

**RODRIGO ANDRADE GODOI**

**Determinação da tenacidade Charpy-V do tubo de aço**  
**API 5CT N80Q à baixa temperatura**

**Rodrigo Andrade Godoi**

**Determinação da tenacidade Charpy-V do tubo de aço  
API 5CT N80Q à baixa temperatura**

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

Godoi, Rodrigo Andrade  
G588d      Determinação da tenacidade Charpy-V do tubo de aço API 5CT N80Q  
à baixa temperatura / Rodrigo Andrade Godoi – Guaratinguetá, 2021.  
60 f : il.  
Bibliografia: f. 58 -60

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade  
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021.  
Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

1. Aço carbono. 2. Metais - Tratamento térmico. 3. Soldagem  
elétrica. I. Título.

CDU 669.14

**RODRIGO ANDRADE GODOI**


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

  
Dr. FRANCISCO MACIEL MONTICELI  
UNESP-FEG

  
Eng. MARTIN FERREIRA FERNANDES  
UNESP-FEG

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente à minha família, por todo o apoio e incentivo em todas os momentos que eu precisei, sem o qual não chegaria até aqui. Principalmente aos meus pais, Alice e Mário, que sempre me guiaram pelo caminho certo, incondicionalmente. Aos meus irmãos Júnior e Daniela que sempre me serviram como inspiração.

Ao Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento pelo auxílio e dedicação na orientação desta obra, sempre atencioso ao esclarecer dúvidas ou ajudar em eventuais dificuldades.

Aos meus amigos de faculdade por me acompanhar nessa jornada muito importante para mim.

A instituição UNESP e todos os colaboradores que possibilitaram tudo isso, em especial ao técnico Odir Vieira pela confecção dos corpos de prova e o técnico Célio José de Souza pela ajuda no laboratório.

À empresa Apolo Tubulares S.A. pelo fornecimento dos tubos do qual foram feitos os corpos de provas usado nos ensaios.

“Success is going from failure to failure without losing enthusiasm.”

Winston Leonard Spencer Churchill

## RESUMO

Com o desenvolvimento da sociedade a necessidade de energia aumenta, conseqüentemente aumenta a demanda de combustíveis fósseis e gás natural. Com isso, a busca de nova tecnologia para exploração de reservas de petróleo de difícil acesso torna-se necessário, como as reservas em águas ultra-profundas. As principais empresas do setor de extração têm investido nesse seguimento de tecnologia. Por este motivo, o estudo dos aços microligados tem uma posição de destaque no desenvolvimento de tecnologia em tal direção. Este estudo tem como objetivo a análise do comportamento do aço API 5CT grau N80 tipo Q revenido à 400°C, através do impacto Charpy-V, nos seguintes aspectos: primeiro, analisar o comportamento da tenacidade revenido à 400°C em diferentes temperaturas; segundo, consiste na verificação da viabilidade de usar cdp abaulado, retirado diretamente da parede do tubo como alternativa ao cdp de geometria normatizado, com o intuito de diminuir o custo e o tempo na preparação, pois, uma vez que se mostre viável, eliminará todo o processo de usinagem mantendo-se a geometria natural do tubo; por último, a análise do efeito de entalhe com raio menor ao convencional, com o objetivo de simular uma condição mais crítica de trabalho. A conclusão encontrada ao analisar os dados obtidos nos ensaios confirma o objetivo do tratamento térmico com revenimento à 400°C, onde a energia obtida no ensaio Charpy à zero grau Celsius foi de 71J, valor superior ao exigido pela norma API 5CT, de 27J na mesma temperatura. A área resistente ao impacto do corpo de prova (cdp) de geometria abaulado mostrou ser o principal fator de influência na resistência ao impacto e foi corrigido pelo cálculo de um novo coeficiente de correção neste trabalho. O efeito do entalhe agudo apresentou indicativos de resultados possivelmente mais conservadores do que o entalhe normatizado. Como conclusão final, os resultados mostraram que as alterações propostas neste estudo podem ser incorporadas às normas que regulam os ensaios de tenacidade, corroborados por um volume maior de ensaios.

**PALAVRAS-CHAVE:** API 5CT. N80Q. Revenimento. Nova geometria Charpy V. Tenacidade

## ABSTRACT

With the society development, the need for energy increases, consequently the demand for fossil fuels and natural gas increases. As a result, the search for new technology to explore oil reserves that are difficult to access becomes necessary, such as reserves in ultra-deep waters. The main companies in the extraction sector have invested in this technology segment. For this reason, the study of microalloyed steels has a prominent position in the development of technology in this direction. This study aims to analyze the behavior of API 5CT grade N80 grade Q steel tempered at 400°C, through the Charpy-V impact, in the following aspects: first, to analyze the toughness behavior tempered at 400°C at different temperatures; second, it consists of verifying the feasibility of using convexed specimen, taken directly from the tube wall as an alternative to the standardized geometry cdp, in order to reduce the cost and time in preparation, since, once it proves viable, it will eliminate all the machining process while maintaining the natural geometry of the tube; finally, the analysis of the notch effect with a smaller radius than the conventional one, with the objective of simulating a more real working condition. The conclusion found when analyzing the data obtained in the tests confirms the objective of heat treatment with tempering at 400°C, where the energy obtained in the Charpy test at zero degree Celsius was 71J, a value higher than that required by the API 5CT standard, of 27J at the same temperature. The impact resistant area of the domed specimen proved to be the main influence factor in the impact resistance and was corrected by calculating a new correction coefficient in this work. The effect of the acute notch showed indications of results possibly more conservative than the standardized notch. As a final conclusion, the results showed that the changes proposed in this study can be incorporated into the norms that regulate the toughness tests, corroborated by a larger volume of tests.

**KEYWORDS:** API 5CT N80Q. Tempering. New geometry Charpy V. Toughness.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz energética do Brasil e do Mundo. ....	14
Figura 2 - Lâminas d'água do reservatório perfurado do pré-sal.....	16
Figura 3-Profundidade dos reservatórios perfurados no Brasil ao passar dos anos. ....	16
Figura 4 - Fluxo de classificação simplificado do aço. ....	19
Figura 5 - O efeito do teor de carbono na energia de impacto. ....	20
Figura 6 - Elementos de liga que se dissolvem na ferrita, no sentido de aumentar a sua dureza	22
Figura 7 - Diagrama esquemático de recozimento .....	24
Figura 8 - Diagrama esquemático de transformação têmpera.....	24
Figura 9 - Diagrama esquemático de transformação revenido.....	25
Figura 10 - Apresenta a influência do revenimento na dureza e na tenacidade do material. ...	26
Figura 11 - Locais típicos para retirada de amostras para teste.....	30
Figura 12 - Orientação da amostra para ensaio de impacto Charpy-V.....	31
Figura 13 - Processo da laminação controlada com e sem o resfriamento acelerado .....	33
Figura 14 - Processo de produção de tubos .....	34
Figura 15 - Tubo API 5CT grau N80 tipo Q em corte. ....	35
Figura 16 -Tubo longitudinal API 5CT grau N80 tipo Q.....	36
Figura 17 - Corte das amostras por eletroerosão a fio.....	37
Figura 18 - Área resistente ao impacto da secção transversal dos corpos de prova.....	38
Figura 19 - Dimensões do corpo de prova em mm. ....	38
Figura 20 - Diagrama Fe-C. ....	40
Figura 21 - Forno par austenitização dos corpos de prova.....	40
Figura 22 - Durômetro WOLPERT.....	41
Figura 23 - Pontos de medição de dureza.....	42
Figura 24 - corpo-de-prova confeccionado. ....	43
Figura 25 - Máquina de ensaio de impacto Charpy-V. ....	43
Figura 26 - cdps alinha com a superfície menor.....	45
Figura 27 - cdps alinha com a superfície maior .....	46
Figura 28 - Curvas comparando a geometria do cdp de raio 0,25mm (único gráfico não corrigida pelo novo fator de correção abaulado). ....	50
Figura 29 - Curvas comparando a geometria do cdp de raio 0,10mm. ....	50
Figura 30 - Curvas comparando a geometria do cdp de raio 0,25mm. ....	51

Figura 31 - Orientação e região de impacto no cdp abaulado e usinado.....	52
Figura 32 - Energia média absorvidas corpos de prova usinados. ....	54
Figura 33 - Energia média absorvidas corpos de prova abaulados .....	54
Figura 34 - Superfícies fraturadas. ....	56
Figura 35 - Carta padrão para determinação % da área dúctil estabelecida pela norma ASTM.	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química em fração mássica [%] .....	28
Tabela 2 - Especificações de dureza.....	29
Tabela 3 - Especificação de energia mínima absorvida Charpy.....	29
Tabela 4 - Dimensões de corpo de prova necessário para tubos revenidos.....	31
Tabela 5 - Dimensões dos corpos de prova e coeficiente de correção .....	32
Tabela 6 - Elementos de liga do aço API 5CT N80 tipo Q. ....	36
Tabela 7 - Dados do ensaio de dureza.....	46
Tabela 8 - Resultados do ensaio de impacto Charpy V em cdp usinado.....	47
Tabela 9 – Análise estatística do ensaio de impacto Charpy V em cdp abaulado.....	48
Tabela 10 - Análise comparativa da influência da geometria (coeficiente de correção 0,55).....	49
Tabela 11 - Análise comparativa da influência da geometria (coeficiente de correção 0,67 para abaulado). ....	49
Tabela 12 - Análise comparativa da influência do raio de fundo do entalhe na energia impacto. ....	53

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área
A <sub>1</sub>	Temperatura de Austenitização
Ar	Área resistente
API	American Petroleum Institute
ARBL	Alta Resistência e Baixa Liga e – Deformação $\epsilon$ – 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 <sub>cm</sub>	Percentual de Carbono Médio
$\Delta E$	Varição de energia absorvida
MO	Microscopia óptica
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica %p – Porcentagem em massa

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\varepsilon$	Alongamento $\sigma_e$ - Limite de escoamento $\sigma_r$ - 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

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	14
1.2	OBJETIVOS DESTE TRABALHO .....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1	AÇOS .....	18
<b>2.1.1</b>	<b>Classificação dos aços</b> .....	18
<b>2.1.2</b>	<b>Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)</b> .....	19
<b>2.1.3</b>	<b>Influência de Elementos de Liga</b> .....	20
<b>2.1.4</b>	<b>Carbono equivalente em aços ligados</b> .....	22
2.2	TENACIDADE .....	22
2.3	TRATAMENTO TÉRMICO .....	23
<b>2.3.1</b>	<b>Recozimento</b> .....	23
<b>2.3.2</b>	<b>Têmpera</b> .....	24
<b>2.3.3</b>	<b>Revenido</b> .....	25
2.4	AÇO API 5CT GRAU N80Q .....	27
<b>2.4.1</b>	<b>Norma API</b> .....	27
<b>2.4.2</b>	<b>Composição Química conforme API.</b> .....	27
<b>2.4.3</b>	<b>Propriedades mecânicas conforme API.</b> .....	28
<b>2.4.4</b>	<b>Ensaio de dureza conforme API</b> .....	29
<b>2.4.5</b>	<b>Ensaio de impacto Charpy-V conforme API</b> .....	30
2.5	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DOS TUBOS .....	33
<b>2.5.1</b>	<b>Laminação controlada</b> .....	33
<b>2.5.2</b>	<b>Processo de conformação dos tubos</b> .....	34
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	35
3.1	MATERIAL .....	35

3.2	MÉTODOS.....	38
3.2.1	Tratamentos térmicos .....	39
3.2.2	Ensaio de dureza .....	41
3.2.3	Ensaio de impacto Charpy-V .....	42
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	45
4.1	ENSAIO DE DUREZA.....	45
4.2	ENSAIO DE IMPACTO CHARPY V.....	47
4.3	SUPERFÍCIES FRATURADAS.....	55
5	<b>CONCLUSÕES</b> .....	57
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	58

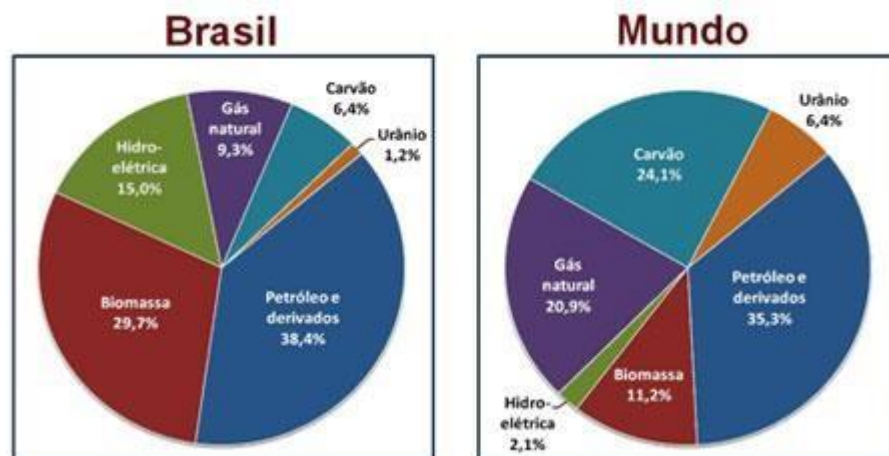
# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Devido ao aumento da demanda por produtos derivados do petróleo e gás, advindo do crescimento e desenvolvimento mundial, só no Brasil a produção de petróleo foi de 2.6 milhões de barris por dia em 2016 de acordo com a Agência Nacional do Petróleo. Com o agravante do esgotamento gradativo das reservas conhecidas, no final de 2016, as reservas totais de petróleo do Brasil foram contabilizadas em 22,7 bilhões de barris, volume 7,1% menor que em 2015 (FGV PROJETOS, 2012). Tal situação, alinhada com o avanço da tecnologia que possibilitou localizar reservas destes produtos em regiões adversas, levou a necessidade de extrair petróleo e gás em ambientes de condições mais severas que no passado, como em poços *offshore* de grandes profundidades, com temperatura e pressão elevadas, isto levou as empresas a se preocuparem com a resistência e a tenacidade dos materiais usados na prospecção (FGV PROJETOS, 2018)

Com relação à produção em mar, o maior volume de crescimento se deu no Estado do Rio de Janeiro, passando de 14,1 bilhões de metros cúbicos em 2015 para 16,6 bilhões de metros cúbicos em 2016, aumento de 18,1%, (43,8% da produção nacional e 56,9% da produção *offshore*). No Estado de São Paulo, segundo maior produtor nacional, o volume produzido atingiu 5,8 bilhões de metros cúbicos, que representou crescimento anual de 5,3% (PETROBRAS, 2018). A Figura 1 ilustra a matriz energética brasileira em comparação à mundial.

Figura 1- Matriz energética do Brasil e do Mundo.



Fonte: Empres de Pesquisa Energética (2018).



