



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO  
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA/CMC

GEAN GONÇALVES DE ARAÚJO

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO ASTM A182 F22 SUBMETIDO A  
TRATAMENTO TÉRMICO**

CARAÚBAS

2025

GEAN GONÇALVES DE ARAÚJO

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO ASTM A182 F22 SUBMETIDO A  
TRATAMENTO TÉRMICO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientadora: Adiana Nascimento Silva,  
Profa. Dra.

CARAÚBAS

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

A658c Araújo, Gean Gonçalves de.  
Comportamento mecânico do aço ASTM A182 F22  
submetido a tratamento térmico / Gean Gonçalves de  
Araújo. - 2025.  
49 f. : il.

Orientador: Adiana Nascimento Silva.  
Monografia (graduação) - Universidade Federal  
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e  
Tecnologia, 2025.

1. ASTM A182 F22. 2. TTAT. 3. Tenacidade. 4.  
Direção de corte. 5. Dureza. I. Silva, Adiana  
Nascimento, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade  
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Caraúbas  
Bibliotecária: Sarah Freire Bezerra  
CRB: 15/1052

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

GEAN GONÇALVES DE ARAÚJO

**COMPORTAMENTO MECÂNICO DO AÇO ASTM A182 F22 SUBMETIDO A  
TRATAMENTO TÉRMICO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientadora: Adiana Nascimento Silva,  
Prof. Dra.

Defendida em: 20 / 03 / 2025.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Adiana Nascimento Silva, Profa. Dra. (UFERSA)  
Presidente

---

Ana Claudia de Melo Caldas Batista, Profa. Dra. (UFERSA)  
Membro Examinador

---

Wendell Albano, Prof. Dr. (UFERSA)  
Membro Examinador

*À minha mãe Francinete, cujo amor incondicional  
foi a luz que guiou meus passos nos momentos  
mais difíceis. Seu apoio, sua força e fé em mim  
que me permitiram chegar até aqui.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela força, sabedoria e luz que guiaram meus passos durante toda essa jornada.

Agradeço a mim mesmo, por nunca desistir, mesmo nos momentos mais desafiadores. Por acreditar que cada esforço valeria a pena e por persistir até chegar aqui, mesmo achando diversas vezes que não conseguiria.

À minha orientadora, Professora Dra. Adiana Nascimento Silva, meu profundo agradecimento pela paciência, dedicação e orientação valiosa. Seus ensinamentos e apoio foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, pelo apoio em todos os momentos, por sempre acreditarem no meu potencial e investirem em mim. Vocês são minha base e inspiração. Este trabalho é de vocês também.

À minha namorada, Bruna Louise, por todo o carinho, compreensão e incentivo. Você esteve ao meu lado nos momentos de dúvida e comemoração, e sou imensamente grato por isso.

Ao grupo de pesquisa, em especial a Pablo, Josilândia e Fernanda, pela colaboração, troca de conhecimentos e o companheirismo durante todo o processo. Vocês foram essenciais durante toda a realização deste trabalho.

A Samir, técnico dos laboratórios da mecânica na UFERSA Caraúbas, pelo suporte técnico fundamental e disponibilidade para ajudar sempre que precisei. Seu trabalho foi vital para o desenvolvimento desta pesquisa.

Gostaria de agradecer aos membros da banca examinadora, professora Dra. Ana Claudia e Wendell Albano pela disponibilidade, tempo dedicado e pelas valiosas contribuições que enriqueceram este trabalho. Seus *insights* e orientações foram fundamentais para o aprimoramento desta pesquisa e para o meu crescimento acadêmico.

A todos os professores e funcionários da instituição que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Seus ensinamentos foram essenciais.

Aos meus irmãos, José Lucas e Grazielle Gonçalves, por sempre depositarem fé em mim e torcerem pelo meu sucesso. Vocês são parte relevante da minha história, contem comigo.

A todos os meus amigos e amigas que estiveram ao meu lado nos momentos de descontração e de dificuldades. Vocês tornaram essa jornada mais leve e especial.

Um agradecimento especial ao pessoal da Equipe Caraubaja SAE e a todos os meus contemporâneos da Engrenagem Júnior. Vocês contribuíram muito com o meu desenvolvimento acadêmico e profissional.

Por fim, agradeço a todos aqueles que acreditaram em mim, torceram e me deram apoio, de forma direta ou indireta. Este trabalho é o resultado de um esforço coletivo, e sou imensamente grato a cada um que fez parte dessa trajetória.

“O homem não é nada além daquilo que a  
educação faz dele”

Immanuel Kant

## RESUMO

O aço ASTM A182 F22 é amplamente utilizado em componentes críticos da indústria de petróleo e gás em ambientes *Offshore* devido à sua alta resistência mecânica e tenacidade. No entanto, a presença de tensões residuais geradas durante processos de fabricação, como soldagem e usinagem, pode comprometer sua integridade estrutural, levando a falhas prematuras em serviço. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) nas propriedades mecânicas do aço ASTM A182 F22, visando otimizar seu desempenho em aplicações industriais, principalmente aquelas que empregam a soldagem no processo construtivo. O comportamento mecânico foi avaliado por meio do ensaio de impacto Charpy, para o aço com TTAT nas temperaturas de 650 °C, 677 °C e 704 °C, com um tempo de patamar de 6 horas e resfriamento ao ar ambiente. Após o tratamento térmico, os CPs foram confeccionados com refrigeração por fluido abundante, para não haver aquecimento. Posteriormente ao ensaio de impacto, analisou-se a fractografia. Levantou-se ainda o comportamento de dureza do aço com TTAT. Os resultados demonstraram que o TTAT promoveu uma redução significativa das tensões residuais, com aumento da tenacidade ao impacto em todas as temperaturas testadas. Para a seção transversal, o maior ganho observado foi a 704 °C, em que se obteve uma energia média de 61,67 J correspondendo a um aumento de 85,03% com relação ao material submetido ao TTAT a 650 °C e 71,31% com relação ao material submetido a 677 °C. Já para a direção longitudinal, o maior ganho foi observado a 677 °C, em que a energia média encontrada foi de 176 J correspondendo a um aumento de 21,38% com relação ao material submetido a 650 °C. Tanto os valores de tenacidade quanto a análise fractográfica indicaram que os corpos de prova com os entalhes na direção longitudinal são mais dúcteis que os com entalhe na direção transversal, que apresentaram fraturas frágeis. Os ensaios de dureza mostraram valores de dureza menores para os corpos de prova tratados a 704 °C, indicando um aumento de ductilidade, corroborando com os resultados dos ensaios de impacto. Conclui-se que os parâmetros de TTAT promoveram uma melhoria das propriedades mecânicas do aço ASTM A182 F22, mostrando-se viável para aplicações que exigem alta resistência e tenacidade em ambientes agressivos.

**Palavras-chave:** ASTM A182 F22; TTAT; Tenacidade; Direção de corte; Dureza.

## ABSTRACT

ASTM A182 F22 steel is extensively used in critical offshore oil and gas components due to its high mechanical strength and toughness. However, residual stresses induced during manufacturing processes, such as welding and machining, can compromise its structural integrity, leading to premature service failures. This study aimed to evaluate the effect of stress relief heat treatment (SRHT) on the mechanical properties of ASTM A182 F22 steel to optimize its performance in industrial applications, particularly those involving welding. Mechanical behavior was assessed via Charpy impact testing on steel subjected to SRHT at 650 °C, 677 °C, and 704 °C, with a 6-hour holding time and air cooling. Specimens were prepared using abundant fluid cooling to avoid thermal interference during machining. Post-impact testing, fractographic analysis was conducted, and hardness behavior was evaluated. Results revealed that SRHT significantly reduced residual stresses while enhancing impact toughness at all temperatures. For the transverse direction, the highest improvement occurred at 704 °C, yielding an average energy absorption of 61.67 J—an 85.03% increase compared to the 650 °C treatment and 71.31% higher than the 677 °C treatment. In the longitudinal direction, the maximum gain (176 J) was observed at 677 °C, corresponding to a 21.38% increase over the 650 °C treatment. Toughness values and fractographic analysis indicated that longitudinal notched specimens exhibited greater ductility than transverse ones, which displayed brittle fracture features. Hardness tests showed lower values for specimens treated at 704 °C, confirming enhanced ductility and aligning with impact test results. These findings demonstrate that SRHT parameters improve the mechanical properties of ASTM A182 F22 steel, making it viable for applications requiring high strength and toughness in aggressive environments.

