aproximadamente 6 vezes maior do que a exigida pela norma, de 27 [J].

A tabela 11 apresenta um comparativo da variação entre a energia absorvida dos corpos de prova e suas variações, de forma a avaliar os efeitos da geometria do cdp e avaliar a

representatividade de um cdp longitudinal retirado diretamente da parede de um tubo, sem qualquer processo de usinagem posterior, comparado com o especificado pela norma ASTM E23.

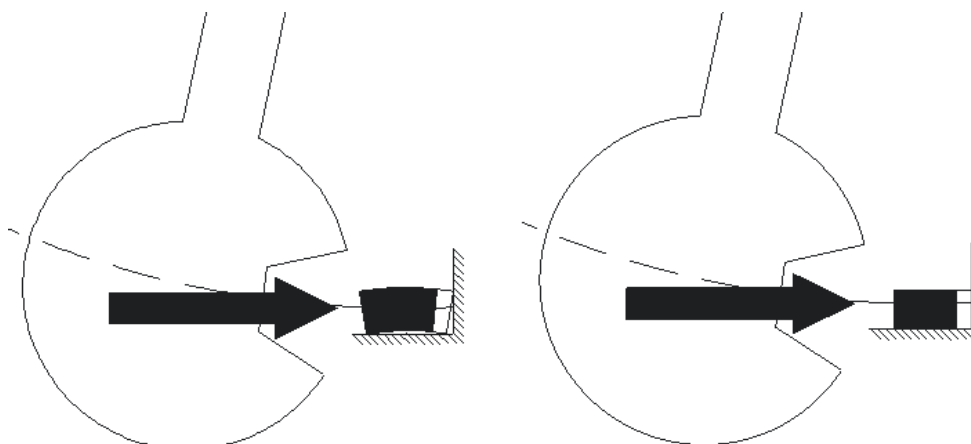
Tabela 11. Avaliação da influência da geometria do cdp na energia absorvida.

Rentalhe	T [°C]	Eméd [J]		Var. [%]
		USINADO	ABAUADO	
0,10	25,3	143,24	194,71	35,9%
	0,0	150,96	184,72	22,4%
	-20,0	155,72	171,53	10,2%
	-72	103,42	109,83	6,2%
0,25	25,3	152,63	171,17	12,1%
	0,0	154,05	174,74	13,4%
	-20,0	155,12	170,58	10,0%
	-72	108,76	118,87	9,3%
Média				14,9%
Desvio Padrão				9,1%
Coef. Variação				60,9%

Fonte: Próprio autor.

O principal fator influenciador da diferença da energia absorvida entre os corpos de prova abaulado e usinado é a área resistente ao impacto A_r , que conforme apresentado nas figuras 16 e 17, o corpo de prova abaulado apresenta uma A_r 28,02 [%] maior do que o cdp usinado.

Figura 26. Demonstração do impacto no pêndulo nos cdps usinado e abaulado.



Fonte: Próprio autor.

Em média, conforme apresentado pela tabela 11, a variação entre a energia absorvida no cdp usinado e abaulado, desconsiderando a variável do raio do entalhe, foi de 18,2 [%]. O fato de a variação não ter sido exatamente igual à variação da Ar entre os cdps sugere que outros fatores, não analisados neste trabalho, podem ser relevantes e essenciais para a determinação de uma correlação empírica válida, que permita a utilização do cdp abaulado diretamente como objeto de validação de testes. Fatores como forma, ângulo de impacto, orientação do entalhe e até mesmo fatores de correção podem ser avaliados num futuro para um modelamento matemático desta correlação.

Para a análise da influência do raio do entalhe, a tabela 12 correlaciona os resultados obtidos com relação a variação do raio de fundo, fixando a variável forma do cdp. Desta forma é possível analisar se os resultados são influenciados pelo raio de fundo do entalhe, e se, de alguma forma, o entalhe mais agudo (de menor raio de fundo) pode representar uma situação mais crítica como uma trinca.