A exploração *offshore* (exploração em alto mar) em regiões de águas profundas e, agora com a descoberta do pré-sal, ultra profunda tem direcionado os investimentos para novas tecnologias de prospecção, com a preocupação, em especial, com os materiais usados na confecção dos tubos, que passam a operar em regiões severas, tendo que suportar altas pressões, variação brusca de temperatura (os dois devido à profundidade), carregamento dinâmico (imposta pelas oscilações marítimas) e corrosão (relacionado ao próprio produto transportado e água salina do meio) (BOAS VILAS, 2012).

Tais ambientes levam as indústrias petrolíferas e de gás natural a terem interesse no uso de aços microligados, em específico o API N80Q.

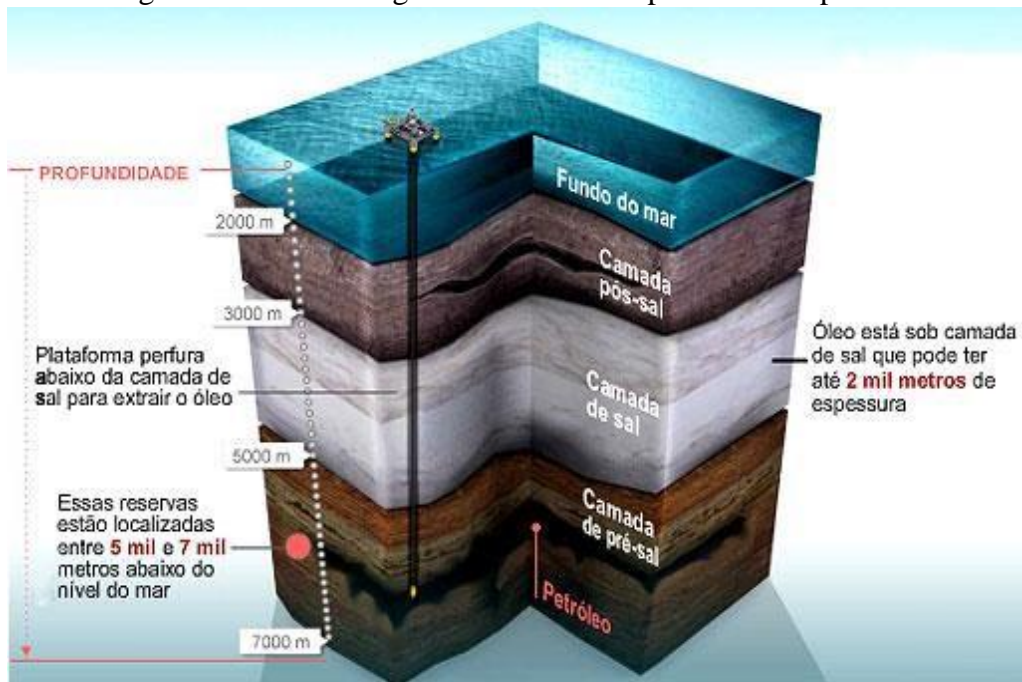
Devido a esses pontos, houve um grande interesse por parte das empresas ligado à extração de petróleo e gás natural no uso dos aços microligados na estrutura de linhas de dutos de prospecção, transporte e distribuição. A vantagem desses aços é sua boa tenacidade conciliada com alta resistência mecânica. São classificados como aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) (FGV PROJETOS, 2012).

A produção offshore correspondeu a 77% do gás natural produzido no País, totalizando 29,2 bilhões de m<sup>3</sup>, aumento anual de 9,2%. A produção em terra cresceu 3,7% e alcançou 8,7 bilhões de m<sup>3</sup> (GOVERNO FEDERAL, 2018).

Com extensão de 11,8 mil quilômetros, 110 dutos destinavam-se à movimentação de gás natural. Para os derivados, havia 407 dutos, totalizando 5900km. Outros 32 dutos, com 2000km, destinavam-se à movimentação de petróleo. E os 76 km restantes, compostos por 37 dutos, eram reservados à movimentação dos demais produtos, tais como etanol e solventes (TRANSPETRO, 2012).

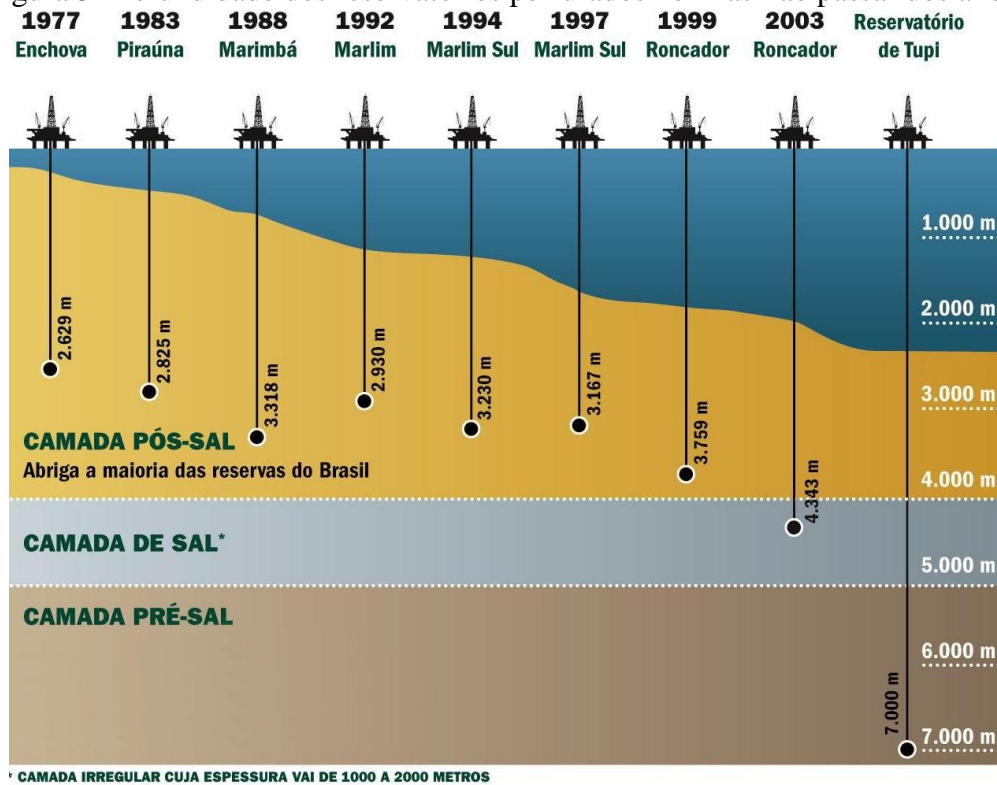
A Figura 2 mostra a profundidade e as camadas perfuradas até o pré-sal, e a Figura 3 apresenta o avanço da extração de petróleo na costa brasileira em termos de lâminas de água dos poços e dos reservatórios perfurados pela Petrobras no decorrer dos anos (AGÊNCIA PETROBRAS, 2018).

Figura 2- Lâminas d'água do reservatório perfurado do pré-sal.



Fonte: Petrobras (2018).

Figura 3-Profundidade dos reservatórios perfurados no Brasil ao passar dos anos.



Fonte: Agência Petrobrás (2018).

## 1.2 OBJETIVOS DESTE TRABALHO

Este trabalho tem como objetivo: analisar os valores de tenacidade de um tubo de aço API 5CT N80Q, por meio de ensaio Charpy-V após tratamento térmico de têmpera e revenimento a 400°C, atualmente usado na fabricação de tubos de prospecção de petróleo e gás; a análise comparativa de um cdp geometria abaulado retirado direto do tubo com o cdp normatizado com a finalidade de estabelecer uma correlação entre as geometrias podendo, assim, eliminar todo o processo de usinagem; avaliar a confiabilidade e a alternativa à norma de um raio de 0,1mm na raiz do entalhe, portanto mais agudo e crítico em relação ao convenção podendo gerar dados mais confiáveis. Em resumo, as propostas são elevar a tenacidade através do revenimento e verificar a viabilidade de adaptar a norma vigente para utilizar cdps abaulados e entalhes com raio menor de maneira a gerar economia, um maior volume de ensaios e agilidade para aplicações em tubos de aço com resultados mais confiáveis.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 AÇOS

Aços são ligas ferro-carbono que podem conter concentrações apreciáveis de outros elementos de liga; existem milhares de ligas que possuem composições e/ou tratamentos térmicos diferentes. As propriedades mecânicas são sensíveis ao teor de carbono. Alguns dos aços mais comuns são classificados de acordo com a sua concentração de carbono. Também existem subclasses dentro de cada grupo, de acordo com as concentrações de outros elementos de liga. Os aços comuns ao carbono contêm apenas concentrações residuais de impurezas além do carbono e de um pouco de manganês. No caso de aços-liga, mais elementos de liga são adicionados intencionalmente em concentrações. (CALLISTER, 2012).

#### 2.1.1 Classificação dos aços

Os aços podem ser classificados em grupos, com base em propriedades comuns (SOCIETY OF AUTOMOTIVE, 2018):

- Composição, como aços-carbono e aços-liga;
- Processo de acabamento, com aços laminados a quente ou aços laminados a frio;
- Forma do produto acabado, como barras, chapas grossas, chapas finas, tiras, tubos ou perfis estruturais.

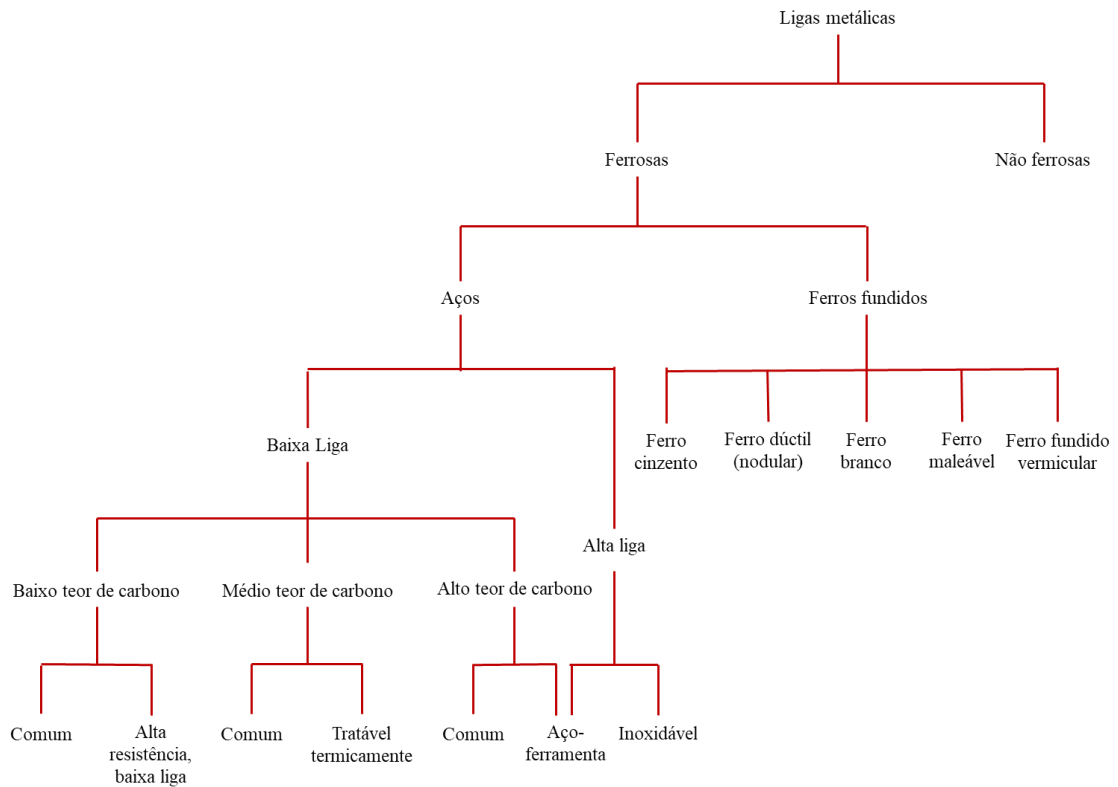
Interação entre os critérios de classificação do aço:



O método de classificação mais usual é através de sua composição química, sendo esta a mais utilizada para especificações técnicas do material (RUDOLF STEINER, 1990).

Figura 4 apresenta os principais grupos de ligas metálicas com base em sua constituição química.

Figura 4 - Fluxo de classificação simplificado do aço.



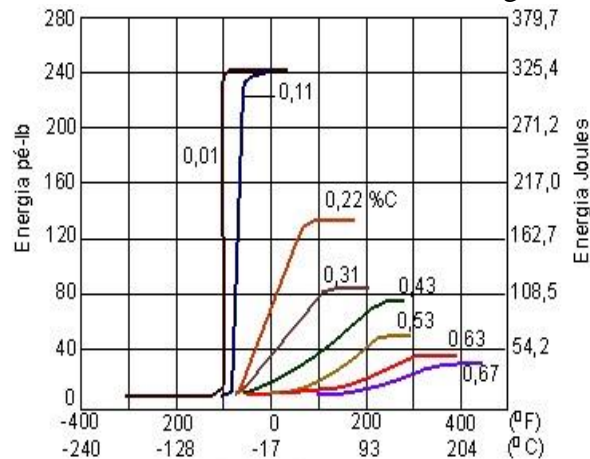
Fonte: Callister; Rethwisch (2012).

### 2.1.2 Aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL)

Os aços ARBL apresentam resistência entre 300 e 700 Mpa, tendo sido desenvolvidos para elevar a relação entre resistência e peso, visando aplicação em estruturas móveis. A soma de elementos de liga geralmente não ultrapassa a 2%, e o teor de carbono situa-se abaixo de 0,3% (COLPAERT e COSTA E SILVA, 2008).

Figura 5 apresenta a curva de impacto em função da concentração de carbono.

Figura 5 – O efeito do teor de carbono na energia de impacto.



Fonte: Marques, L. F (2011).