**Keywords:** ASTM A182 F22; SRHT; Toughness; cutting direction; Hardness.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - a) Microestrutura AÇO ASTM F22 corte Transversal (10x) e .....           | 18 |
| Figura 2 - Microestrutura de barras metálicas no estado recozido, Nital 10%. 90x... | 20 |
| Figura 3 - Diagrama de transformação do aço ASTM A182 F22.....                      | 23 |
| Figura 4 - (a) Corpo de prova com entalhe em “V” (b) Corpo de prova posicionado.    | 24 |
| Figura 5 - Fluxograma das etapas de experimentos laboratoriais.....                 | 26 |
| Figura 6 - Primeiro corte transversal. ....                                         | 27 |
| Figura 7 - Peça resultante após o primeiro corte.....                               | 28 |
| Figura 8 - Cortes longitudinais após primeiro corte. ....                           | 28 |
| Figura 9 - Tarugo do ASTM A182 F22. ....                                            | 29 |
| Figura 10 - Forno Mufla.....                                                        | 30 |
| Figura 11 - Fluxograma do resultado de peças tratadas por TTAT .....                | 30 |
| Figura 12 - Esquema do ciclo térmico do TTAT. ....                                  | 31 |
| Figura 13 - (a) Serra de Fita e (b) Fresadora universal. ....                       | 32 |
| Figura 14 - Dimensões de um corpo de prova Charpy.....                              | 33 |
| Figura 15 - Fresa de ângulo duplo simétrico – 45° DIN 847.....                      | 34 |
| Figura 16 - Fresa de ângulo operando na direção concordante de rotação.....         | 34 |
| Figura 17 - Máquina de Impacto Charpy. ....                                         | 35 |
| Figura 18 - Durômetro Rockwell Mitutoyo HR-300.....                                 | 36 |
| Figura 19 - CP com as oito indentações. ....                                        | 37 |
| Figura 20 - Esquema de espaçamento mínimo de recuo.....                             | 37 |
| Figura 21 – Tenacidade ao impacto para Seção Transversal. ....                      | 38 |
| Figura 22 – Tenacidade ao impacto para seção Longitudinal. ....                     | 39 |
| Figura 23 - Tenacidade ao impacto média. ....                                       | 39 |
| Figura 24 - Fractografia dos corpos de prova transversais. ....                     | 42 |
| Figura 25 - Fractografia dos corpos de prova Longitudinais.....                     | 43 |
| Figura 26 - Dureza HRB e HBS para direção Transversal. ....                         | 44 |
| Figura 27 - Dureza HRB e HBS para direção Longitudinal. ....                        | 44 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Composição química nominal do aço ASTM A182 F22 (% em peso)..... | 27 |
| Tabela 2 - Controle de temperatura de aquecimento do TTAT.....              | 31 |
| Tabela 3 - Quantidade de corpos de prova a serem produzidos.....            | 32 |
| Tabela 4 - Valores de energia absorvida para a seção transversal.....       | 40 |
| Tabela 5 - Valores de energia absorvida para a seção Longitudinal.....      | 40 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

TTAT – Tratamento Térmico de Alívio de Tensões

CP – Corpo de Prova

CPT – Corpo de Prova Transversal

CPL – Corpo de prova Longitudinal

CV% - Coeficiente de Variação

HRB – Hardness Rockwell B

HBS - Hardness Brinell S

HSS – High Speed Steel

## SUMÁRIO

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                       | <b>15</b> |
| <b>1.1 Objetivo Geral.....</b>                                  | <b>16</b> |
| <b>1.2 Objetivos Específicos .....</b>                          | <b>16</b> |
| <b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>                              | <b>17</b> |
| <b>2.1 Aços ARBL.....</b>                                       | <b>17</b> |
| 2.1.1 Desafios e Aplicações no Setor Offshore .....             | 17        |
| 2.1.2 Definição e Características.....                          | 17        |
| <b>2.2 Aço ASTM A182 F22.....</b>                               | <b>18</b> |
| 2.2.1 Composição Química e Propriedades mecânicas .....         | 18        |
| 2.2.2 Microestrutura .....                                      | 18        |
| <b>2.3 Influência da direção de corte .....</b>                 | <b>19</b> |
| 2.3.1 Conceito de Microestrutura .....                          | 19        |
| 2.3.2 Direção do corte e orientação dos grãos.....              | 19        |
| <b>2.4 Tratamentos térmicos .....</b>                           | <b>20</b> |
| 2.4.1 Conceito de tratamentos térmicos.....                     | 20        |
| <b>2.5 TTAT (Tratamento Térmico de Alívio de Tensões) .....</b> | <b>21</b> |
| 2.5.1 Parâmetros do processo .....                              | 21        |
| 2.5.2 Efeitos no ASTM A182 F22 .....                            | 23        |
| <b>2.6 Tenacidade ao impacto e Ensaio Charpy .....</b>          | <b>23</b> |
| 2.6.1 Importância da tenacidade ao impacto.....                 | 23        |
| 2.6.2 Princípio do ensaio de impacto Charpy .....               | 24        |
| <b>3 MATERIAS E METÓDOS .....</b>                               | <b>26</b> |
| <b>3.1 Preparação dos materiais.....</b>                        | <b>27</b> |
| 3.1.1 Aço ASTM A182 F22.....                                    | 27        |
| <b>3.2 Tratamento Térmico de Alívio de Tensão - TTAT .....</b>  | <b>29</b> |
| <b>3.3 Confecção dos Corpos de prova .....</b>                  | <b>31</b> |
| 3.3.1 Usinagem .....                                            | 32        |
| <b>3.4 Ensaio de Impacto Charpy .....</b>                       | <b>35</b> |

|                                            |           |
|--------------------------------------------|-----------|
| <b>3.5 Fractografia.....</b>               | <b>36</b> |
| <b>3.6 Ensaio de Dureza Rockwell .....</b> | <b>36</b> |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>     | <b>38</b> |
| <b>4.1 Ensaio de Impacto Charpy .....</b>  | <b>38</b> |
| <b>4.2 Fractografia.....</b>               | <b>41</b> |
| <b>4.3 Dureza .....</b>                    | <b>43</b> |
| <b>5 CONCLUSÕES .....</b>                  | <b>45</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                    | <b>46</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da necessidade por materiais de alta resistência mecânica e térmica estimula o uso de aços ligados em áreas importantes da indústria, como na extração de petróleo e gás, em centrais de geração de energia e em equipamentos de grande responsabilidade estrutural (OLIVEIRA, 2013).

O aço ASTM A182 F22 é um dos materiais mais utilizados em conexões forjadas, válvulas e peças submetidas a condições extremas de temperatura e pressão, graças à sua notável resistência mecânica e estabilidade térmica (DANTAS et.al, 2016). Sua composição química, contendo ferro, cromo e molibdênio, contribui significativamente para sua resistência à corrosão e ao desgaste (ALMEIDA, 2018).

No entanto, a existência de tensões residuais, oriundas dos processos de fabricação e soldagem, pode prejudicar seu desempenho mecânico, tornando crucial a implementação de tratamentos térmicos específicos para a redução dessas tensões e aumento da tenacidade (PINHEIRO, 2014; GARCIA, 2018).

O Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT), é um método comumente empregado para diminuir as tensões internas acumuladas em metais, especialmente aquelas que passam por processos de soldagem e conformação mecânica. Este tratamento visa aquecer o material a temperaturas moderadas, seguido de um resfriamento controlado, favorecendo a redistribuição das tensões e melhorando a tenacidade do aço (BATISTA et al., 2021; ASM INTERNATIONAL, 2019).

No caso do aço ASTM A182 F22, o TTAT tem um papel fundamental na preservação da integridade estrutural, evitando a propensão de fissuras térmicas e assegurando maior confiabilidade operacional em condições severas (GARCIA, 2018). Logo, torna-se crucial entender os impactos desse tratamento no comportamento mecânico do material, com o intuito de se aprimorar a sua utilização na indústria. O comportamento mecânico de um material é definido por um conjunto de propriedades que definem como será a sua resposta a diferentes condições de carregamento, como resistência à tração, limite de escoamento, tenacidade ao impacto, ductilidade e dureza (CALLISTER, 2020).