Tabela 12. Avaliação da influência do raio de fundo do entalhe na energia absorvida.

CDP	T [°C]	Eméd [J]		Var. [%]
		R0,1	R0,25	
USINADO	25,3	77,50	83,97	8,4%
	0,0	82,40	84,76	2,9%
	-20,0	86,33	85,35	-1,1%
	-72	47,09	59,84	27,1%
ABAULADO	25,3	107,13	96,14	-10,3%
	0,0	101,63	96,14	-5,4%
	-20,0	94,37	94,18	-0,2%
	-72	60,43	64,75	7,1%
Média				9,3%
Desvio Padrão				10,8%
Coef. Variação				116,4%

Fonte: Próprio autor.

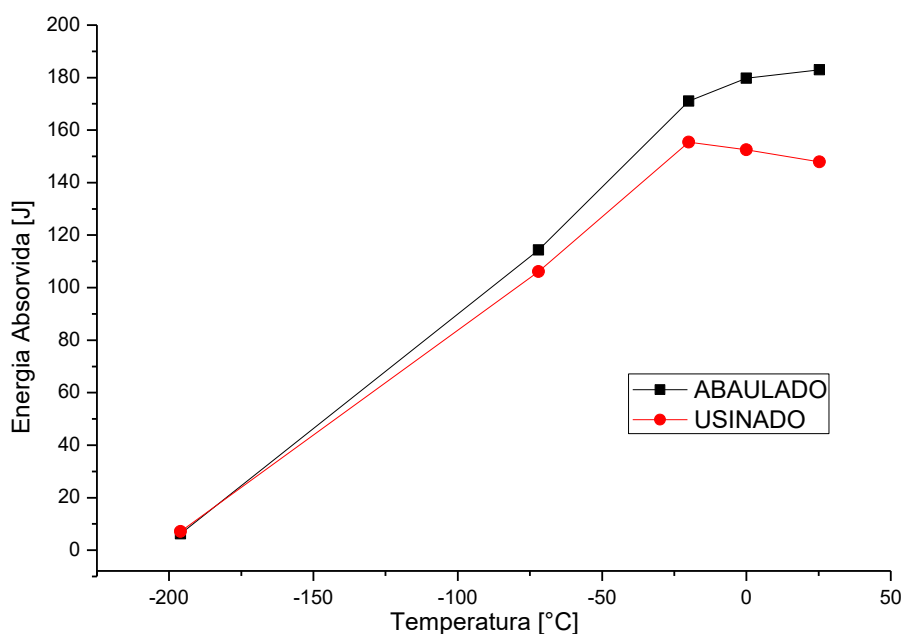
Os valores de energia absorvida no ensaio de impacto não apresentaram relação com a variável raio de fundo do entalhe, conforme apresentado na tabela 12, as variações observadas entre as duas configurações apresentaram um desvio padrão muito elevado, tanto para os corpos de prova com geometria abaulada quanto usinada.

Esta falta de correlação pode estar ligada à pequena variação do valor do raio, de apenas 0,15 [mm]. Outros fatores, como o ângulo do entalhe, podem ser analisados futuramente para

a validação de um entalhe mais agressivo e que permita a avaliação do material em uma condição mais crítica, como uma trinca.

Com os resultados apresentados nas tabelas 9 e 10, e com o auxílio do *software* Origin 8, plotou-se o gráfico 1, a seguir, que apresenta as curvas de energia média absorvida nos corpos de prova usinado e abaulado.