A boa correlação resistência mecânica-tenacidade encontrada em aços microligados é consequência da formação de granulação refinada associada à formação de precipitados finamente dispersos na matriz. Esses aços são muito utilizados pela indústria petrolífera. Nesses aços, os níveis de resistência mecânica e tenacidade são afetados pela combinação de uma microestrutura refinada de ferrita e perlita (ou ferrita/martensita), e com o endurecimento por precipitação causado pela formação de carbonetos de V, Ti ou Nb finamente dispersos na matriz da ferrita. Um endurecimento residual também pode ser conseguido em função do processamento termomecânico que promove uma textura anisotrópica no material (OLIVEIRA, 2014)

### 2.1.3 Influência de Elementos de Liga

A adição de elementos de liga é justificada, pois muitas vezes pequenos acréscimos de determinados componentes causam significativa melhora nas propriedades dos aços. As características que levam ao emprego de tais elementos de liga são (SILVA e MEI, 2010):

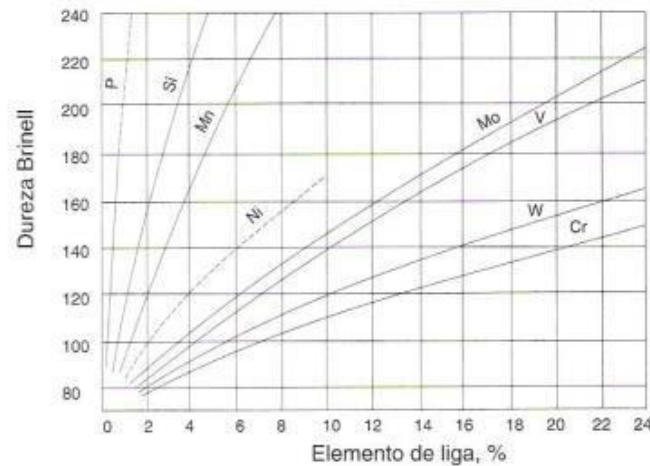
- **Carbono (C):** é o mais importante devido à necessidade de haver carbonetos na estrutura para conferir a dureza e a resistência necessárias à aplicação. Geralmente o teor de carbono é elevado, situando-se entre 0,8 e 2%. Quando tenacidade é um fator importante para a aplicação (tais como martelos e talhadeiras devido aos esforços de impacto), emprega-se teores de carbono baixo.
- **Silício (Si):** tem função desoxidante na fabricação do aço. Normalmente situa-se entre 0,10 e 0,30%, pois teores mais elevados tendem a favorecer a grafitação. Em alguns poucos casos (aços resistentes ao choque) emprega-se silício elevado (1% ou 2%) para fins de aumento

de temperabilidade e aumento da resistência ao revenido sem que haja abaixamento da linha Ms (que favoreceria a formação de austenita retida).

- **Cromo (Cr):** é o elemento adicionado com a função principal de elevar a temperabilidade, pois é o que apresenta melhor relação custo/benefício. Além disso o cromo forma carbonetos endurecedores que são facilmente solúveis no tratamento de austenitização que precede a têmpera. O efeito de aumento de temperabilidade pelo cromo geralmente é máximo para teores de 4%Cr, sendo este o valor tipicamente empregado em aços ferramentas para trabalho a quente e em aços rápidos. No caso de aços para trabalho a frio, o teor de cromo pode atingir 12% quando se deseja dureza elevada. Neste caso o teor de cromo é mais elevado para fins de gerar maior quantidade de carbonetos de cromo na matriz (o teor de carbono situa-se, então, em cerca de 2%C). Em teores acima de 4% o cromo tem ainda o efeito de elevar a resistência a quente por aumentar a resistência à oxidação e contribuir para a formação do pico de dureza secundária.
- **Vanádio (V):** atua como forte desoxidante (geralmente empregado em teores até 0,5%). O vanádio tem forte efeito sobre a temperabilidade quando dissolvido na austenita. Entretanto a sua função principal é a de atuar como estabilizador de grão, pois o seu respectivo carboneto é de difícil solubilização na austenita no tratamento de têmpera, evitando que haja o crescimento da mesma. Em aços rápidos (devido ao emprego de corte a quente), o teor de vanádio situa-se entre 1 e 2%.
- **Molibdênio (Mo):** tem efeitos similares ao tungstênio, tendo sido usado para substituí-lo. O custo do molibdênio é maior, porém a quantidade empregada é menor (normalmente o teor de molibdênio substitui duas vezes a quantidade de tungstênio.).
- **Níquel (Ni):** Aumenta a resistência a corrosão, a tenacidade e a resistência mecânica.
- **Cobre (Cu):** Aumenta a resistência a corrosão atmosférica, aumenta a resistência a fadiga, por outro lado, reduz sensivelmente a soldabilidade, ductilidade e a tenacidade do aço.
- **Enxofre (S):** É bastante prejudicial aos aços, pois desfavorece a ductilidade, especialmente o dobramento transversal, e diminui a soldabilidade.
- **Manganês (Mn):** Eleva a resistência mecânica de uma forma segura, pois atua na resistência à fadiga e no limite de escoamento. Desfavorece a soldagem, entretanto, é menos prejudicial que o carbono. É muito usado nos aços comerciais.

A Figura 6 mostra o comportamento da dureza em relação alguns elementos de ligas.

Figura 6 - Elementos de liga que se dissolvem na ferrita, no sentido de aumentar a sua dureza



Fonte: Lino (2017).

#### 2.1.4 Carbono equivalente em aços ligados

O carbono equivalente (CE), Equação 1, fornece um valor numérico da contribuição da composição química para a combinação de diferentes elementos de liga. Ele foi criado em 1940, quando Dearden e O'Neill propuseram uma fórmula para prever a resistência, temperabilidade e dureza da ZTA de um aço. Medindo o carbono equivalente, sabemos a temperabilidade do aço (CALOI, 2008).

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

A fórmula do Pcm, Equação 2, é adequada para aços baixo carbono e é geralmente usada para aços modernos como aços API, onde a quantidade de carbono não passa de aproximadamente 0,11%. Comparada com a fórmula do CE, a Pcm dá maior importância a adição do elemento de liga (CALOI, 2008).

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

## 2.2 TENACIDADE



A tenacidade é um termo mecânico que é usado em vários contextos; livremente falando, ela representa uma medida da habilidade de um material em absorver energia até a sua fratura. A geometria do corpo de prova, bem como a maneira como a carga é aplicada, são fatores importantes nas determinações de tenacidade. Para condições de carregamento dinâmicas (elevada taxa de deformação), e quando um entalhe (ou ponto de concentração de tensão) está presente, a *tenacidade ao entalhe* é averiguada pelo uso de um ensaio de impacto. Além disso, a tenacidade à fratura é uma propriedade indicativa da resistência do material à fratura quando este possui uma trinca (CALLISTER, 2012).

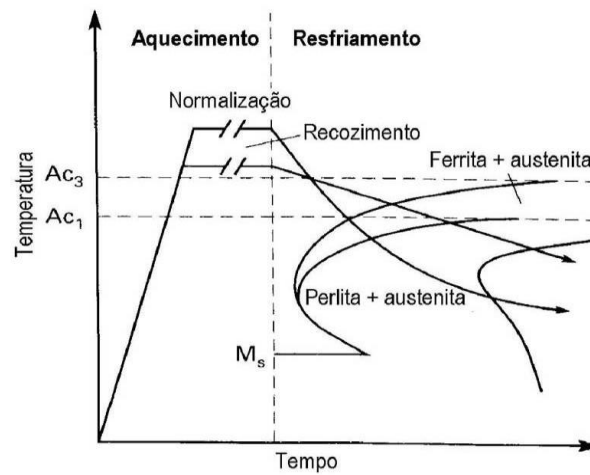
## 2.3 TRATAMENTO TÉRMICO

Tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir – lhes características determinadas. As propriedades dos aços dependem, em princípio, da sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços, resultando, em consequência na alteração mais ou menos pronunciada, de suas propriedades (CHIAVERINI, 1995).

### 2.3.1 Reozimento

Objetivos principais do reozimento, representado na Figura 7, são os seguintes: remover tensões, devidas aos processos de fundição e conformação mecânicas, a quente ou a frio, diminuir a dureza, melhorar a ductilidade, ajustar o tamanho de grãos, regularizar a textura bruta de fusão, produzir uma estrutura definidas, eliminar, enfim, os feitos de quaisquer tratamentos mecânicos e térmicos a que o material tenha sido anteriormente submetido (CHIAVERINI, 1995)

Figura 7 - Diagrama esquemático de recozimento



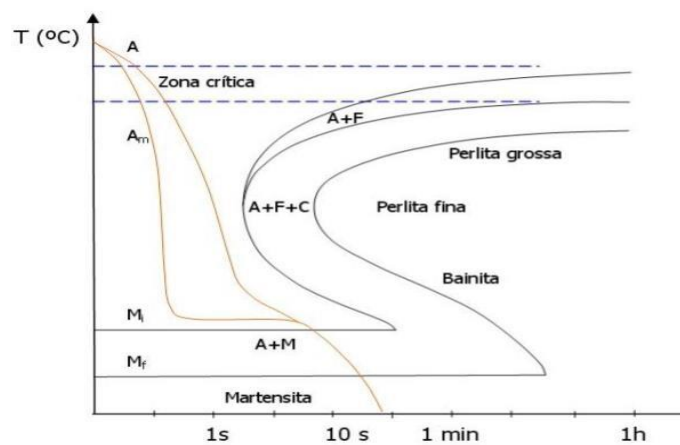
Fonte: Chiaverini (1995)

### 2.3.2 Têmpera

Consiste no resfriamento rápido do aço de uma temperatura superior à sua temperatura crítica (mais ou 50°C acima da linha A1 os hipereutetóides) em um meio como óleo, água, salmoura ou mesmo ar). A Figura 8 ilustra a operação de têmpera em relação as curvas de mudança de fase. A velocidade de resfriamento, nessas condições, dependerá do tipo de aço, da forma e das dimensões das peças e do meio refrigerante.

Apesar do aumento significativo da dureza ocorre a redução da ductilidade (baixos valores de alongamento e estrição), da tenacidade e o aparecimento de apreciáveis tensões internas (BHADESHIA e HONEYCOMBE, 2005).

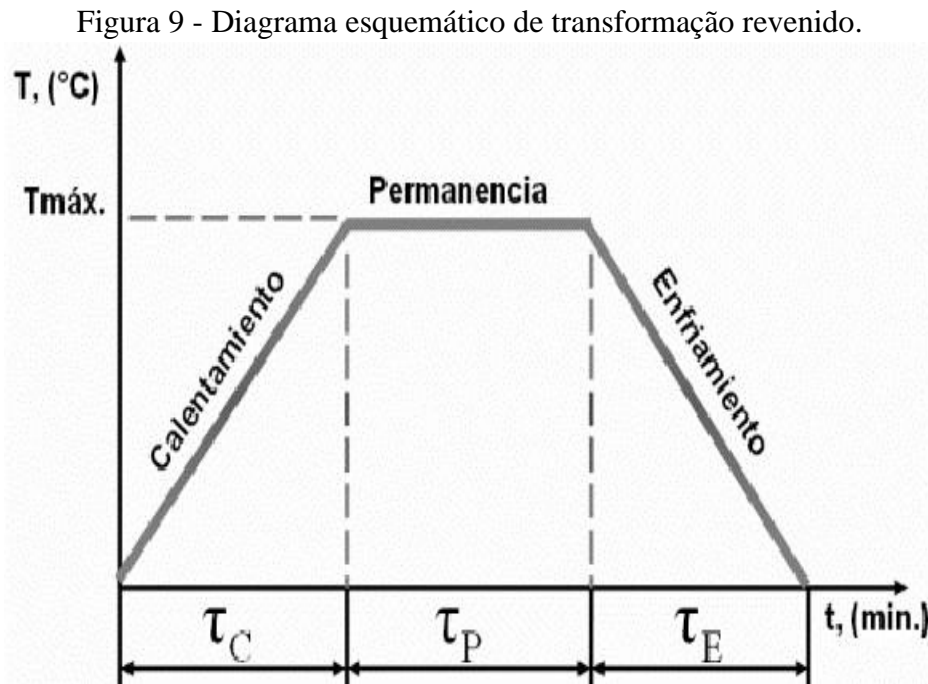
Figura 8 - Diagrama esquemático de transformação têmpera.



Fonte: Bhadeshia e Honeycombe (2005)

### 2.3.3 Revenido

O revenimento, Figura 9, em geral acompanha a têmpera, uma vez que é o tratamento que elimina tensões internas, diminui o excesso de dureza causado pela têmpera além de aumentar a ductibilidade e a tenacidade do material (TOTTEN, 2006).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme a temperatura de revenido, verificam-se as seguintes transformações (CHIAVERINI, 2006):

Entre 25° e 100°C, ocorre segregação ao uma redistribuição do carbono em direção a discordância; essa pequena precipitação localizada do carbono pouco afeta a dureza. O fenômeno é predominante em aços de alto carbono.

Entre 100° a 250°C, as vezes chamado primeiro estágios do revenido - ocorre precipitação de carboneto de ferro do tipo *epsilon*, de fórmula  $Fe_{2-3}C$ , e reticulado hexagonal; este carboneto pode estar ausente em aços de baixo carbono e de baixo teor em liga; a dureza Rockwell começa a cair, podendo chegar a 60 HRC.

Entre 200 a 300°C - as vezes chamado de segundo estágio do revenido - ocorre transformação de austenita retida em bainita; a transformação ocorre somente em aços-carbono de médio e alto teor de carbono; a dureza Rockwell continua a cair.

Entre 250°C a 350°C - as vezes chamado de terceiro estágio do revenido - forma-se um carboneto metaestável, de fórmula  $Fe_5C_2$ ; a dureza Rockwell continua caindo, podendo atingir valores pouco acima a 50HRC.

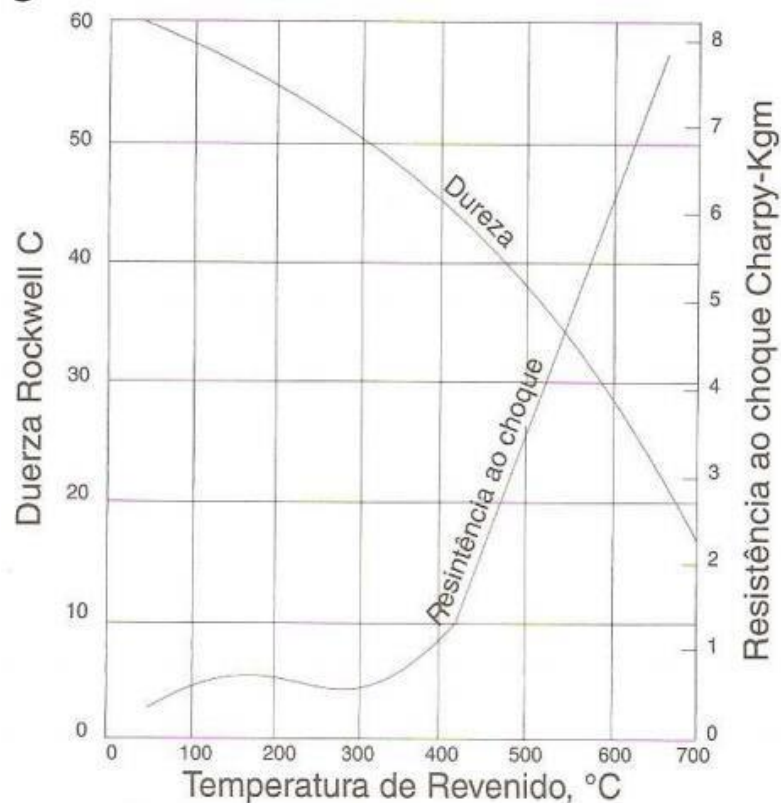
Entre 400°C a 600°C, ocorre a recuperação da subestrutura de discordância; os aglomerados de  $Fe_3C$  passam a uma forma esferoidal, ficando mantida uma estrutura de ferrita fina acicular; a dureza Rockwell cai para valores de 45 a 25HRC

Entre 500 a 600°C, somente nos aços contendo Ti, Cr, Mo, V, Nb ou W, há precipitação de carboneto de liga; a transformação é chamada “endurecimento secundário” ou quarto estágio do revenido.