No contexto da engenharia mecânica, essas propriedades são fundamentais para a seleção adequada de materiais. Estudos mostram que diferentes ciclos de tratamento térmico podem influenciar significativamente as propriedades no aço

ASTM A182 F22, alterando sua microestrutura e desempenho mecânico (DANTAS et.al, 2016; CARDENAS MANOSALVA, 2018).

Este estudo empregou o aço ASTM A182 F22 no estado forjado, como fornecido e sem tratamento térmico após a conformação mecânica, analisou a influência dos parâmetros do tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) na tenacidade ao impacto, considerando as direções de corte longitudinal e transversal. A escolha dessas direções de corte justifica-se pela necessidade de compreender como a orientação dos grãos e a anisotropia do material após forjamento afetam suas propriedades mecânicas, especialmente em aplicações críticas onde a resistência ao impacto é determinante.

Dado que o Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT), aplicado pós-soldagem, é fundamental para reduzir as tensões residuais e elevar a tenacidade ao impacto, este estudo tem como objetivo avaliar as alterações nas propriedades mecânicas do aço ASTM A182 F22 submetido ao TTAT. Além de investigar a influência do tratamento na microestrutura e no desempenho mecânico, a pesquisa busca estabelecer correlações entre parâmetros do TTAT e a resistência do material, visando propor otimizações para sua utilização em condições *offshore*.

### **1.1 Objetivo Geral**

Levantar a tenacidade ao impacto e a dureza do aço ASTM A182 F22 na condição forjado e com tratamento térmico de alívio de tensão.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- I. Submeter o aço ASTM A182 F22 a Tratamentos Térmicos de Alívio de Tensão (TTATs) à 650 °C, 677 °C e 704 °C;
- II. Confeccionar corpos de prova de impacto do aço ASTM A182 F22 com entalhe nas direções longitudinal e transversal;
- III. Realizar os ensaios de impacto para os corpos de prova com TTAT;
- IV. Levantar os mecanismos de falhas dos corpos de prova de impacto.
- V. Fazer ensaio de dureza ao longo da seção onde está o entalhe do CP.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Aços ARBL**

#### **2.1.1 Desafios e Aplicações no Setor Offshore**

A exploração de petróleo offshore apresenta desafios severos para os materiais empregados, como corrosão, desgaste cíclico e condições extremas de temperatura e pressão. A água salgada intensifica os processos de corrosão, enquanto as forças dinâmicas podem resultar na fadiga do material (IANNUZZI, 2017). Além disso, ainda estão suscetíveis a impactos mecânicos e variações térmicas que podem causar deformações nas tubulações subaquáticas, assim como as cargas cíclicas que podem resultar em trincas (ZONGCHEN LI et al., 2020; MOURA FILHO, 2014).

Outro desafio é a necessidade de manutenção e verificação regular dos componentes em ambientes offshore. Desse modo, materiais que ofereçam o máximo de eficiência e segurança, são escolhidos para diminuir os custos operacionais e melhorar a segurança nas operações (ALMEIDA, 2014).

#### **2.1.2 Definição e Características**

Os aços ARBL, Aços de Alta Resistência e Baixa Liga, são ligas metálicas que oferecem elevada resistência mecânica, boa soldabilidade e resistência à corrosão. Sua composição química inclui elementos como vanádio, níquel e molibdênio, que fornecem características ideais para o uso em condições adversas, como na indústria petrolífera e de gás (CALLISTER, 2020).

A inclusão desses elementos de liga minimiza a incompatibilidade entre aumento de resistência mecânica e tenacidade dos aços carbono, garantindo altas resistências com tenacidade e boa soldabilidade (ALMEIDA, 2014). A presença de cromo proporciona resistência à corrosão, enquanto o molibdênio eleva a resistência ao desgaste e à deformação. (MISHRA, 2017; SCANDIAN et al, 2009).

Essas propriedades tornam os aços ARBL materiais essenciais para a produção de componentes críticos, como tubulações submarinas e equipamentos de perfuração, que funcionam em condições severas (DAVIS, 2004).

## 2.2 Aço ASTM A182 F22

O aço ASTM A182 F22 é um material com elevada resistência mecânica e ótimo desempenho em condições extremas. Ele é amplamente utilizado em componentes da indústria de petróleo e gás (GARCIA, 2018).

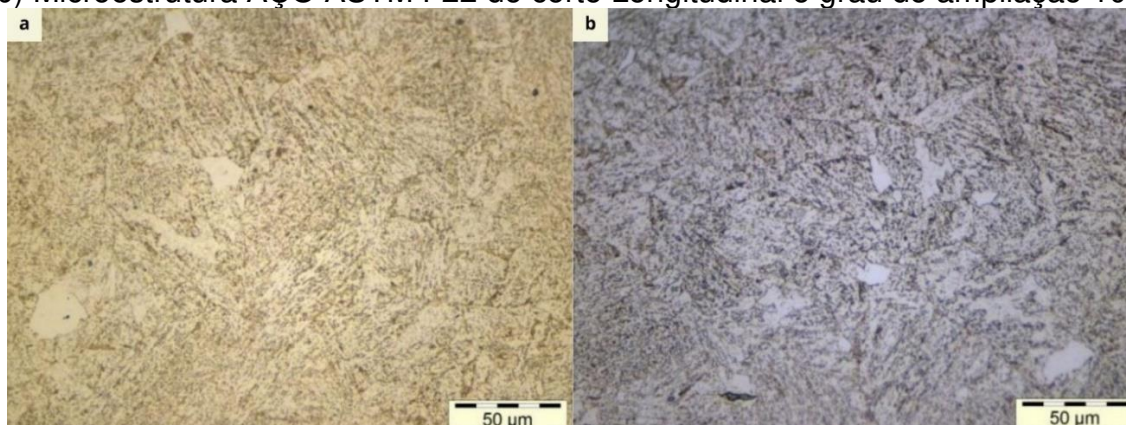
### 2.2.1 Composição Química e Propriedades mecânicas

Sua composição química, que inclui aproximadamente 2,25% de cromo e 1% de molibdênio, oferece excelente resistência à corrosão e à oxidação em altas temperaturas devido a presença de carbonetos estáveis no contorno dos grãos (OLIVEIRA, 2013). O cromo forma uma camada protetora de óxido na superfície do material, que previne a corrosão e a oxidação em ambientes agressivos. Já o molibdênio, aumenta a resistência ao desgaste e à deformação, garantindo que o material mantenha suas propriedades mecânicas mesmo sob altas cargas (MISHRA, 2017; OLIVEIRA, 2013; SCANDIAN et al., 2009).

### 2.2.2 Microestrutura

Em relação a microestrutura do aço ASTM A182 F22, ela é composta principalmente por ferrita e perlita, com a possível formação de bainita e martensita dependendo dos tratamentos térmicos aplicados. (Fallahmohammadi, 2014; Escrivà-Cerdán, 2019). De acordo com Almeida (2018), que analisou e apresentou a microestrutura da Figura 1, as fases da microestrutura para o metal na condição de forjado, consiste predominantemente de martensita revenida, podendo-se observar também grãos alongados de ferrita em sua microestrutura

Figura 1 - a) Microestrutura AÇO ASTM F22 corte Transversal (10x) e b) Microestrutura AÇO ASTM F22 de corte Longitudinal e grau de ampliação 10x.



Fonte: Almeida (2018).

Essa microestrutura pode ser modificada por meio de tratamentos térmicos como o TTAT, para melhorar suas propriedades mecânicas (DAVIS, 2004).

## **2.3 Influência da direção de corte**

### **2.3.1 Conceito de Microestrutura**

A microestrutura de um material refere-se à forma como ele está organizado em escala microscópica, incluindo a sua distribuição e orientação dos grãos. Essa estrutura tem um impacto direto nas propriedades mecânicas do material, como resistência, ductilidade e tenacidade (CALLISTER, 2020).

Ela é influenciada por fatores como composição química, processo de fabricação adotado e tratamentos térmicos aplicados, que podem alterar a distribuição e orientação dos grãos, afetando diretamente as propriedades mecânicas como tração e tenacidade ao impacto (CALLISTER, 2020).

No caso dos aços, a microestrutura é composta por diferentes fases, como ferrita, perlita, bainita e martensita, cada uma com propriedades distintas. A martensita é uma fase dura e frágil, enquanto a ferrita é mais dúctil e tenaz (BHADESHIA, 2017). Por fim, a microestrutura também pode ser alterada através da direção do corte adotada na fabricação, modificando a orientação dos grãos e a distribuição das fases.