Gráfico 1 – Energia média absorvida

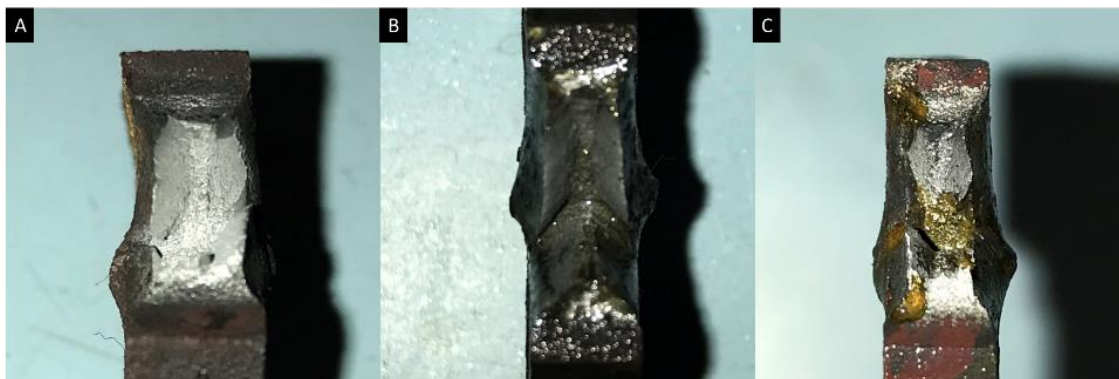


Fonte: Próprio autor.

Através da análise da tabela 11 e do gráfico 1, percebeu-se ainda uma grande influência da temperatura do ensaio na relação entre o ensaio feito no cdp usinado e abaulado, visto que a diferença da energia absorvida entre as diferentes geometrias (ΔE) é diretamente influenciada pela variação da temperatura, para menores temperaturas, percebeu-se menores valores de ΔE (ASM INTERNATIONAL, 1990).

A figura 27, abaixo apresenta as superfícies de fratura dos cdps ensaiados em algumas temperaturas.

Figura 27. Superfícies de fratura. A) 0 [°C]; B) -20 [°C]; C) -72 [°C].



Fonte: Próprio autor.