Finalmente, entre 600 a 700°C, ocorre recristalização de crescimento de grão; a cementita precipitada apresenta forma nitidamente esferoidal; a ferrita apresenta forma equiaxial; a estrutura é frequentemente chamada “esferoidita” e caracteriza-se por ser muito tenaz e de baixa dureza, variando de 5 a 20HRC.

A Figura 10 apresenta a influência da temperatura de revenimento nas propriedades de dureza e resistência ao impacto em função das temperaturas de revenido descritas.

Figura 10 - Apresenta a influência do revenimento na dureza e na tenacidade do material.



Fonte: Chiaverini (2006).

## 2.4 AÇO API 5CT GRAU N80Q

### 2.4.1 Norma API

As normas API constituem o conjunto de especificações, procedimentos e manuais mais amplamente utilizados na indústria de petróleo e gás.

Uma das finalidades dessas normas é garantir a qualidade dos equipamentos que serão utilizados durante todo o processo de exploração e produção de petróleo e gás natural.

Os Tubos API 5CT têm aplicação na perfuração e na extração de poços de petróleo e gás e podem ser classificados nos três tipos listados a seguir (FREITAS, 2007):

- **Tubos de perfuração (*drilling*):** são utilizados para a perfuração de poços;
- **Tubos de revestimento (*casing*):** são inseridos nas perfurações e assentados com cimento;
- **Tubos de produção (*tubing*):** são tubos posicionados dentro dos tubos de revestimento e utilizados para a extração de óleo e gás. Também são utilizados no transporte de fluidos hidráulicos para o acionamento de equipamentos.

### 2.4.2 Composição Química conforme API.

Aços de alta resistência e baixa liga como os aços API, possuem um elevado refino de grão e pureza. Estes aços são caracterizados pelo reduzido teor de S e valores baixos de impurezas de segunda fase, como inclusões e óxidos (GOUVEIA, RODRIGUES e MARTINS, 2011).

A Tabela 1 apresenta os limites impostos pela norma API 5CT em relação aos elementos químicos de cada grau.

Tabela 1 - Composição química em 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	—
	M65	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,03	—
	L80	1	—	0,43	—	1,9	—	—	—	—	0,25	0,35	0,03	0,03	0,45
2	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 Adaptado de American Petroleum Institute (2010).

No geral, a norma é bastante tolerante quanto a composição em massa de cada elemento de liga, abrindo espaço para as indústrias produzirem seus tubos de acordo com suas necessidades e atendendo as exigências de cada grau referente a composição química (MELO, 2013).

### 2.4.3 Propriedades mecânicas conforme API.

Os requisitos referentes às propriedades mecânicas especificados pela norma (dureza e tenacidade ao impacto), como mostrado nas Tabela 2 e Tabela 3, são mais rigorosas e exigentes que o tolerado pela norma na composição química mostrada.

Tabela 2 - Especificações de dureza

Grupo	Grau	Tipo	total sob carga ( $\epsilon$ )	$(\sigma_e)$		resistência ( $\sigma_r$ ) (min.)	(máx.)		de parede	de dureza permitida
				[Mpa]			[Mpa]	[HRC]		
			[%]	min.	máx.		8	9		
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 3 - Especificação de energia mínima absorvida Charpy

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

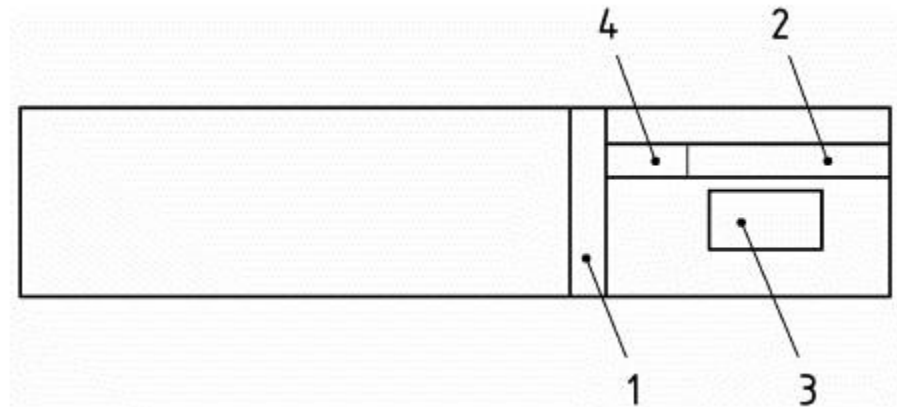
Fonte Adaptado de American Petroleum Institute (2010).

#### 2.4.4 Ensaio de dureza conforme API

A Figura 11 indica os locais em que devem ser retirado as amostras de acordo com a norma ASTM. 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 realizados conforme às normas ISO 6508-1 ou ASTM E18 para ensaio de dureza Rocwell (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

Figura 11 - Locais típicos para retirada de amostras para teste



**Legenda:**

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

Fonte Adaptado de American Petroleum Institute (2010).

#### 2.4.5 Ensaio de impacto Charpy-V conforme API

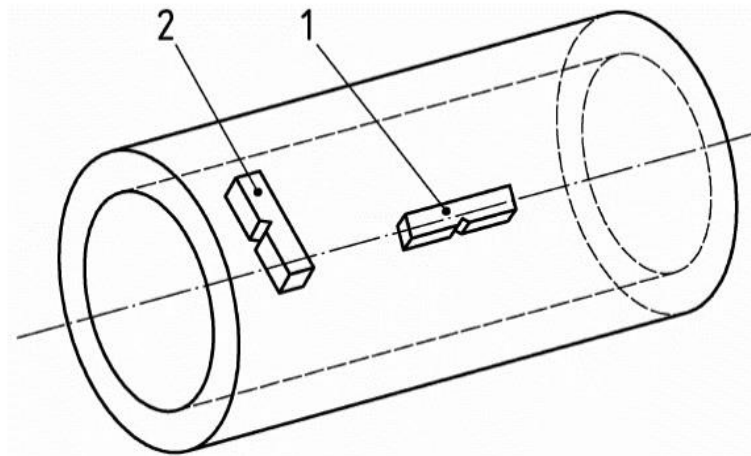
O ensaio de impacto Charpy V deve ser realizado seguindo as especificações da norma ASTM A370 ou ASTM E23.

Os resultados para serem validados quanto aos requisitos da norma API 5CT, os valores medidos nos ensaios devem ser arredondados para o número inteiro mais próximo. O valor da média da energia ao impacto de um grupo de corpos de prova deve ser representado como um número inteiro, de acordo com a ISO 80000-1 ou ASTM E29 (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

As amostras para os ensaios devem ser retiradas seguindo as orientações da Figura 12. Não se deve retirar amostras de tubos aplainados. Em tubos soldados, a solda deve ser posicionada no entalhe quando usado uma amostra transversal (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).



Figura 12 - Orientação da amostra para ensaio de impacto Charpy-V



**NOTA:** Todas as amostras devem ter as dimensões de 10 mm x 10 mm. O entalhe deve ser orientado perpendicularmente ao eixo do tubo.

**Legenda:**

1 – Amostra longitudinal; 2 – Amostra transversal.

Fonte Adaptado de American Petroleum Institute (2010).

Os valores de espessura mínima de parede de tubo para a produção dos corpos de provas para o ensaio Charpy V de acordo com a norma estão descritos na Tabela 4, nas dimensões inteira,  $\frac{3}{4}$  e  $\frac{1}{2}$ .

Tabela 4 - Dimensões de corpo de prova necessário para tubos revenidos

Especificação do tubo	Espessura de parede necessária para usinagem de amostras para ensaio Charpy (min.)		
	Inteiro	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$
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 Adaptado de American Petroleum Institute (2010).

Para corpos de prova de escala reduzida, como é o caso deste trabalho, deve ser corrigido por um fator de correção que é o inverso do fator de redução encontrado na Tabela 5, onde a energia mínima absorvida em ensaio de impacto Charpy V deve ser o resultado da multiplicação de energia mínima para um corpo de prova de escala reduzida. No entanto, não se deve utilizar corpos de prova de escala reduzida que tenham energia absorvida corrigida menor que 11J (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010). O fator de redução para o corpo de prova abaulado não está na norma, o valor foi estimado através da interpolação entre corpo de prova inteiro e ½ com a área do corpo de prova abaulado para estabelecer fator de correção mais adequado à nova geometria.

Tabela 5 - Dimensões dos corpos de prova e coeficiente de correção

<b>Corpo de Prova</b>	<b>Dimensões [mm]</b>	<b>Fator de redução</b>
Inteiro	10,0 x 10,0	1,00
¾	10,0 x 7,5	0,80
½ (Abaulado)		0,67
½	10,0 x 5,0	0,55

Fonte Adaptado de American Petroleum Institute (2010).

A temperatura do ensaio deve ser realizada à zero graus celsius para todos os grupos, exceto para os graus J55 e K55 que devem ser ensaiados à 21°C. A tolerância permitida para a variação da temperatura é de  $\pm 3$  °C (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010).

Na região de transição dúctil para frágil a fratura é controlada pela concorrência entre rasgamento dúctil e fratura de clivagem. Entretanto, o crescimento da trinca dúctil pode ocorrer por crescimento de vazios e pelo processo de coalescência que são conduzidos pela deformação incrementada. A fratura de clivagem pode ocorrer por um processo controlado de tensão. Conseqüentemente, uma alta restrição plástica na ponta da trinca pode promover condições de fratura de clivagem e uma baixa restrição plástica pode promover mecanismos de crescimento de vazios dúcteis em temperaturas dentro do regime de transição dúctil para frágil. Sendo assim, qualquer um dos dois tipos de fratura pode ocorrer na região de transição dúctil para frágil. A perda de singularidade, geralmente chamado de perda da restrição plástica, conduz a uma variação de tenacidade de fratura com a geometria do espécime e a profundidade da trinca. Conceitualmente, nestes casos a restrição plástica é uma característica estrutural que inibe o fluxo plástico e causa alta tensão triaxial (ESPEZUA, 2010)

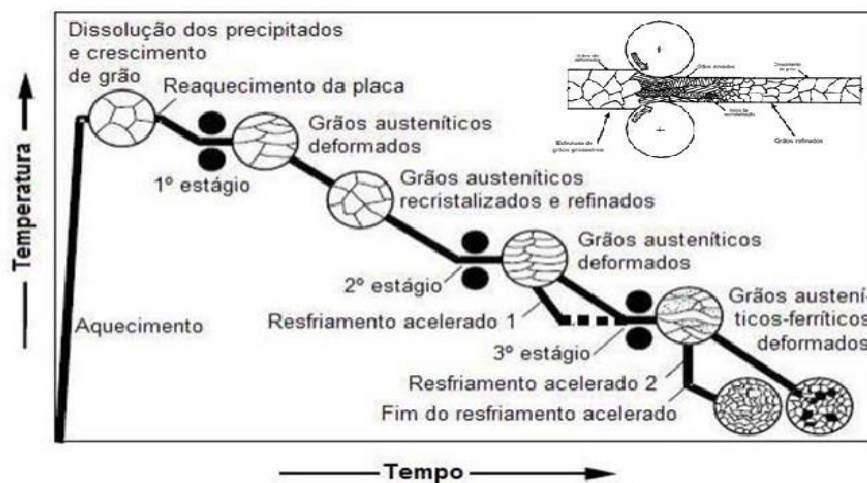
## 2.5 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DOS TUBOS

### 2.5.1 Laminação controlada

O processo de fabricação para a obtenção de tubos com a microestrutura desejada começa com a preparação de chapas adequadas. Até os anos 70, a laminação convencional com tratamento térmico de normalização proporcionava microestrutura ferrítica-perlítica grosseira. Com esta estrutura, entretanto, não é possível obter os elevados níveis de resistência mecânica exigidos pelas aplicações na indústria petrolífera. Em meados dos anos 70 um importante avanço no desenvolvimento das chapas ocorreu com o advento da laminação controlada. Este processamento termomecânico, confere aos aços microligados propriedades superiores em comparação com os aços com mesmo nível de elementos liga, além de proporcionar boa tenacidade e soldabilidade. O produto final deste processo é um aço com granulação ferrítica fina. O refinamento da estrutura pode ser explicado pela alta taxa de nucleação da ferrita em decorrência do grande número de sítios para deformação preferencial como contornos de grão austenítico e bandas de deformação (GROOVER, 2014).

Na laminação controlada, representada na Figura 13, 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 finos precipitados. Devido a isso, o resultado final é um material com teores baixos de elementos de liga (baixo carbono equivalente), proporcionando um aço com boa soldabilidade e baixo custo (GROOVER, 2014).

Figura 13– Processo da laminação controlada com e sem o resfriamento acelerado



Fonte Adaptado de Lino (2017).

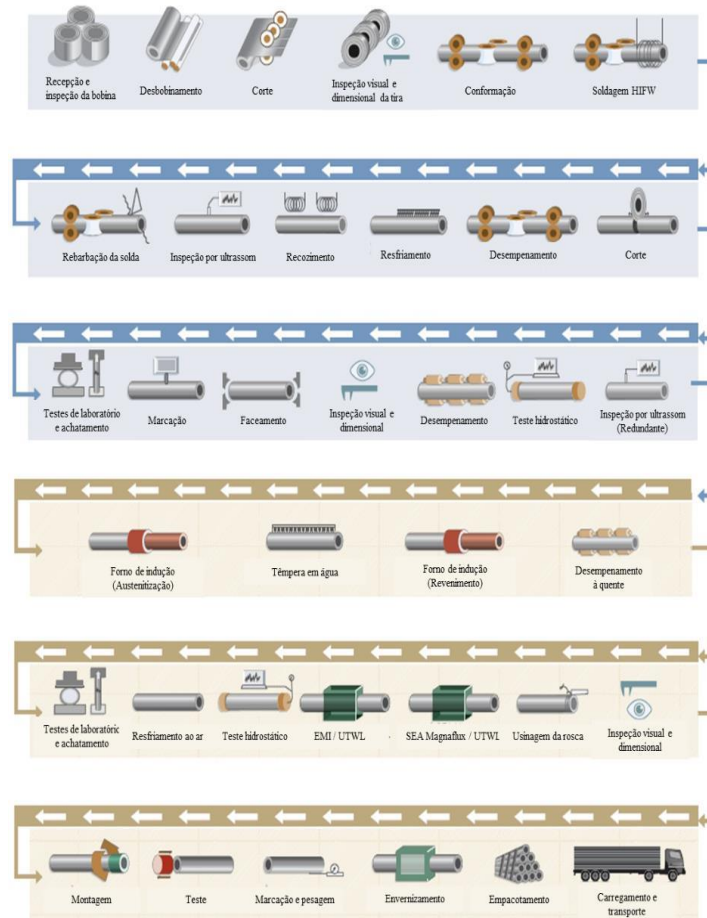
## 2.5.2 Processo de conformação dos tubos

Existem duas formas distintas de realizar a fabricação dos tubos, sendo elas, com costura e sem costura.