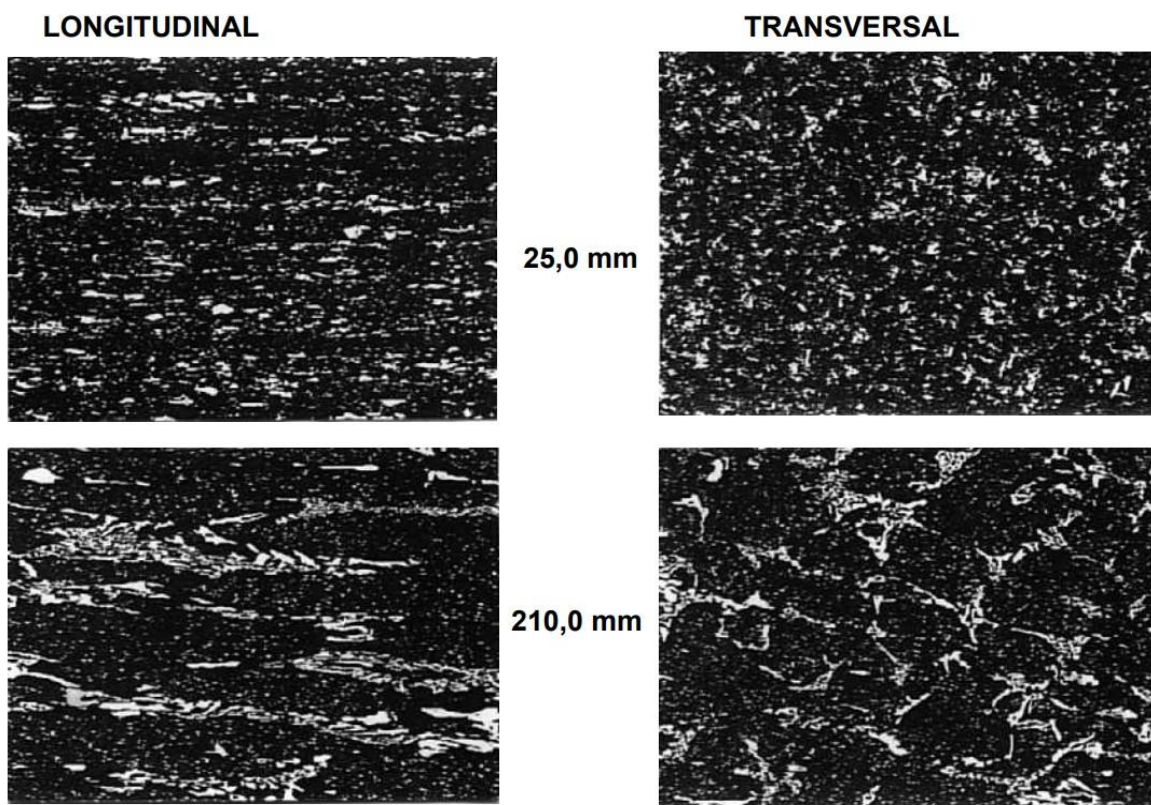
### **2.3.2 Direção do corte e orientação dos grãos**

Em cortes longitudinais, os grãos tendem a se alinhar na direção do corte, aumentando a resistência à tração. Por outro lado, em cortes transversais os grãos estão orientados perpendicularmente à direção do corte, podendo ser aumentado a resistência ao impacto (BHADESHIA, 2017).

Em comparação com a seção transversal, a tenacidade na direção longitudinal é mais elevada, por causa dos bandamentos de carbonetos que ocorre em conformações a quente, como forjamento e laminação (MENDANHA et.al, 2003).

Segundo Mendanha et.al (2003), constata-se que o tamanho dos carbonetos é sempre superior na direção longitudinal do que na transversal, em decorrência da anisotropia de deformação que promove o alinhamento dos carbonetos. Na Figura 2, podemos visualizar através da micrografia como fica a orientação dos grãos de acordo com a direção analisada.

Figura 2 - Microestrutura de barras metálicas no estado recozido, Nital 10%. 90x.



**Fonte:** Mendanha et.al (2003).

Em relação ao aço ASTM A182 F22, a direção do corte pode influenciar significativamente as propriedades mecânicas por mexer na distribuição das tensões residuais do material, afetando sua resistência à fadiga e à fratura. Cortes transversais tendem a resultar em maior concentração de tensões residuais, reduzindo a resistência à fadiga do material (LEAL *et al.*, 2019)

O corte ainda pode alterar a soldabilidade do material, em que cortes longitudinais tendem a resultar em maior soldabilidade, facilitando a fabricação e manutenção de componentes críticos (DIETER, 2016).

## 2.4 Tratamentos térmicos

### 2.4.1 Conceito de tratamentos térmicos

Os tratamentos térmicos são processos com o intuito de transformar a microestrutura dos materiais através de um aquecimento controlado com tempo de patamar para melhorar suas propriedades mecânicas (CALLISTER, 2020).

Entre os tratamentos mais comuns estão a têmpera, o revenimento e o tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) (ASM INTERNATIONAL, 2019). Esses

processos envolvem o aquecimento e resfriamento controlado do material, o que promove transformações microestruturais, como recristalização e transformação de fases. (ABREU, 2023; DANTAS *et al.*, 2016).

A têmpera, por exemplo, consiste no aquecimento do material a altas temperaturas, seguido de resfriamento rápido, para aumentar sua dureza. Esse processo promove a formação de martensita, uma fase dura e frágil que aumenta a resistência mecânica do material (CALLISTER, 2020, CHIAVERINI, 2003).

No entanto, a têmpera também pode aumentar a fragilidade do material, o que exige a aplicação de tratamentos adicionais, como o revenimento. Ele é um tratamento térmico que busca reduzir a fragilidade causada pela têmpera, melhorando a tenacidade do material. Esse processo envolve o aquecimento do material a temperaturas moderadas, seguido de resfriamento lento, o que promove a transformação da martensita em fases mais dúcteis, como a bainita e a ferrita (DANTAS *et.al*, 2016)

Outro tratamento térmico comum é o tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT), que visa reduzir as tensões residuais geradas durante a fabricação dos componentes metálicos. Seu processo se dá por meio do aquecimento do material a temperaturas controladas, seguido de resfriamento lento, o que promove a redistribuição das tensões internas e a formação de uma microestrutura mais homogênea (CHIAVERINI, 2003).

Os tratamentos térmicos podem melhorar significativamente as propriedades mecânicas do ASTM A182 F22. A têmpera pode aumentar sua dureza e a resistência mecânica, o revenimento pode melhorar sua tenacidade e ductilidade (DANTAS *et.al*, 2016). O TTAT pode reduzir as tensões residuais geradas durante o forjamento, promovendo uma microestrutura mais homogênea e estável. (GARCIA, 2018).

## **2.5 TTAT (Tratamento Térmico de Alívio de Tensões)**

### **2.5.1 Parâmetros do processo**

Os principais parâmetros do TTAT incluem temperatura, tempo de permanência e taxa de resfriamento. A temperatura de tratamento deve ser cuidadosamente controlada para garantir a eficácia do processo, geralmente variando entre 600°C e 700°C para o ASTM A182 F22 (ASM INTERNATIONAL, 2019). O tempo de

permanência também é um fator crítico, pois determina a extensão da redistribuição das tensões internas.

As temperaturas de patamar comumente utilizadas para o TTAT são altas, mas abaixo da temperatura de austenitização, para que não haja a formação de martensita durante o resfriamento (DODGE, 2014). Oliveira (2013) utilizou 650 °C, enquanto Almeida (2014) utilizou 677 °C. Já Nascimento (2014) tratou a 650 °C e 676 °C e Ferreira (2023) foi além aplicando o tratamento com 650 °C, 677 °C e 704 °C.

De acordo com (DODGE, 2014) ao fazer simulações dinâmicas, constatou-se que uma temperatura adicional acima de 700 °C não apresentaria sinais de reaustenitização e seria criado um cenário com possível mudança de fase, sendo interessante testar em trabalhos futuros.