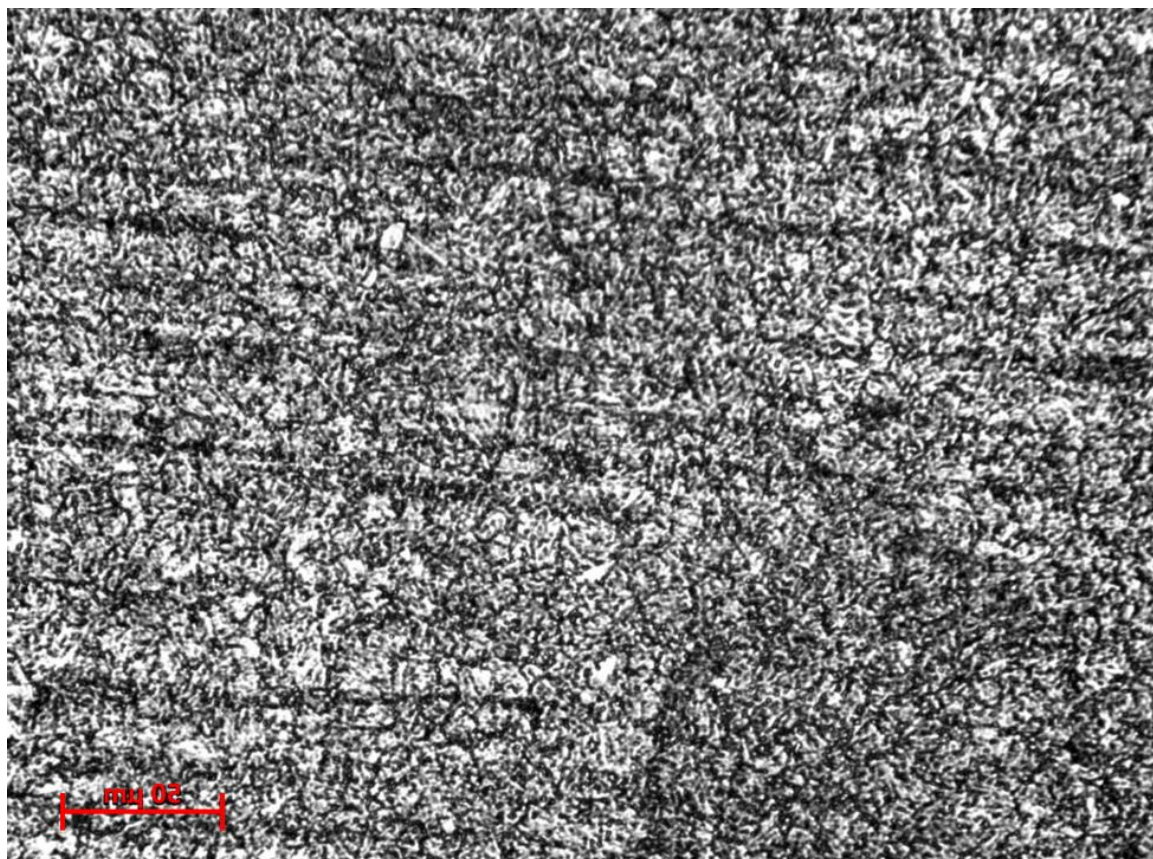
Como pode ser observado na figura 28, a fratura à -72 [°C] apresentou uma redução na deformação plástica na raiz e ainda redução na formação das abas, o que é característico de uma fratura frágil conforme ASTM E 23. Apesar de os cdps ensaiados nesta temperatura não terem se rompido completamente, alguns deles foram rompidos apenas com uma “dobra” do cdp, o que pela norma ASTM E23 caracteriza uma fratura frágil. Mesmo que, conforme abordado por CALLISTER (2012), não haja um critério específico para a determinação da temperatura de transição, e que ainda exista uma faixa de transição, foi observada uma queda acentuada na energia absorvida entre -20 e -72 [°C].