O tubo de aço com costura é feito por uma ferramenta que promove uma dobra da chapa de aço em sua própria volta. Essa ferramenta se chama calandra. Depois dessa etapa, o tubo formado irá passar por um processo de soldagem, para juntar as suas duas extremidades, processo ilustrado na Figura 14. A fabricação de tubos de aço desse tipo é usada como componentes de transmissão, ideais para ferramentas de perfuração petrolífero.

Já o sem costura consiste em um processo em que o tarugo, pedaço de cilindro altamente maciço sofre aquecimento. Após essa etapa, o miolo do material passa por um resfriamento e depois é desprendido, criando-se uma casca. O tubo de aço sem costura não é soldado, o que o torna ideal para canalizar materiais que provocam pressão (APOLO TUBULARS, 2015).

Figura 14 - Processo de produção de tubos



Fonte Adaptado de Apolo Tubulars (2015).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAL

O material em estudo é um tubo de aço API 5CT N80 tipo Q. A metodologia consiste na fabricação de corpos de prova da parede deste tubo, tratamento térmico de recozimento, têmpera e revenimento, medição da dureza, mapeamento da temperatura de transição dúctil-frágil e análise entre os dados medidos da rotina de tratamento.

Foi utilizado um tubo OCTG de aço API 5CT de grau N80Q, com limite de escoamento mínimo de 80 ksi ou 552 Mpa, com as seguintes propriedades:

- Alta resistência e baixa liga;
- Excelente tenacidade;
- Elevada soldabilidade.

O Tubo foi cedido pela empresa Apolo Tubular, nas dimensões: diâmetro externo de 73,02mm e espessura de parede de 5,51mm. Os tubos foram obtidos a partir de chapas laminadas e fabricados conforme o ciclo apresentado na Figura 14. As

Figura 15 e Figura 16 mostram o tubo em corte e longitudinal respectivamente.

Figura 15 - Tubo API 5CT grau N80 tipo Q em corte.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 16 – Tubo longitudinal API 5CT grau N80 tipo Q.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A composições químicas do aço API N80 tipo Q é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Elementos de liga do aço API 5CT N80 tipo Q.

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

Fonte Adaptado de Sorrija (2016).

Os corpos de provas foram recortados da parede do tubo através do processo de eletroerosão a fio, na posição longitudinal conforme mostra a Figura 17.

Figura 17 – Corte das amostras por eletroerosão a fio.



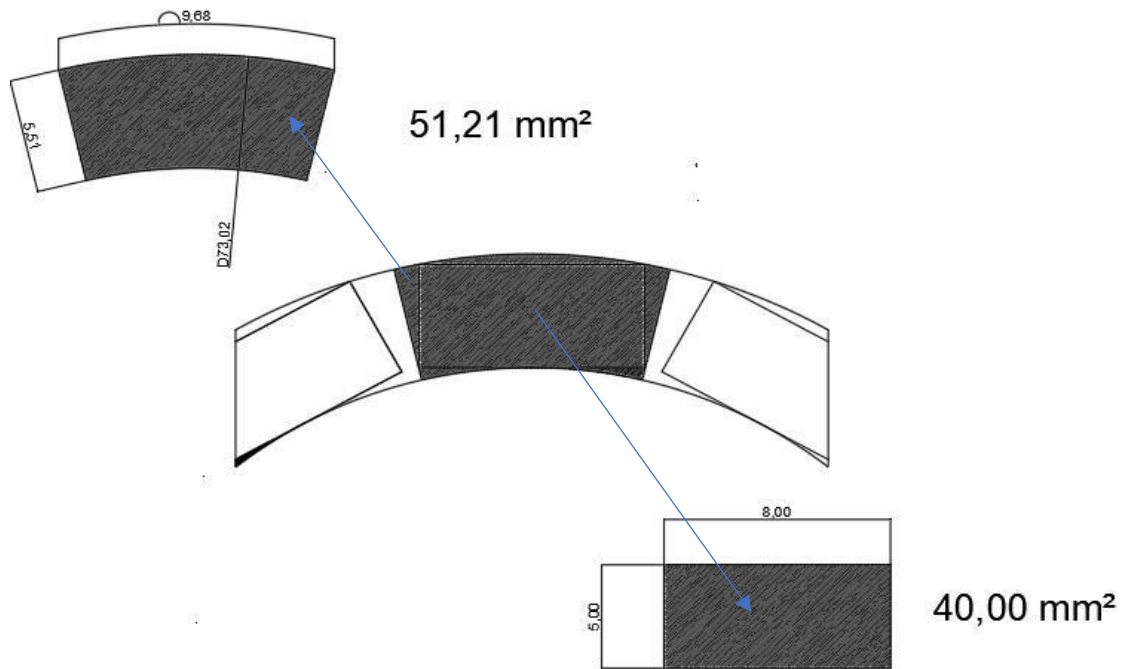
Fonte: Elaborado pelo autor.

As amostras foram retiradas da parede do tubo com seção representada pelo item 02 da Figura 18 . Estas amostras são denominadas corpos de prova abaulados, de seção curva conforme parede do tubo; e as amostras representadas pelo item 01 são denominados corpos de prova normatizado de seção retangular.

Foram produzidos 40 corpos de prova abaulados e 40 usinados (cada geometria com metade dos cdps com entalhe normalizado e a outra, agudo), para analisar comparativamente.

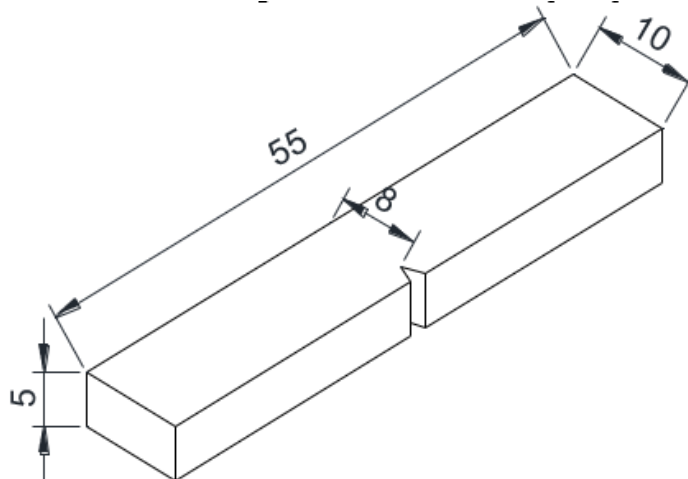


Figura 18 – Área resistente ao impacto da secção transversal dos corpos de prova.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 19 - Dimensões do corpo de prova em mm.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2 MÉTODOS

Foram ensaiados corpos de prova em dois tipos de entalhes e duas geometrias combinadas entre si:

- Corpo de prova de geometria normatizado com entalhe com raio normatizado;



- Corpo de prova de geometria normatizado com entalhe com raio agudo;
- Corpo de prova de geometria abaulado com entalhe de normatizado;
- Corpo de prova de geometria abaulado com entalhe com raio agudo.

O objetivo destas combinações de corpo de prova:

- Observar as propriedades do aço ARBL (dureza e tenacidade) durante a rotina de tratamento térmico proposta: recozimento, têmpera em água e revenimento à 400°C e validar com a norma.
- Estabelecer uma correlação entre o corpo de prova abaulado, retirado diretamente da parede do tubo, e o corpo de prova normatizado.
- Redução de raio de fundo do entalhe para avaliar o corpo de prova em uma situação mais crítica a norma.

Os corpos de prova passaram por tratamento térmico de recozimento, têmpera e revenimento à 400°C. Foram feitas avaliações de dureza dos corpos de prova depois de cada processo térmico.

### 3.2.1 Tratamentos térmicos

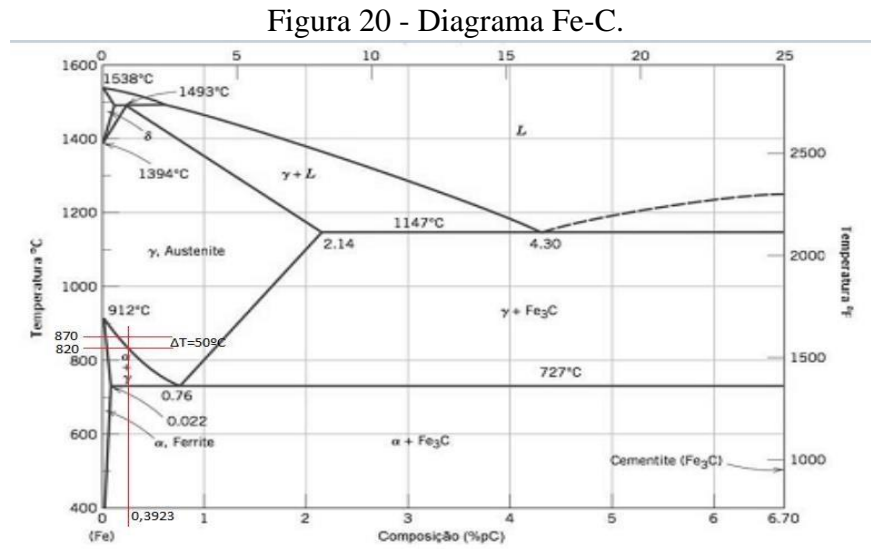
Inicialmente, os corpos de provas foram recozidos à 850°C por quarenta minutos e resfriados no interior do forno, com o objetivo de eliminar as características dos tratamentos térmicos anteriores a este trabalho que possa interferir nos resultados.

Sequencialmente na têmpera, os corpos de prova foram amarrados em pequenos fardos contendo entre quatro e seis amostras cada, inicialmente com as superfícies menores exposta ao ambiente, no entanto resultou em um alto desvio padrão da dureza superficial. Na segunda tentativa foi invertida a posição, as superfícies maiores em contato com o ambiente, gerando maior uniformidade da dureza por atingir taxa de resfriamento mais uniforme em todo o fardo e gerar menor gradiente de temperatura.

Através da equação de carbono equivalente ( $P_{cm}$ ) (Eq. 2) e dos dados da Tabela 6, obteve-se o resultado de carbono equivalente para este aço está apresentado na  $P_{cm}(x)$ .

$$P_{cm}(X) = 0,310 + \frac{(0,250)}{30} + \frac{(1,370 + 0,080 + 0,018)}{20} + \frac{(0,023)}{60} + \frac{(0,0025)}{15} + 0 + 0 = 0,3923 [\%P] C \quad (2)$$

Pelo cálculo do carbono equivalente e com auxílio do diagrama de fases ferro-carbono, estimou-se a temperatura de austenitização do aço em 820°C e a temperatura de aquecimento para a têmpera em 870°C, como mostra a Figura 20 - Diagrama Fe-C.

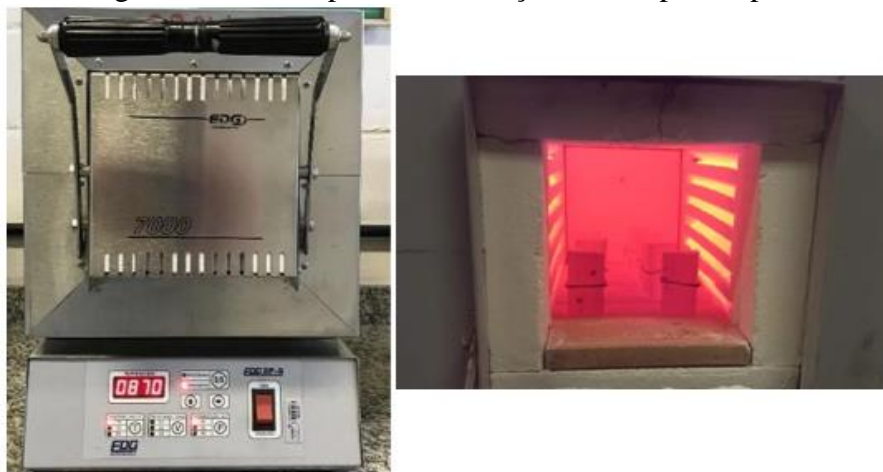


Fonte: Adaptado de Callister (2012).

O forno foi pré-aquecido à 720°C para depois inserir os cdp's e aquecê-los até 870°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min, e mantidos nesta temperatura por quarenta minutos. Após concluído o tempo na temperatura de austenitização, as amostras foram temperadas em água.

O aquecimento foi feito em um forno EDG modelo 3P-S, Figura 21.

Figura 21 – Forno par austenitização dos corpos de prova.



Fonte: Produção do próprio autor.

Após a têmpera, os corpos de prova foram então reaquecidos novamente até a temperatura de revenimento, definida em 400°C, mantidos nesta temperatura por quarenta minutos e então resfriados ao ar.

Em todos os procedimentos acima: recozimento, têmpera e revenimento, foram medidas as durezas Rockwell para verificar o sucesso do tratamento térmico e/ou se atender a norma ASTM.

### 3.2.2 Ensaaios de dureza

Após tratamento térmico de recozimento, de têmpera e de revenimento, quinze corpos de prova aleatórios foram selecionados para ser feito um mapeamento de dureza, sendo três recozidos, seis temperados e seis revenidos. Para atender à norma ASTM E18, foram usados apenas corpos de prova usinados lixados à seco. A medição foi realizada com método Rockwell usando um durômetro da marca WOLPERT, mostrado na Figura 22.