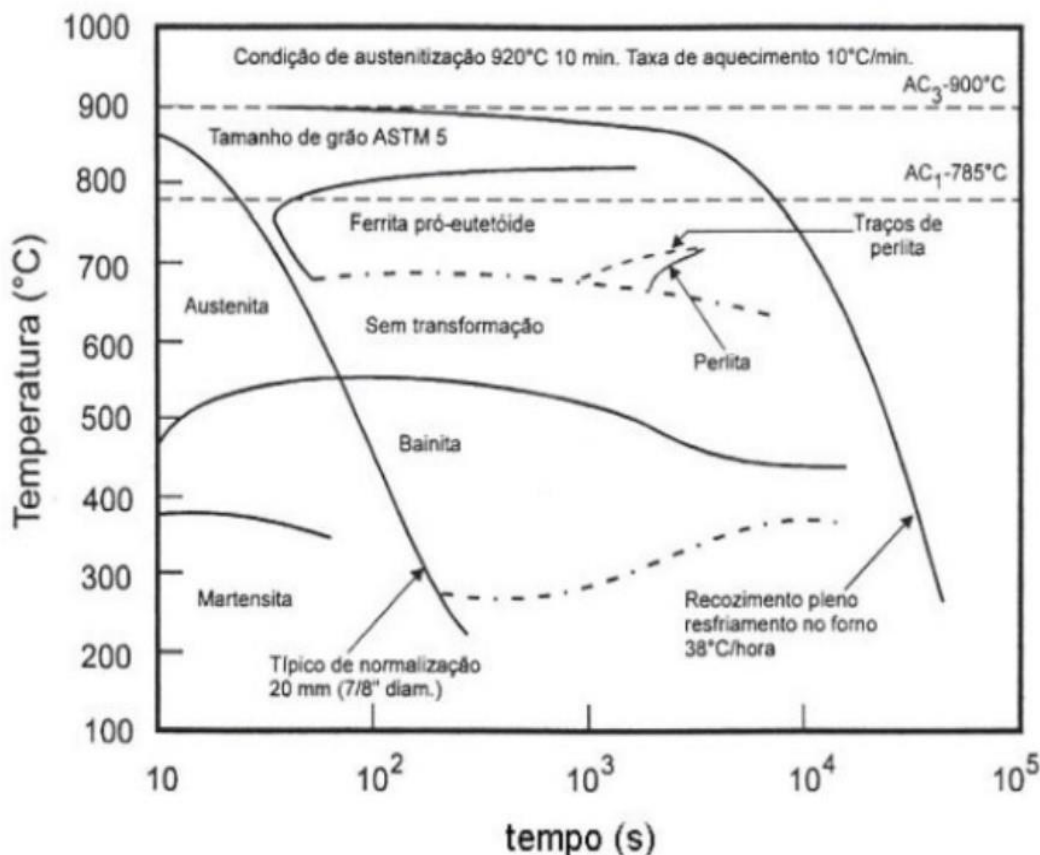
Após a escolha das temperaturas e tempo de patamar a ser adotado, o resfriamento é outro parâmetro importante, pois influencia a formação da microestrutura final. Um resfriamento lento é geralmente preferido por promover a formação de uma microestrutura mais homogênea e estável, alterando também a tenacidade e a ductilidade do material (CHIAVERINI, 2003) características essenciais para aplicações em ambientes agressivos.

A seleção correta dos parâmetros do TTAT é primordial para garantir o resultado esperado. O controle da temperatura é essencial, tendo em vista que uma temperatura de tratamento muito baixa pode resultar em uma redução insuficiente das tensões residuais, enquanto uma temperatura muito alta pode levar à degradação das propriedades mecânicas (OLIVEIRA, 2013, DODGE, 2014).

Durante o resfriamento lento, ainda é possível haver a formação de martensita, porém são reduzidas em comparação a resfriamentos mais rápidos, sendo preferível evitar a presença de martensita, opta-se pelo resfriamento lento (DODGE, 2014).

Na Figura 3 tem-se um diagrama de transformação de fases que mostra a importância de se haver um resfriamento lento e como ele garante a transformação da austenita em perlita e bainita, que são predominantes nos aços ASTM A182 F22 na condição forjado (GARCIA, 2018).

Figura 3 - Diagrama de transformação do aço ASTM A182 F22.



Fonte: SOUZA (1996) Apud SIQUARA (2006) Apud GARCIA (2018).

### 2.5.2 Efeitos no ASTM A182 F22

Estudos têm demonstrado que o TTAT pode aumentar significativamente a energia absorvida durante ensaios de impacto, como o ensaio Charpy, indicando que o tratamento térmico é eficaz na melhoria das propriedades mecânicas do material (DAVIS, 2004; DANTAS *et al.*, 2016). Um aumento da tenacidade ao impacto devido o TTAT do ASTM A182 F22, garante maior confiabilidade do material em serviço.

## 2.6 Tenacidade ao impacto e Ensaio Charpy

### 2.6.1 Importância da tenacidade ao impacto

A tenacidade ao impacto é uma propriedade crítica para materiais utilizados em aplicações sujeitas a cargas dinâmicas e impactos mecânicos, como em plataformas de petróleo e equipamentos de perfuração (DANTAS *et al.*, 2016).

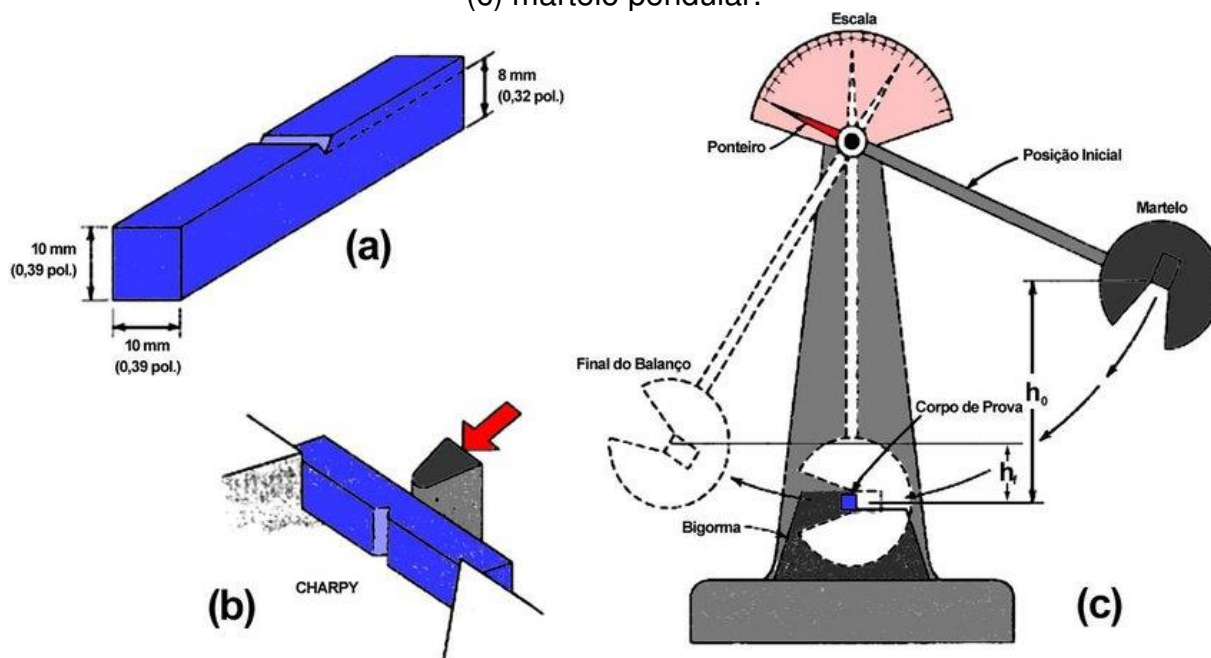
Uma forma de se avaliar essa propriedade é através do ensaio Charpy, pois ele fornece informações sobre a capacidade do material em absorver energia durante a fratura ocasionada pelo impacto (TANI e NAGUMO, 1995; GARCIA, 2012).

No caso do ASTM A182 F22, a tenacidade ao impacto é uma propriedade essencial, pois determina a capacidade do material de suportar cargas dinâmicas e impactos mecânicos em ambientes agressivos (GARCIA, 2012). O ensaio Charpy é uma ferramenta essencial para se analisar o desempenho do ASTM A182 F22 em aplicações como essas antes de ser levado para o exercício (TANI e NAGUMO, 1995).

### 2.6.2 Princípio do ensaio de impacto Charpy

O ensaio consiste em romper um corpo de prova padronizado e entalhado com um martelo pendular, registrando a energia necessária que ocasiona a fratura. A avaliação da tenacidade ocorre através dessa energia absorvida. Esse ensaio é amplamente utilizado para avaliar a resistência ao impacto de materiais metálicos. (GARCIA, 2012). A seguir, na Figura 4, pode-se visualizar melhor a máquina e CP do tipo charpy.