5.3 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Através do polimento da superfície e do ataque químico com NITAL 2% foi possível observar a microestrutura do material no microscópio EPIHOT 200. As fotografias tiradas com auxílio do *software* AxioVision através da câmera AxioCam ERc 5s foram tratadas no *software* ImageJ para melhor visualização da imagem e melhor nitidez.

A figura 29 apresenta a microestrutura com ampliação de 50X onde se percebeu um tamanho de grão muito fino.

Figura 28. Microestrutura do Aço API 5CT grau N80 tipo Q temperado e revenido à 600 [°C] com ampliação de 50X.



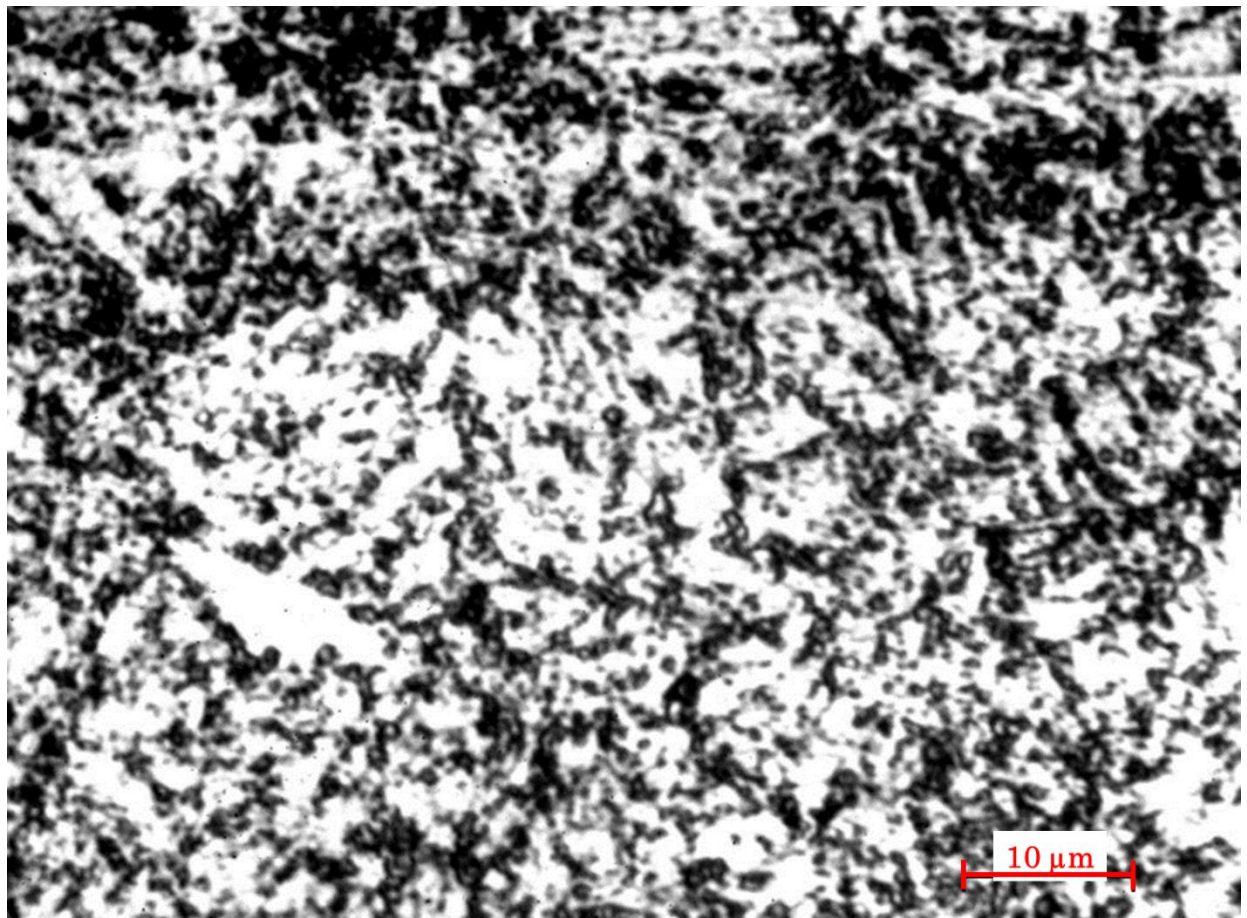
Fonte: Próprio autor.

A figura 30 apresenta a microestrutura com ampliação de 100X, nesta fotografia foi observada a microestrutura do tipo sorbida, característica de têmpera seguida de revenimento (CHIAVERINI, 1986), e com o auxílio do *software* ImageJ, observou-se uma estrutura com 40 [%] de cementita (partes escuras) e com tamanho de grão ultra-fino, inferiores à 5 [μm] (GORNI, 2008).

A análise metalográfica revelou ainda a presença de impurezas, visíveis na figura 29, neste metal, segundo SHIOTA (2015), estas impurezas são do tipo óxidos globulares de série grossa e nível 4.

A granulometria fina e a presença de soluções sólidas no cristalino corroboram para o aumento de resistência do material, visto que dois mecanismos de endurecimento foram identificados, granulometria fina e presença de sólidos intersticiais (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

Figura 29. Microestrutura do Aço API 5CT grau N80 tipo Q temperado e revenido à 600 [°C] com ampliação de 100X.



Fonte: Próprio autor.