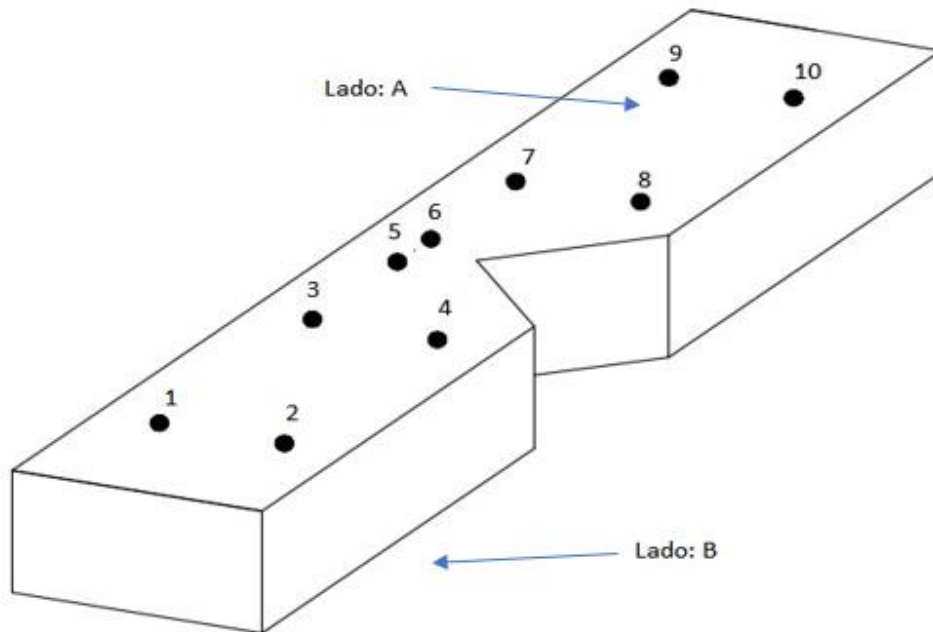
Figura 22 - Durômetro WOLPERT.



Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 23 mapeia os pontos de medição de dureza, sendo que os pontos visíveis são referentes ao lado A do cdp e se repetem para o lado B (não visível).

Figura 23 - Pontos de medição de dureza



Fonte: Produção do próprio autor.

### 3.2.3 Ensaio de impacto Charpy-V

Os ensaios de impacto Charpy-V foram realizados em corpos de provas confeccionados atendendo as especificações da norma ASTM E 370 e API 5CT, ilustrado pela Figura 24, e corpos de provas de geometria e raio de fundo do entalhe alternativo. Realizados em uma máquina da marca MOHR & FEDERHAFF AG, modelo 61, tipo PSW 30/15, conforme ilustrado pela Figura 26.

Figura 24 - corpo-de-prova confeccionado.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 25 - Máquina de ensaio de impacto Charpy-V.



Fonte: Produção do próprio autor.

Os ensaios de impacto Charpy-V foram realizados em cinco temperaturas: 26,6 (temperatura ambiente), zero, -17, -46 e -68°C, sendo analisados ao menos três corpos de prova em cada temperatura.

Os materiais utilizados para ensaio: Caixa térmica (isolante térmico); Gelo para zero; Gelo + Sal + Álcool Etílico Absoluto para -17 °C; Gelo Seco + Álcool Etílico -46 °C e Gelo Seco para -68 °C.

Os corpos de prova foram inseridos nos meios e mantidos por pelo menos vinte minutos para homogeneização da temperatura em toda a amostra. Posteriormente a caixa térmica foi posicionada ao lado da máquina de ensaio para reduzir ao máximo o tempo de posicionamento da amostra e a ativação do pêndulo.

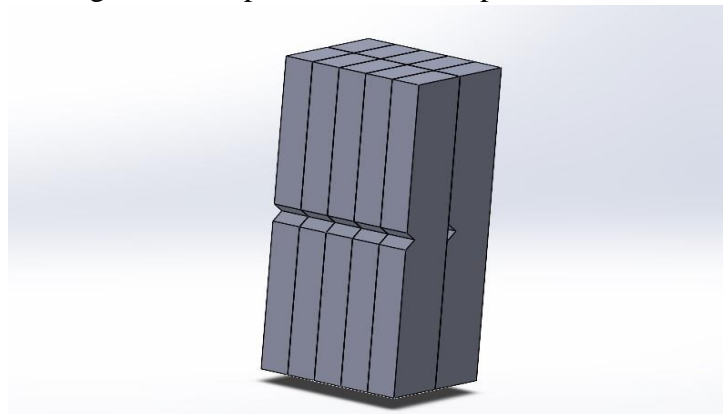
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 ENSAIO DE DUREZA

Para a medição da dureza foram escolhidos seis corpos de provas aleatórios de um lote de 80, retirada a carepa e lixados manualmente a seco. As médias dos valores da dureza dos corpos de provas recozido, temperado e revenido a 400°C estão apresentados na Tabela 7. Os pontos das medições estão representados na Figura 23.

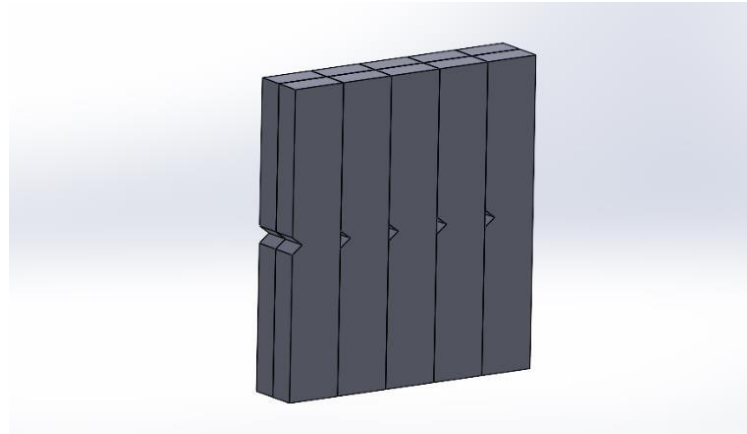
Foram feitas duas têmperas: a primeira realizada em lotes de cdps alinhados com sua superfície menor, Figura 26, obtendo resultados de dureza que variavam muito entre as amostras; em uma segunda tentativa, foram feitos lotes alinhados com sua área de superfície maior, Figura 27, onde os resultados obtidos foram mais homogêneos e adequados para continuar os ensaios. O primeiro tratamento térmico obtivemos 6,7 de desvio padrão e 28HRC de média de dureza, resultados muito dispersos e média abaixo do esperado tanto referente CARVALHO, Figura 10, quanto em comparação à segunda forma de agrupamento, resultados a serem discutidos. Isso é devido à diferença de gradientes de temperatura entre os dois agrupamentos em que no primeiro foi maior o que leva condições de temperas diferente em determinadas regiões dos cdps causando essa dispersão.

Figura 26 - cdps alinhados com a superfície menor.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 27 - cdps alinha com a superfície maior



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 7 - Dados do ensaio de dureza

Pontos	Dureza (HRC) (Temperado)		Dureza (HRC) (Revenido)	
	Lado A	Lado B	Lado A	Lado B
1	38	39	23	24
2	33	34	23	23
3	40	38	24	20
4	33	41	24	23
5	34	28	23	22
6	28	30	23	22
7	30	30	22	24
8	27	32	23	24
9	32	31	24	24
10	28	29	23	21
Média	32,16		22,83	
Desvio Padrão	4,33		2,03	
Coef. Variação	0,135		0,088	

Fonte: Produção do próprio autor.

Através de uma análise dos resultados obtidos, mostrado na Tabela 7, foi possível observar um desvio padrão de 2,03 HRC na dureza do corpo de prova revenido, um indicador de uma efetiva homogeneização do material no processo de revenimento à 400°C.

Também é possível observar uma redução moderada do valor da dureza, que saiu da média 32 para 23 HRC, conforme o esperado. O objetivo é aliviar as tensões para melhorar a tenacidade dos corpos de provas, sabendo-se que a dureza reduz em função do tempo e da temperatura do revenimento.



## 4.2 ENSAIO DE IMPACTO CHARPY V

Os ensaios foram divididos em duas partes para um maior controle dos resultados, possibilitando melhorar a análise de todas as variações geométrica dos corpos de provas. Na primeira parte foram testados os corpos de provas abaulados e usinados com o entalhe normatizado; e na segunda parte foram ensaiados os corpos de provas abaulados e usinados com raio de fundo agudo.

No ensaio de impacto foram analisadas 5 temperaturas diferentes com 3 cdps em cada temperatura: ambiente (medido no Departamento de Materiais no momento do ensaio), 0°C (mistura de gelo e água), próximo de -17°C (solução de gelo, sal e álcool etílico), -46°C (mistura de gelo seco e álcool etílico) e -68 °C (resfriado à gelo seco). As sequências descritas foram seguidas nas duas etapas.

De acordo com a norma API, os resultados do ensaio Charpy realizados com corpo de prova *sub-sized* têm que ser corrigido por um fator de redução de 0,55 para cdp  $\frac{1}{2}$  size e 0,67 para cdp  $\frac{1}{2}$  (calculado para cdp abaulado), apresentado na Tabela 5.

Os dados já corrigidos dos ensaios estão apresentados nas Tabela 8 e Tabela 9.

Tabela 8 – Resultados do ensaio de impacto Charpy V em cdp usinado.

Raio do Entalhe	T [°C]	E (méd.) [J]	Desvio Padrão	Cv (E)
0,10	26,5	64,21	3,57	0,0556
	0	60,05	5,11	0,0852
	-18	41,02	9,35	0,228
	-46	18,73	2,68	0,1429
	-68	10,26	2,64	0,2572
0,25	26,5	74,02	0,89	0,012
	0	70,75	4,204	0,0594
	-18	45,48	4,087	0,0899
	-46	24,53	0,45	0,0182
	-68	16,05	2,82	0,1757

Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 9 – Análise estatística do ensaio de impacto Charpy V em cdp abaulado

Raio do Entalhe	T [°C]	E (méd.) [J]	Desvio Padrão	Cv (E)
0,10	26,5	64,42	2,93	0,0455
	0	51,25	2,071	0,0404
	-18	32,94	4,33	0,1315
	-46	19,4	0,366	0,0189
	-68	9,15	1,6	0,1744
0,25	26,5	71,01	0,732	0,0103
	0	67,84	0,69	0,0102
	-18	51,25	7,394	0,1443
	-46	26,36	2,93	0,1111
	-68	16,66	1,41	0,0844

Fonte: Produção do próprio autor.

Analisando os dados dos corpos de provas conforme especificação da norma API 5CT (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010), Tabela 8, o raio do entalhe normatizado (0,25mm) à temperatura zero graus Celsius, encontra-se o valor médio de 71 joules. Esse valor é 2,5 vezes maior do que a mínima exigido pela norma para o grau N80, de 27 J encontrado na Tabela 3. Indicando que o material apresentou excelente resposta à tempera e ao revenido à 400°C, validando o seu uso de acordo com a exigência da norma.

A Tabela 10 compara o cdp de geometria abaulada (retirado direto da parede do tubo) com o cdp usinado de acordo com o especificado pela norma ASRM E23. O objetivo é avaliar a influência da geometria e estabelecer uma correlação na variação da energia de impacto absorvida pelos corpos de prova.

Tabela 10 – Análise comparativa da influência da geometria (coeficiente de correção 0,55).

Raio do Entalhe	T [°C]	Emédia [J]				Var. [%]
		USINADO	D.P	ABAUADO	D.P	
0,10	25,6	64,21	3,57	78,48	3,57	22,22%
	0	60,14	5,11	62,43	2,52	3,96%
	-17	41,12	9,35	40,13	5,28	-2,17%
	-46	18,73	2,68	23,63	0,45	26,19%
	-68	10,26	2,64	11,147	1,94	8,70%
0,25	25,6	74,023	2,93	86,51	0,89	16,87%
	0	70,75	2,65	82,64	0,84	16,81%
	-17	45,48	6,38	62,43	9,012	37,25%
	-46	24,53	1,33	32,11	3,57	30,91%
	-68	16,052	2,64	20,29	1,71	26,39%
<b>Var. [%]</b> (Variação de energia relativo ao raio normatizado)	<b>Estatísticas</b>		<b>R 0,1[mm]</b>		<b>R 0,25[mm]</b>	
	<b>Média</b>		0,1178		0,2665	
	<b>Desvio Padrão</b>		10,79%		7,98%	
	<b>Coef. Variação</b>		91,60%		31,11%	

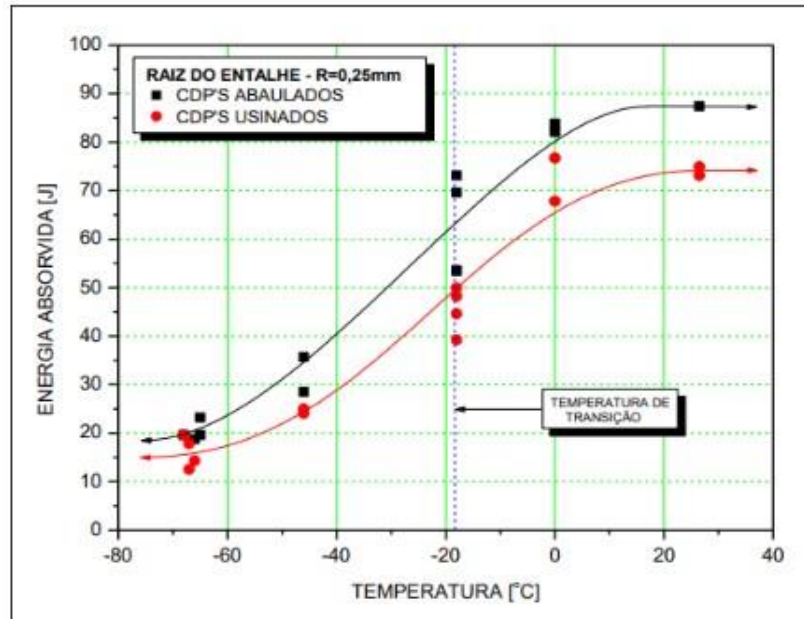
Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 11 – Análise comparativa da influência da geometria (coeficiente de correção 0,67 para abaulado).