Figura 4 - (a) Corpo de prova com entalhe em “V” (b) Corpo de prova posicionado (c) martelo pendular.



**Fonte:** Morais et al (2020).

Para a execução deste ensaio, utiliza-se um corpo de prova (CP), representado Figura 4a, em forma de barra, com seção transversal quadrada (10×10 mm) e com um entalhe em “V”, “U” ou key-hole. Ela é posicionada do modo em que está representado na Figura 4b. A seta vermelha indica onde ocorrerá o impacto através do martelo do pêndulo. Por fim, na Figura 4c, está a imagem representativa da máquina de ensaio, apontando a trajetória do pêndulo e a escala que indicará a quantidade de energia absorvida. Há também a possibilidade de realizar ensaios sem entalhe, para materiais mais frágeis (Morais *et al.*, 2020).

Os resultados de ensaios Charpy em materiais submetidos ao TTAT têm demonstrado um aumento significativo na tenacidade ao impacto, indicando que o tratamento térmico é eficaz na melhoria das propriedades mecânicas do material (Morais *et al.*, 2020).

O TTAT pode aumentar a energia absorvida durante o ensaio Charpy, garantindo maior confiabilidade do material em serviço. Além disso, o tratamento também reduz o risco de fratura por fadiga, aumentando a vida útil do material (GARCIA, 2018).

As fraturas ocorrem quando um material sólido, que foi submetido a uma tensão sofre uma desagregação e divide-se em múltiplos fragmentos. Nesse contexto, a energia dissipada durante o processo serve como parâmetro de classificação da fratura em duas categorias distintas, como dúctil ou frágil (OLIVEIRA, 2019).

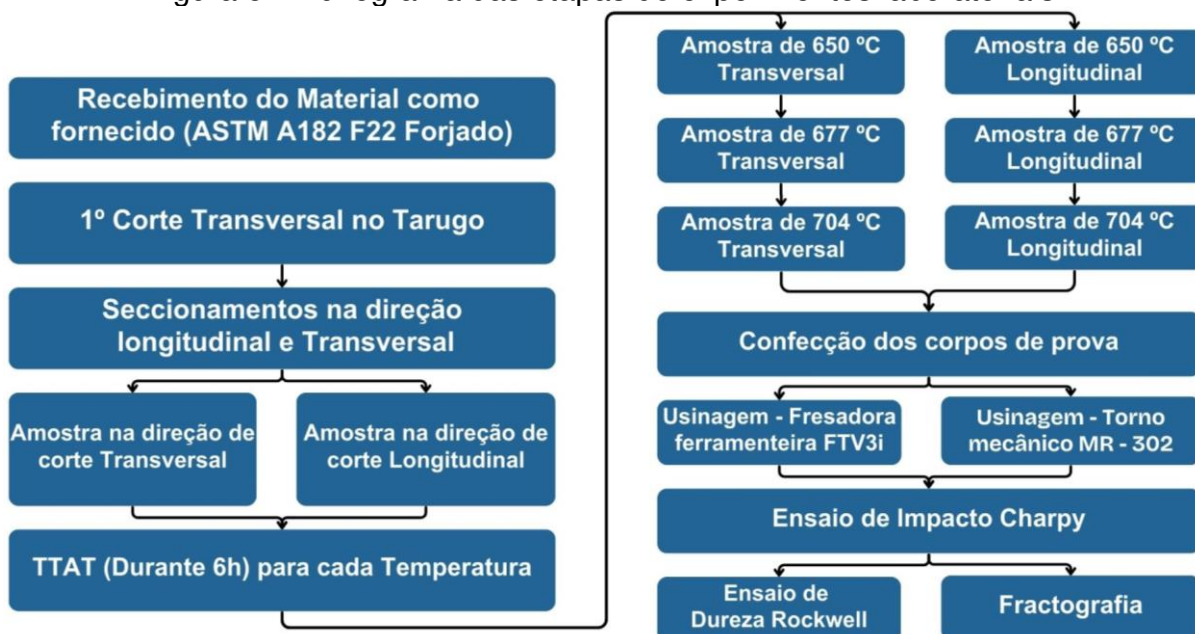
Através da fractografia, visualiza-se que as fraturas mais frágeis possuem características brilhantes e apresentam superfícies planas, enquanto as fraturas mais dúcteis possuem superfícies mais opacas e com distorção das extremidades posteriores a região do impacto. Mediante essa análise, é possível comparar com os valores de tenacidade ao impacto obtidos no ensaio de impacto (OLIVEIRA, 2017).

### 3 MATERIAS E METÓDOS

A metodologia adotada, bem como a organização e o detalhamento das atividades, está apresentada a seguir no fluxograma da Figura 5, que inclui as seguintes etapas:

- Preparação do Aço forjado ASTM A182 F22;
- Tratamento Térmico de Alívio de Tensões (TTAT);
- Confeção dos corpos de prova do tipo Charpy;
- Análise dos mecanismos de fratura associados ao ensaio de impacto Charpy;
- Ensaios de dureza para levantamento das propriedades mecânicas;

Figura 5 - Fluxograma das etapas de experimentos laboratoriais.



**Fonte:** Autoria própria (2025).

Os principais equipamentos utilizados nessa pesquisa foram:

- Serra de Fita Horizontal Clark SF 250;
- Forno Mufla;
- Fresadora Universal Eurostec FTV3i;
- Torno Mecânico Manrod MR - 302;
- Durômetro Rockwell Mitutoyo HR-300;
- Máquina de ensaio de impacto Charpy modelo JB-W300A;

### 3.1 Preparação dos materiais

#### 3.1.1 Aço ASTM A182 F22

A Tabela 1, apresenta as faixas típicas de composição química para o aço ASTM A182 F22, utilizado como material base dessa pesquisa.

Tabela 1 - Composição química nominal do aço ASTM A182 F22 (% em peso).

| <b>C</b>    | <b>Mn</b> | <b>P</b> | <b>S</b> | <b>Si</b> | <b>Cr</b>  | <b>Mo</b>   |
|-------------|-----------|----------|----------|-----------|------------|-------------|
| 0,05 - 0,15 | 0,30-0,60 | 0,04     | 0,04     | 0,5       | 2,00 - 250 | 0,87 - 1,13 |

**Fonte:** Norma ASTM A182 (2016).

Após o recebimento do material, foram realizados cortes para se ter um melhor aproveitamento da peça. Os cortes aconteceram inicialmente na direção transversal do tarugo, como pode ser visualizado na Figura 6, em que se obteve uma amostra.

Figura 6 - Primeiro corte transversal.



**Fonte:** Norma ASTM A182 (2016).

A partir desta amostra, apresentada na Figura 7, efetuou-se os seccionamentos de seis partes nas direções desejadas. Primeiro foram retiradas três amostras na direção transversal e em seguida mais três amostras na direção longitudinal.

Figura 7 - Peça resultante após o primeiro corte.



**Fonte:** Autoria Própria (2025).

Os cortes longitudinais foram realizados inicialmente a partir da primeira peça resultante após o primeiro corte do tarugo. Essa etapa pode ser melhor visualizada na Figura 8.

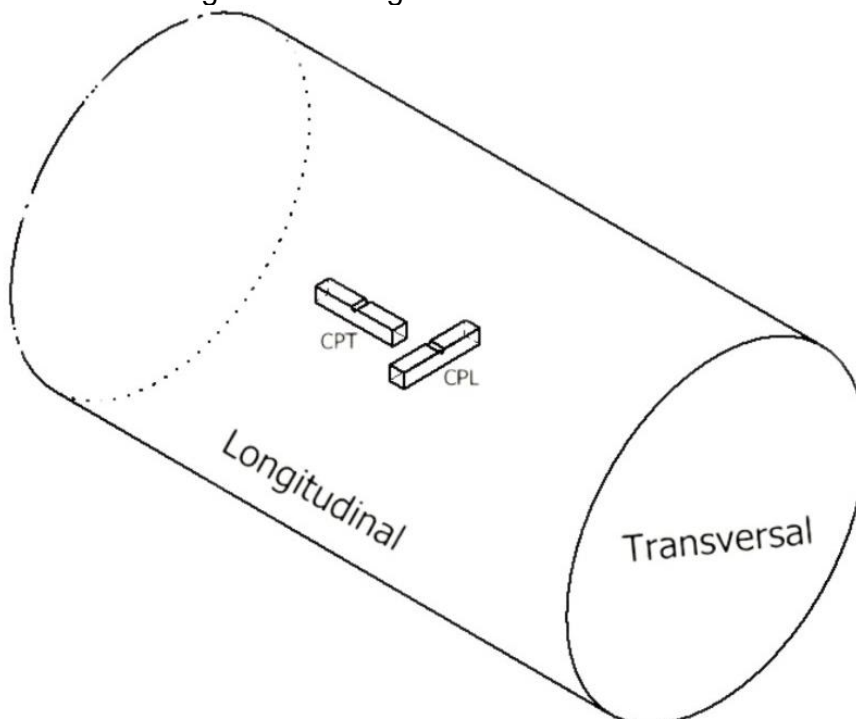
Figura 8 - Cortes longitudinais após primeiro corte.