6 CONCLUSÕES

Conclui-se, com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, que o objetivo de avaliar a resistência ao impacto em tubos API 5CT grau N80 tipo Q foi cumprido, sendo a seguir evidenciados os principais resultados obtidos:

- A rotina de tratamento térmico proposta, de têmpera em água e revenimento à 600 [°C], atendeu as exigências da norma API 5CT quanto à tenacidade ao impacto analisada à 0 [°C]. Tal fato é constatado com base nos resultados do ensaio apresentados na tabela 9 e nos requisitos da norma apresentados na tabela 3.
- O revenimento à 600 [°C] reduziu significativamente o valor dureza e contribuiu para a homogeneização da estrutura.
- O material apresentou boa resposta para trabalho em temperaturas baixas, se mantendo resistente ainda à -72 [°C].
- A análise microestrutural revelou a microestrutura sorbita, constituída de ferrita e cementita globulizada, típico de aço temperado e revenido.
- O ensaio em cdp alternativo (abaulado) apresentou evidências que sustentam a possibilidade de se usar este cdp como uma forma mais econômica e rápida para se avaliar os materiais nas empresas fabricantes.

REFERÊNCIAS

Agência Petrobras. **Exposição Petrobras em 60 momentos**. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://exposicao60anos.agenciapetrobras.com.br/decada-1980-momento-22.php>. Acesso em: 12 setembro 2018.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 5CT**: - Specification for casing and tubing. Washington DC, 2010.

APOLO TUBULARS. **Catálogo de produtos Apolo Tubulars**. Lorena, 2015. Disponível em: <https://apolotubulars.com.br/catalogo-2/>. Acesso em: 15 novembro 2018.

ASM INTERNATIONAL. **ASM handbook**: properties and selection: irons, steels, and high performance alloys. 10. ed. Materials Park, Ohio, p. 1618 p. v. 1.

BHADESHIA, H.; HONEYCOMBE, R. **Steels**: microstructure and properties. Stoneham: Butterworth-Heinemann, 2017.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais**: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CALOI, Giselle. **Análise da soldabilidade do aço API 5L X-80 por meio dos testes tekken e de implante**. 2008. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-RIO, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=12414@1. Acesso em: 17 novembro 2018

CARVALHO, Gustavo Henrique Senna de Freitas Ligeiro de. **Resistência ao colapso e caracterização metalúrgica de tubo API 5CT N80Q soldado por indução de alta frequência**. 2015. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/pesquisa/producao-academica/-7/2015-2/278--258/file>. Acesso em: 17 nov. 2018.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica**: materiais de construção mecânica. Vol. III. 2ª Ed. São Paulo: Editora Makron Books, 1986.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. São Paulo: Edgar Blucher, 1994.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2018**: ano base 2017. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf. Acesso em: 15 outubro 2018.

FGV PROJETOS. **O Mercado do petróleo**: oferta, refino e preço. 2012. Disponível em: <http://fgvprojetos.fgv.br/publicacao/o-mercado-do-petroleo-oferta-refino-e-preco>. Acesso em: 5 maio 2018.

GORNI, Antonio Augusto. Aços avançados de alta resistência: microestrutura e propriedades mecânicas. **Corte e Conformação de Metais**, São Paulo, n. 44, p. 26–57, 2008.

DE GOUVEIA, João Carlos Carvalho. **Análise crítica de engenharia para dutos rígidos submetidos a grandes deformações**. 2010. Tese (Mestre em Engenharia Civil) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2010. Disponível em: <http://www.poscivil.uff.br/sites/default/files/dissertacao_tese/microsoft_word_-_joaogouveia_word2003formatada.pdf>. Acesso em: 18 novembro 2018.

GOUVEIA, Flávia. Tecnologia nacional para extrair petróleo e gás do pré-sal. **Conhecimento e Inovação**, v. 6, p. 30–35, 2010. b. Disponível em: <<http://inovacao.scielo.br/pdf/cinov/v6n1/10.pdf>>. Acesso em: 18 novembro 2018.

HIPPERT JUNIOR, Eduardo. **Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicação de curvas de resistência J- Δa para previsão de colapso em dutos**. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Naval) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. doi:10.11606/T.3.2004.tde-08092004-114717. Acesso em: 18 novembro 2018.

HUISMAN. **Reel-lay**. Schiedam, 2019. Disponível em: <https://www.huismanequipment.com/en/products/pipelay/reel_lay>. Acesso em: 10 outubro 2018.