Raio do Entalhe	T [°C]	Emédia [J]				Var. [%]
		USINADO	D.P	ABAUADO	D.P	
0,10	25,6	64,21	3,57	64,424	2,93	0,33%
	0	60,05	5,11	51,25	2,071	-14,66%
	-17	41,021	9,35	32,94	4,33	-19,70%
	-46	18,73	2,68	19,4	0,37	3,59%
	-68	10,26	2,64	9,15	1,6	-10,77%
0,25	25,6	74,02	2,93	71,013	0,73	-4,06%
	0	70,75	2,65	67,84	0,69	-4,11%
	-17	45,48	6,38	51,25	7,39	12,67%
	-46	24,53	1,33	26,36	2,93	7,46%
	-68	16,05	2,64	16,66	1,41	3,75%
<b>Var. [%]</b> (Variação de energia relativo ao corpo de geometria usinado)	<b>Estatísticas</b>		<b>R 0,1[mm]</b>		<b>R 0,25[mm]</b>	
	<b>Média</b>		-0,0824		0,0314	
	<b>Desvio Padrão</b>		8,86%		6,55%	
	<b>Coef. Variação</b>		-107,47%		208,44%	

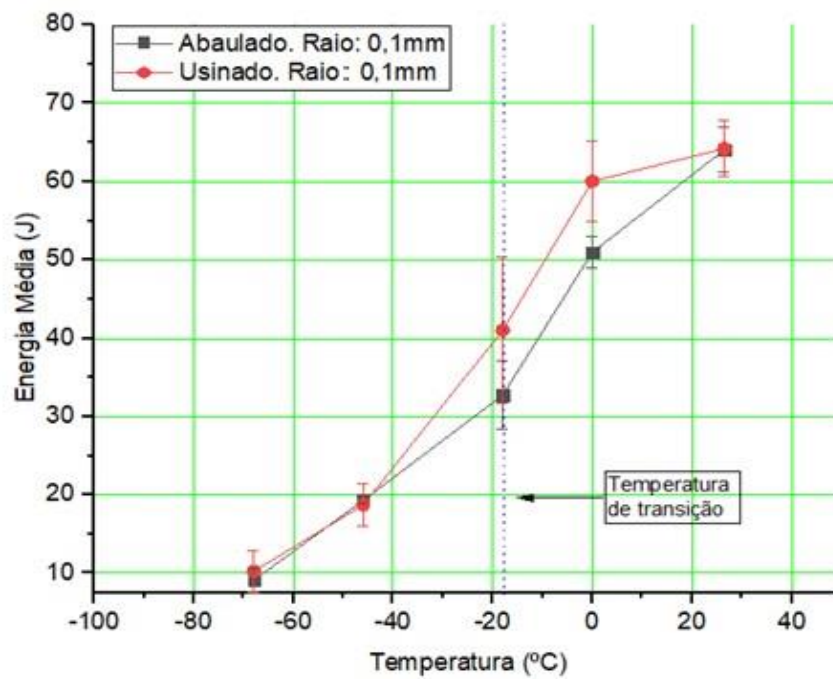
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 28 – Curvas comparando a geometria do cdp de raio 0,25mm (único gráfico não corrigida pelo novo fator de correção abaulado).



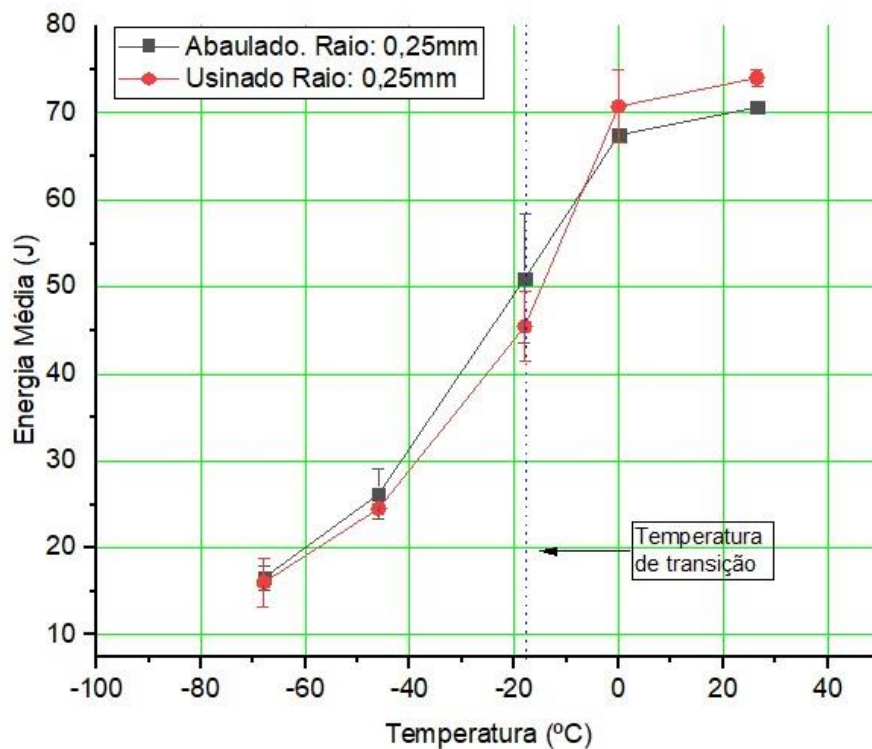
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 29 – Curvas comparando a geometria do cdp de raio 0,10mm.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 30 – Curvas comparando a geometria do cdp de raio 0,25mm.



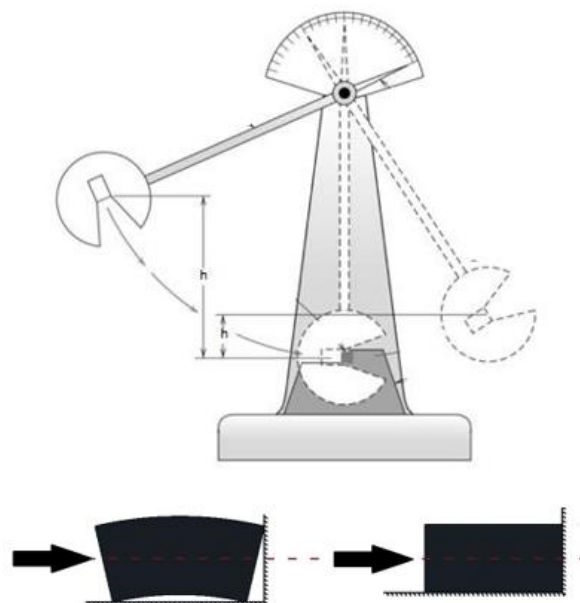
Fonte: Produção do próprio autor.

A área da região resistente ao impacto ( $A_r$ ) mostrou ser o principal fator de influência da diferença da energia absorvida entre os cdps usinados e abaulados, os cdps abaulados apresentaram uma  $A_r$  28,02 % maior do que o cdps usinados, conforme apresentado na Figura 28. Em média, conforme apresentado pelo Tabela 11, a variação entre a energia absorvida no cdp usinado e abaulado de raio de acordo com a norma foi de 26,65 %, mantido em toda a faixa de temperatura medida, como exibido no Figura 28. O fato de a variação da energia ter sido próxima à variação da  $A_r$  entre o cdp usinado e abaulado, indica a tendência à correlação empírica válida. Para comprovar está tendência, foi estimado através da interpolação da área entre corpos de prova inteiro e  $\frac{1}{2}$  (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2010) com a área do corpo de prova abaulado para estabelecer fator de correção mais adequado à nova geometria, Tabela 5 , os novos cálculos usando esse novo fator de correção mostrou resultados muito próximo dos valores coletados dos corpos de prova usinado, com coeficiente de variação de 3% para o cdps de entalhe normatizado, Tabela 2. A Figura 30 (corrigido pelo novo fator de correção) mostra as curvas entre cdps usinado e abaulado de entalhes normatizados quase sobrepostas com valores divergentes na região de transição (região instável, o que explica essa divergência). Podemos concluir que tendo em vista os resultados obtidos, a hipótese de que testes com a área resistente similar para os cdps abaulados e conforme a norma poderiam

resultar em resultados similares de energia absorvida, o que eliminaria a necessidade de utilizar fator de correção. Essas análises são indicativas relevante para estabelecer correlação qualitativa entre geometria usinada e abaulada, abrindo precedente para estudos quantitativos mais aprofundados para estabelecer coeficientes de correções usando outros fatores, além da área de resistência ao impacto, que não são alvos deste trabalho. A comparação entre geometria de corpos de prova de raio de entalhe mais crítico, Figura 29, não apresentou a mesma redução numérica, Tabela 11, proporcional à área resistente ao impacto como no entalhe normatizado, por ser cdps com dois parâmetros fora da norma (geometria e raio de entalhe), a combinação desses dois parâmetros pode ter afetado os resultados. Mas para uma análise unicamente qualitativa são válidos porque mantem a característica da curva mestra Charpy.

O efeito da geometria no ensaio, ilustrado na Figura 31, leva em conta a orientação de impacto com o encaixe do cdp na base da máquina, observando que a superfície de contato do corpo de prova usinado é maior tanto com a base da máquina quanto com o impacto do pêndulo, o que pode distribuir melhor a energia do impacto causando menor deformação plástica que no corpo de prova abaulado. Mas como o ensaio Charpy tem caráter mais qualitativo que quantitativo por ser um ensaio robusto, este fator não influencia tanto nos resultados obtidos e nem interfere no propósito deste trabalho.

Figura 31 – Orientação e região de impacto no cdp abaulado e usinado.



Fonte: Produção do próprio autor.

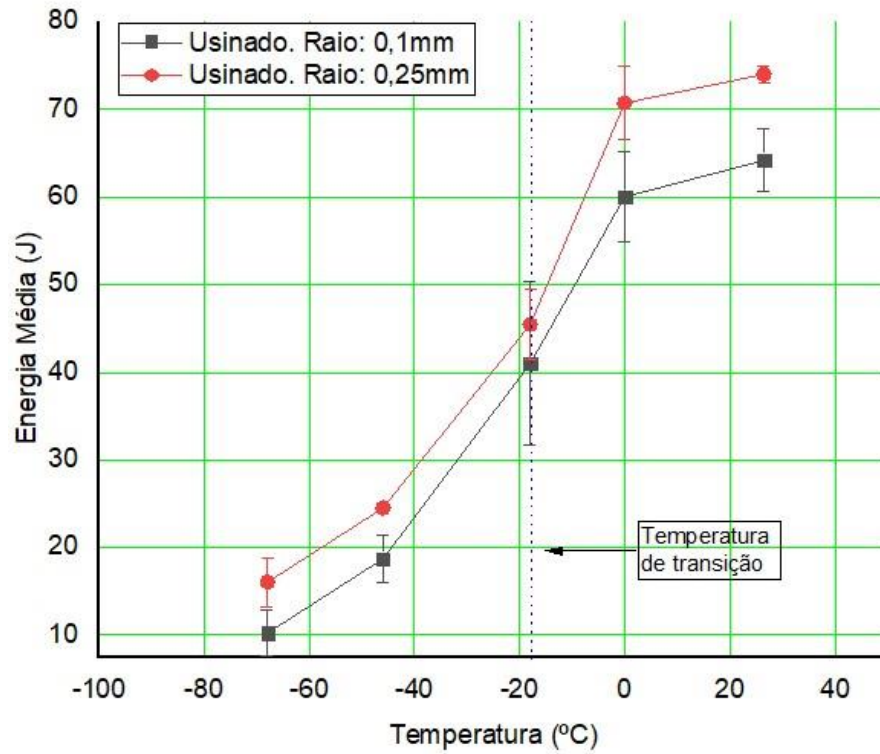
O tratamento térmico (tempera e revenimento à 400°C) estabeleceu uma temperatura de transição em torno -17°C. Chegou-se à essa conclusão pela análise do desvio padrão dos resultados, onde os valores de energia de impacto absorvido nessa temperatura se apresentaram dispersos. No regime de transição dúctil-frágil, a tenacidade à fratura de aços ferrítico exibe acentuada dispersão causando sérias dificuldades para a caracterização do material (ESPEZUA, 2010). A identificação e limitação da faixa de transição dúctil-frágil é importante à indústria petrolífera devido alta instabilidade dessa região e considerado crítico o seu conhecimento para confecção de tubos. Apesar da necessidade de mais ensaios em outras temperaturas próximas a -17°C para limitar mais a faixa de transição, para aplicação em território brasileiro, onde serão, geralmente, usados em temperaturas acima de zero graus Celsius a determinação de uma região de transição próxima à -17°C se mostra satisfatória e indica uma excelente resposta ao tratamento térmico, principalmente ao revenimento à 400°C.

Tabela 12 – Análise comparativa da influência do raio de fundo do entalhe na energia impacto.

Raio do Entalhe	T [°C]	Emédia [J]				Var. [%]
		USINADO	D.P	ABAUADO	D.P	
0,10	25,6	74,02	0,892	64,21	3,57	13,25%
	0	70,75	4,2	60,051	5,11	15,13%
	-17	45,48	4,087	41,024	9,35	9,80%
	-46	24,53	0,45	18,73	2,68	23,64%
	-68	16,05	2,82	10,26	2,64	36,11%
0,25	25,6	71,01	2,93	71,013	0,73	-4,06%
	0	67,84	2,65	67,84	0,69	-4,11%
	-17	51,25	6,38	51,25	7,39	12,67%
	-46	26,36	1,33	26,36	2,93	7,46%
	-68	16,66	2,64	16,66	1,41	3,75%
<b>Var. [%]</b> (Variação de energia relativo ao raio normatizado)	<b>Estatísticas</b>	ABAUADO		USINADO		
	<b>Média</b>	0,1959		0,2818		
	<b>Desvio Padrão</b>	9,44%		11,97%		
	<b>Coef. Variação</b>	48,18%		42,46%		

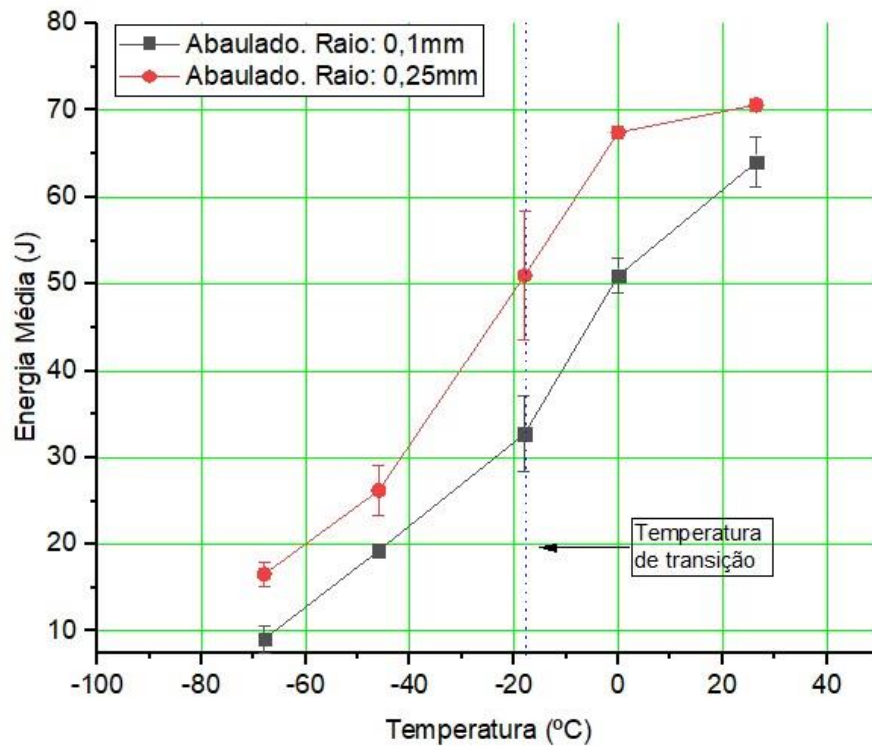
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 32 – Energia média absorvidas corpos de prova usinados.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 33 – Energia média absorvidas corpos de prova abaulados



Fonte: Produção do próprio autor.