**Fonte:** Autoria Própria (2025).

Já na Figura 9 podemos ter uma melhor visualização das direções de corte, como também é possível se visualizar que as direções longitudinal e transversal são referentes ao entalhe dos corpos de prova (CPs). Dito isso, os corpos de prova receberão as siglas CPTs e CPLs, conforme direções dos entalhes nas seções transversal e longitudinal, respectivamente.

Figura 9 - Tarugo do ASTM A182 F22.



Fonte: Autoria própria (2025).

### 3.2 Tratamento Térmico de Alívio de Tensão - TTAT

Após o seccionamento das seis amostras, estas foram encaminhadas para o laboratório de metalografia da UFERSA Campus Caraúbas, para serem tratadas termicamente em um forno do tipo Mufla, apresentado na Figura 10.

As amostras foram inseridas no forno em pares  $T_1$ ,  $T_2$  e  $T_3$  de amostras, em que  $T_1$  se refere a temperatura de tratamento a 650 °C,  $T_2$  a temperatura de 677 °C e  $T_3$  a temperatura de 704 °C.

Essas temperaturas foram definidas com base na literatura, em que trabalhos anteriores costumam utilizar temperaturas elevadas sem chegar na temperatura de transformação da austenita afim de se evitar a formação de martensita durante o resfriamento. Já o resfriamento foi lento ao ar com temperatura ambiente sem controle de taxa.

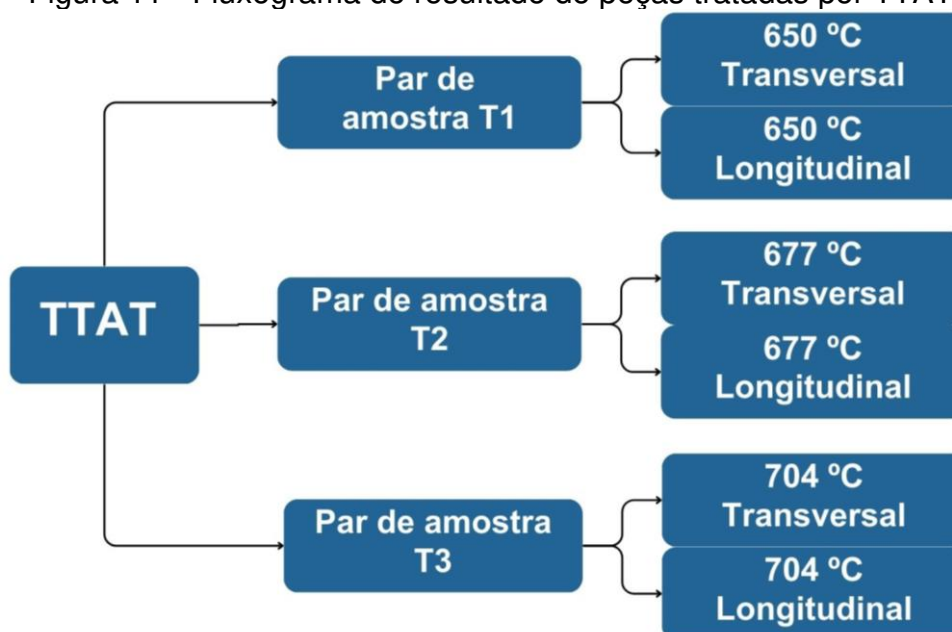
Figura 10 - Forno Mufla.



**Fonte:** Autoria própria (2025).

Na Figura 11 tem-se um fluxograma mostrando como foram organizados os pares de amostras antes de serem tratados.

Figura 11 - Fluxograma do resultado de peças tratadas por TTAT



**Fonte:** Autoria própria (2025).

Na Tabela 2, visualiza-se as temperaturas coletadas a cada 10 min de aquecimento do forno e termopar. A taxa de aquecimento não foi controlada, pois o equipamento não permitia tal aplicação.

Tabela 2 - Controle de temperatura de aquecimento do TTAT.

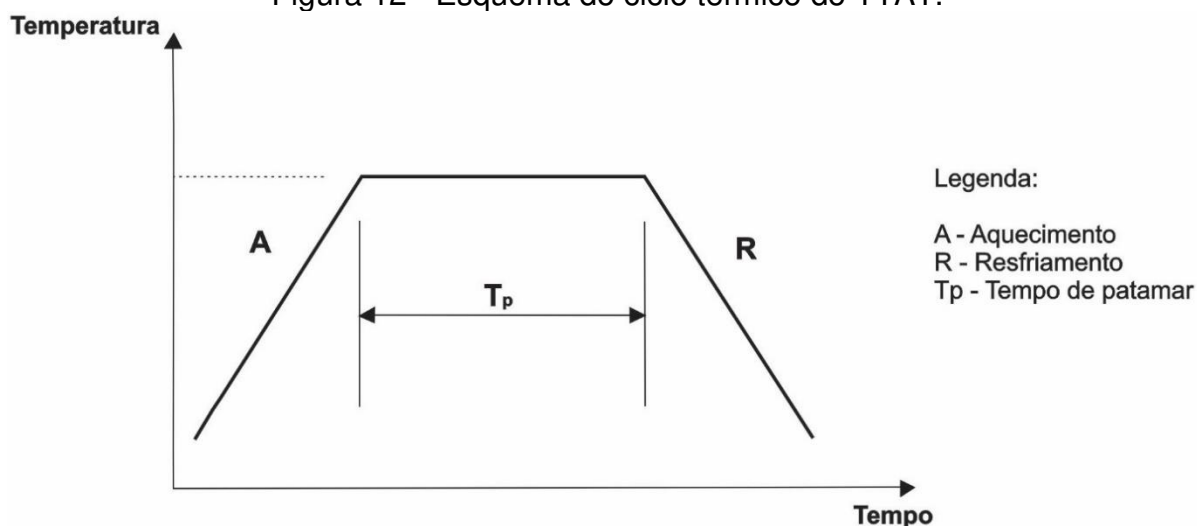
| TTAT DE 650 °C      |                        |                           | TTAT DE 677 °C      |                        |                           | TTAT DE 704 °C      |                        |                           |
|---------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|------------------------|---------------------------|---------------------|------------------------|---------------------------|
| coletas<br>(10 min) | Temp.<br>FORNO<br>(°C) | Temp.<br>TERMOPAR<br>(°C) | Coletas<br>(10 min) | Temp.<br>FORNO<br>(°C) | Temp.<br>TERMOPAR<br>(°C) | Coletas<br>(10 min) | Temp.<br>FORNO<br>(°C) | Temp.<br>TERMOPAR<br>(°C) |
| 1                   | 82                     | 68                        | 1                   | 54                     | 64                        | 1                   | 29                     | 27,5                      |
| 2                   | 287                    | 229                       | 2                   | 297                    | 268                       | 2                   | 267                    | 243                       |
| 3                   | 404                    | 337                       | 3                   | 435                    | 413                       | 3                   | 411                    | 382                       |
| 4                   | 494                    | 440                       | 4                   | 545                    | 538                       | 4                   | 519                    | 490                       |
| 5                   | 572                    | 535                       | 5                   | 642                    | 649                       | 5                   | 607                    | 580                       |
| 6                   | 642                    | 612                       | 6                   | 676                    | 694                       | 6                   | 692                    | 684                       |
| 7                   | 650                    | 649                       | 7                   |                        |                           | 7                   | 706                    | 703                       |
| <b>Média</b>        | 63,898                 | 58,571                    | <b>Média</b>        | 73,583                 | 72,944                    | <b>Média</b>        | 65,939                 | 63,459                    |
| <b>Desv.Pad</b>     | 207,260                | 211,937                   | <b>Desv.Pad</b>     | 235,364                | 240,606                   | <b>Desv.Pad</b>     | 246,585                | 245,971                   |

Fonte: Autoria própria (2025).