KIEFNER, John F.; TRENCH, Cheryl J. Oil pipeline characteristics and risk factors: illustrations from the decade of construction. **American Petroleum Institute**, Worthington, 2001.

LIMA, P. C. R. **Os desafios, os impactos e a gestão da exploração do pré-sal**. Brasília/DF: Câmara dos Deputados, 2008. Disponível em: <http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/waisberg1/docs/desafios_presal_lima.pdf>. Acesso em: 15 novembro 2018.

LINO, João Júnio Pereira. **Laminação controlada de um aço microligado ao nióbio visando à obtenção do grau API X60 em laminador Steckel**. 2017. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/8712/1/DISSERTACAO_Lamina%C3%A7%C3%A3oControladaA%C3%A7o.pdf>. Acesso em: 17 novembro 2018

MARTINS, Marcelo. **Temperabilidade jominy e influência do revenido sobre a dureza: um estudo em aços estruturais nacionais**. 2002. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/82731/184887.pdf?sequence=1>>. Acesso em 18 novembro 2018.

MELO, Luis Carlos Rodrigues. **Desenvolvimento de tubo ARBL contendo 1Cr 0,2Mo fabricado pelo processo ERW/HF destinado à indústria de petróleo e gás**. 2013. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94462/000732516.pdf.txt;jsessionid=27>>

B4E49E70ECB0E44D79798C663E98FE?sequence=2>. Acesso em: 20 novembro 2018.

MORAIS, José Mauro de. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore**. 2013. Disponível em: <<http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/1147>>. Acesso em: 30 Outubro 2018.

NETTO, T. Antoun; BOTTO, A.; LOURENÇO, M. I. Fatigue performance of pre-strained pipes with girth weld defects: local deformation mechanisms under bending. **International Journal of Fatigue**, v. 30, n. 6, p. 1080–1091, 2008.

PETROBRAS. **Pré-Sal**. 2018. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>>. Acesso em: 10 setembro 2018.

PETROBRAS. **Plano de negócios e gestão**. 2018. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/estrategia/plano-de-negocios-e-gestao/>>. Acesso em: 3 maio. 2018.

ROSADO, Diego Belato et al. Latest developments in mechanical properties and metallurgical features of high strength line pipe steels. **International Journal Sustainable Construction & Design**, v. 4, n. 1, 2013. doi: 10.13140/2.1.4498.5287. Acesso em: 17 outubro 2018.

SANT'ANNA, P. C. **Influência de tratamentos térmicos intercríticos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço API 5L X65**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/263175/1/Sant%27Anna_PedroCarneiro_D.pdf>. Acesso em: 05 outubro 2018.

SANTOS, Daniel Peres da Silva; MACIEL, Marcela Gagheggi. **Características do aço api x70 utilizado em tubos de transporte de petróleo e gás**. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia dos Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/139063/000865239.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 26 nov. 2018.

SHIOTA, Alex Eiti. **Análise microestrutural de tubos API N80 soldados pelo processo HF/ERW para prospecção de petróleo e gás**. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/123072>>. Acesso em: 22 setembro 2018.

SORRIJA, Bruno Antonio. **Análise da resistência à fadiga de tubos de aço api 5ct n80 tipo q soldados via processo de indução magnética de alta frequência (HFIW)**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/138843>>. Acesso em: 20 setembro 2018.

TECNOPETRO BR. **Sistemas da sonda de perfuração**. 2008. Disponível em: <<http://tecnopetrobr.blogspot.com/2008/11/sistemas-da-sonda-de-perfurao.html>>. Acesso em: 12 out. 2018.

VILAS BÔAS, Ana Carolina Caldas. **Comportamento mecânico e de corrosão do aço X70 sob carregamento cíclico simulando o bobinamento dos tubos**. 2012. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em: <<https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1273M.PDF>>. Acesso em: 03 outubro 2018.