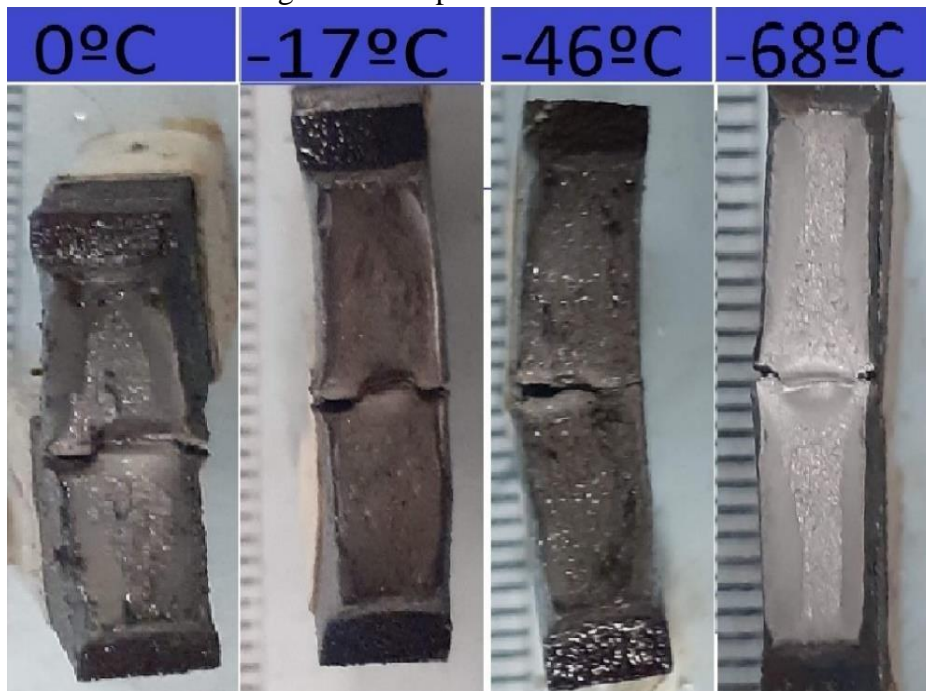
A Tabela 12 compara os resultados obtidos em relação à variação do raio de fundo e estabelece uma análise estatística. O objetivo é verificar se os resultados são influenciados pelo raio de fundo do entalhe. Os cdps tanto os usinados quanto os abaulados indicaram uma redução média na energia de impacto de 19,6 e 28% respectivamente, o que já era esperado, devido a maior criticidade do entalhe mais agudo, como mostrado nas curvas das Figura 32e Figura 33, onde a curva de energia absorvida pelo entalhe agudo foi ligeiramente deslocado para esquerda. Como as duas condições de geometria de ensaio indicaram que os resultados para raio 0,1 mm são mais conservadores e em favor da segurança do que os com raio 0,25 por mostrar uma temperatura maior de transição frágil-dúctil, esse fator indica forte possibilidade do entalhe de menor raio de fundo representar uma opção mais segura à norma API 5CT.

A temperatura de transição ficou em torno de  $-17^{\circ}\text{C}$  conforme caracterizado pelo maior desvio padrão mostrado pela a análise estatística e curva de energia. Resultado que reforça a análise já discutida no estudo comparando geometrias.

### 4.3 SUPERFÍCIES FRATURADAS

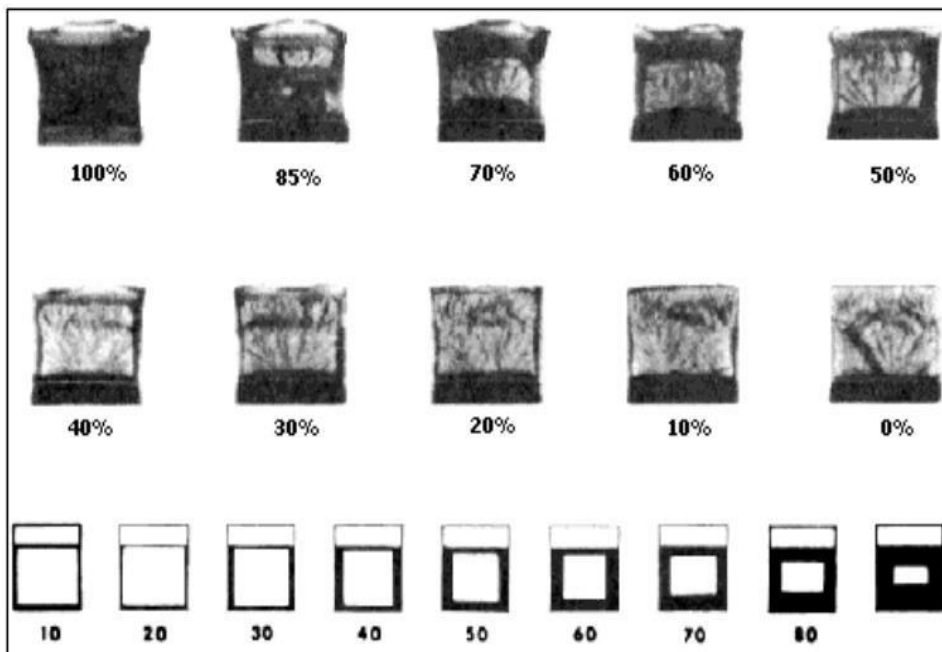
Na análise das superfícies fraturadas, Figura 34, a fratura à zero grau Celsius apresenta uma grande deformação plástica na raiz e nas abas da superfície, caracterizando uma fratura dúctil; já a fratura à  $-68^{\circ}\text{C}$  apresentou uma redução na deformação plástica na raiz e nas abas, o que é característico de uma fratura frágil conforme a comparação com a carta padrão da norma ASTM, Figura 35. As imagens em sequências exibem a transição das fraturas de dúctil para frágil, para uma análise à olho nu, pode-se determina que a faixa de transição está entre  $-17$  e  $-46^{\circ}\text{C}$ , devido as imagens das respectivas temperaturas se diferenciarem muito dentro da característica dúctil-frágil exposta pela carta padrão, reforçando a conclusão já tirada da análise dos dados.

Figura 34 - Superfícies fraturadas.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 35 – Carta padrão para determinação % da área dúctil estabelecida pela norma ASTM.



Fonte: Pandolfi (2006).

## 5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, o objetivo de avaliar a resistência ao impacto em tubos API 5CT grau N80 tipo Q revenido à 400°C em diferentes geometrias e entalhes foi cumprido. As seguintes conclusões são apresentadas:

- A rotina de tratamento térmico proposta: recozimento, têmpera em água e revenimento à 400°C, atendeu as especificações da norma API quanto à tenacidade ao impacto analisada à zero graus Celsius, elevando a sua resistência ao impacto em 44J acima do exigido pela norma. A temperatura de transição dúctil-frágil ficou em torno de -17°C, indicado pela dispersão dos dados nesta temperatura e pelas características da transição dúctil-frágil das fraturas apontado pela carta padrão ASTM, revelando excelente temperatura de transição.
- O ensaio em corpos de prova de geometria alternativo (abaulado) revelou que a área resistente ao impacto influencia nos resultados aumentando a sua resistência ao impacto, indicando a existência de proporcionalidade direta entre a Ar e a energia absorvida. Através da interpolação dos fatores de redução fornecido pela norma, Tabela 5, com a Ar foi possível calcular um novo fator de correção que corrigiu a influência da geometria. Esses fatores validam, de uma forma qualitativa, o uso de corpos de provas retirados direto da parede do tubo, sem usinagem, para ensaios. Uma alternativa mais rápida e econômica à norma API.
- O ensaio realizado em corpo de prova de entalhe alternativo teve uma redução da energia absorvida no impacto de 24% (média entre as duas geometrias) e manteve as características da curva Charpy do entalhe normatizado, evidências que sustentam a possibilidade do uso de entalhes de raio de fundo 0,10mm para obter resultados mais conservadores que a norma.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA PETROBRAS. **Petrobras conclui acordo extração no pré-sal**. 2018. Disponível em: [http://www.agenciapetrobras.com.br/Materia/ExibirMateria?p&p\\_editoria](http://www.agenciapetrobras.com.br/Materia/ExibirMateria?p&p_editoria). Acesso em: 4 jul. 2020.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API 5CT. Specification for casing and tubing united states of america**. 2010. Disponível em: <https://www.united-steel.com/productshow/drill-pipe.html?gclid=CjwKCAjw-e2EBhAhEiwAJI5jg4TY8VKkLutl5jptiGK8cwfCzxSJrJFE>. Acesso em: 19 out. 2020.

APOLO TUBULARS. **Tubo de aço liga ASTM**. 2015. Disponível em: <https://apolotubulars.com.br/tecnologia-de-ponta-e-producao>. Acesso em: 17 abr. 2020.

BHADESHIA, H. R. *et al.* **Steels microstructure and properties**. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. v. 2, p. 275.

BOAS VILAS, A. C. C. *et al.* **Comportamento mecânico e de corrosão do aço X70 sob carregamento cíclico**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1273M.PDF>. Acesso em: 20 ago.2020.

CALLISTER, W. D. *et al.* **Ciência e engenharia de materiais**. 3. ed. São Paulo: LTC, 2012. v. 2, p. 395.

CALOI, Giselle. **Análise da soldabilidade do aço API 5L X- 80**. 2008. Publicação Acadêmica - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=12414@1>. Acesso em: 8 ago. 2020.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. 2. ed. [S.l.]: Pearson, 2006. v. 3,. Cap. 14, p. 310. Disponível em: [https://www.senairs.org.br/sites/default/files/documents/tipos\\_de\\_revenimento.pdf](https://www.senairs.org.br/sites/default/files/documents/tipos_de_revenimento.pdf). Acesso em: 20 jun. 2020.

COLPAERT, Hubert; COSTA E SILVA, Andre. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns: metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. v. 2, p. 405.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Brasil e a situação energética**. 2018. Disponível em: <https://descomplica.com.br/blog/materiais-de-estudo/geografia/resumo-brasil-e-a-situacao-energetica>. Acesso em: 25 fev. 2020.

ESPEZUA, S. V. P. *et al.* **Avaliação da tenacidade à fratura na região de transição dúctil-frágil dos aços API 5L X70 e 80**. 2010. Dissertação (Mestrado em Propriedade dos Materiais) - Faculdade de Engenharia, UNESP, Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2010. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/105347/espezua\\_svp\\_dr\\_guara.pdf?sequence=1](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/105347/espezua_svp_dr_guara.pdf?sequence=1). Acesso em: 20 ago. 2020.

FGV PROJETOS. **O mercado, oferta, refino e preço.** 2012. Disponível em: <http://fgvprojetos.fgv.br/publicacao/o-mercado-do-petroleo-oferta-refino-e-preco>. Acesso em: 23 jul. 2020.

FGV PROJETOS. **O mercado do petróleo: oferta, refino e preço.** 2018. Disponível em: <https://fgvprojetos.fgv.br/publicacao/o-mercado-do-petroleo-oferta-refino-e-preco>. Acesso em: 25 jul. 2020.

FREITAS, J. J. D. *et al.* **Validação de uma metodologia de ensaio de resistência ao cisalhamento para avaliação da aderência de interfaces revestimento metálico.** 2007 Dissertação (Mestrado em Resistência dos Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN, Natal. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/15732>. Acesso em: 23 jul. 2020.

GOUVEIA, Bárbara; RODRIGUES, Jorge. **Tecnologia mecânica: exercícios resolvidos.** 3. ed. Moçambique: Escolar Editora, 2011. v. 3, p. 340.

GOVERNO FEDERAL. **FMM financia em apoio a estrutura offshore.** 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/noticias/ultimas-noticias/fmm-financia-mais-uma-embarcao-de-apoio-a-estrutura-offshore>. Acesso em: 28 jun. 2020.

GROOVER, Mikell. **Introdução aos processos de fabricação.** 3. ed. São Paulo: LTC, 2014. v. 3, p. 496.

MELO, L. C. R. *et al.* **Desenvolvimento de tubo ARBL contendo 1Cr 0,2Mo fabricado pelo processo ERW/HF destinado à indústria de petróleo e gás.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Projetos e Materiais) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP, Guaratinguetá 2013. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/94462>. Acesso em: 12 out. 2020.

OLIVEIRA, B. F. D. *et al.* **Efeito do tratamento termico sobres as microestrutura e as propriedades do aço.** 2014. Dissertação (Mestrado em microestruturas) - Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro, UENF, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Disserta%C3%A7%C3%A3o1.pdf>. Acesso em: 30 maio 2020. Acesso em: 20 jun. 2020.

PANDOLFI, Alexandre. **Avaliação do efeito da rugosidade na tenacidade ao impacto em aço carbono.** 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica) - Centro Tecnológico do Espírito Santo, UFES, Vitória, 2006. Disponível em: [https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2006-1\\_alexandro\\_sanqueta\\_pandolfi.pdf](https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2006-1_alexandro_sanqueta_pandolfi.pdf). Acesso em: 20 jun. 2020.

PETROBRAS. **Pré-sal:** Petrobras. 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: 12 jun. 2020.

TEIXEIRA, Rafael. **Avaliação da tenacidade charpy-v de um tubo de aço API 5CT N80Q temperado e revenido a 600°C.** 2019. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP, Guaratinguetá, 2018.

Disponível em: <https://www.unesp.com/sobre/495661428/rafael-jose-paulo-teixeira>. Acesso em: 22 jun. 2020.

RUDOLF, Steiner. **Asm handbook: properties and selection: irons, steels, and high performance alloys**. 2. ed. Materials Park: Asm Intl, 1990. v. 2, p. 422.

SILVA, A. L. V. D. C. *et al.* **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Blucher, 2010. v. 2, p. 375.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE. **Classificação dos aços**. 2018. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/908/1/012042/meta>. Acesso em: 28 ago. 2020.

STEEL PIPE MANUFACTURING. **Análise da resistência à fadiga de tubos de aço API 5CT N80 tipo Q soldados via processo de indução magnética de alta frequência (HFIW): API 5CT Casing Pipe**. 2016. Disponível em: [https://www.hengjiapipes.com/product/api-5ct-casingpipe/?gclid=CjwKCAjw/e2EBhAhEiwAJI5jg1J8nt2d1DeLlIoJykbTX5qL56pUHHqoIzTvKsH5lFXT9-DRtagif1hoCLzYQAvD\\_BwE](https://www.hengjiapipes.com/product/api-5ct-casingpipe/?gclid=CjwKCAjw/e2EBhAhEiwAJI5jg1J8nt2d1DeLlIoJykbTX5qL56pUHHqoIzTvKsH5lFXT9-DRtagif1hoCLzYQAvD_BwE). Acesso em: 8 jul. 2020.

TRANSPETRO. **Extração e prospecção de petróleo**. 2012. Disponível em: <http://transpetro.com.br/transpetro-institucional/noticias/congresso-mundial-do-petroleo-debate-desenvolvimento-sustentavel.htm>. Acesso em: 10 abr. 2020.