O tempo de patamar  $T_p$ , empregado em todos os tratamentos térmicos, foi de exatamente 6 horas. Já o resfriamento foi feito ao ar sem controle da taxa. Na Figura 12 tem-se o esquema representativo do ciclo térmico correspondente aos três TTATs realizados.

Esse esquema tem o intuito apenas de representar o ciclo de aquecimento, tempo de patamar e resfriamento, sem mencionar os valores empregados.

Figura 12 - Esquema do ciclo térmico do TTAT.



Fonte: Autoria própria (2025).

### 3.3 Confeção dos Corpos de prova

Após os tratamentos térmicos, encaminhou-se as peças para o laboratório de Usinagem da UFERSA Campus Caraúbas. Cada amostra tratada, possuía tamanho suficiente para ser confeccionado três corpos de provas do tipo Charpy.

Como considerou-se três pares de amostras, teve-se um total de dezoito corpos de prova. Na Tabela 3 evidencia-se isso.

Tabela 3 - Quantidade de corpos de prova a serem produzidos.

| Temperatura °C | Transversal | Longitudinal |
|----------------|-------------|--------------|
| 650            | 3           | 3            |
| 677            | 3           | 3            |
| 704            | 3           | 3            |
| Total          | 9           | 9            |

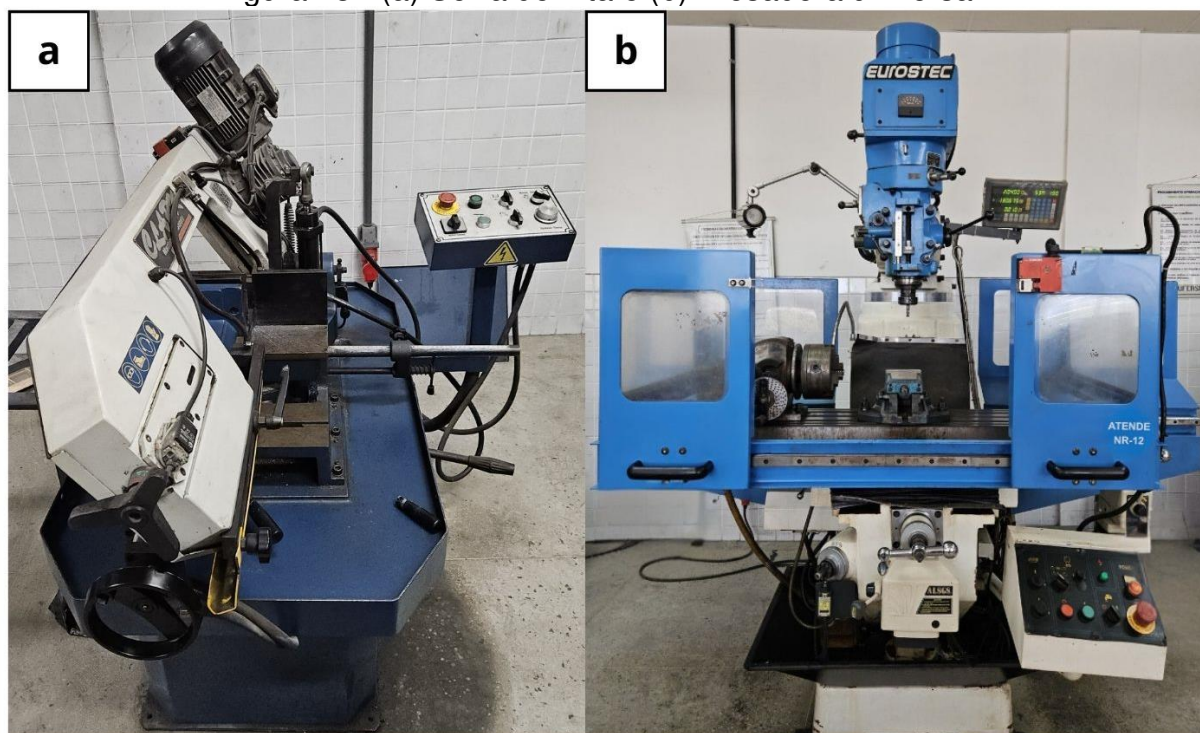
**Fonte:** Autoria própria (2025).

### 3.3.1 Usinagem

O processo de usinagem para a obtenção dos dezoito corpos de prova de impacto, citados anteriormente, iniciou com o processo de corte em Serra de Fita Horizontal Clark SF 250, esta pode ser visualizada na imagem da Figura 13 (a).

As dezoito peças resultantes tiveram as dimensões e esquadro da seção transversal ajustados, conforme especificação de dimensões de corpos de prova do tipo Charpy. Essas etapas de redução foram produzidas com o auxílio de uma Fresadora Universal Eurostec FTV3i, apresentada na Figura 13 (b).

Figura 13 - (a) Serra de Fita e (b) Fresadora universal.



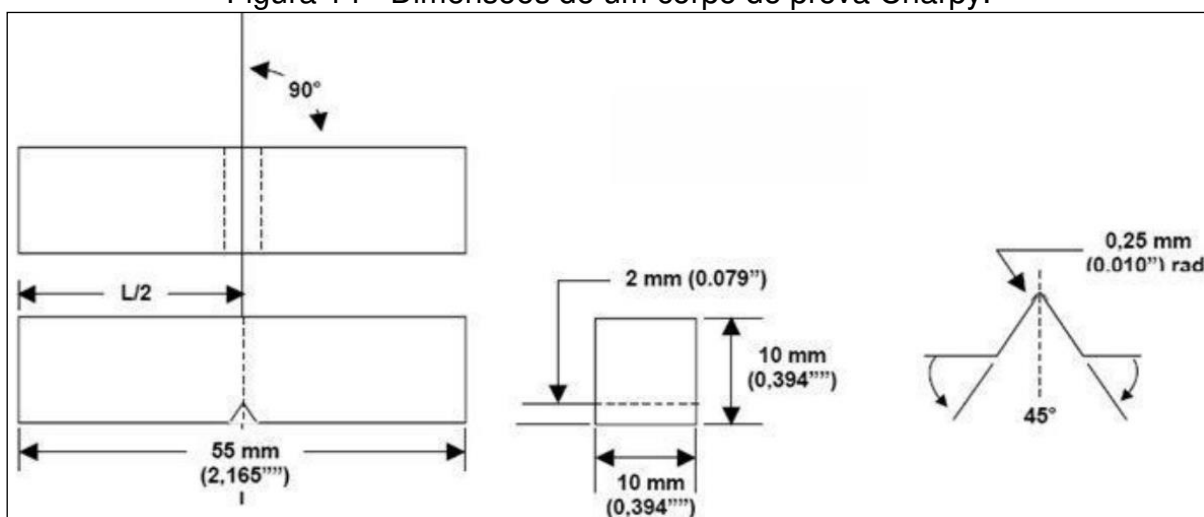
**Fonte:** Autoria própria (2025).

Durante o procedimento, utilizou-se uma fresa de topo de aço rápido (HSS) com diâmetro de 15 mm, uma velocidade de rotação com aproximadamente 530 rpm e o fresamento adotado foram de avanços concordantes e discordantes para o desbaste do material, com o intuito de se otimizar o tempo de operação. O último passe foi realizado com avanço concordante, por apresentar melhor acabamento.

Após o ajuste do esquadro e da espessura dos dezoito corpos de prova, nas dimensões preteridas, de acordo com a Figura 14, fez-se o faceamento, no torno mecânico, das extremidades para o ajuste do comprimento de 55 mm, para garantir que as superfícies estivessem planas e dentro da tolerância definida de 0,1 mm.

CPs faceados, ainda era necessário a produção dos entalhes em V, com 2 mm de profundidade e com um ângulo de 45°, como pode ser observado também na Figura 14.

Figura 14 - Dimensões de um corpo de prova Charpy.



**Fonte:** Adaptado da Norma ASTM E23(2007).

Os entalhes foram usinados na fresadora com o auxílio de uma fresa de ângulo duplo simétrico – 45° DIN 847, apresentada na Figura 15, juntamente com um corpo de prova sendo usinado. A operação adotada foi um fresamento concordante, representado na Figura 16, com velocidade de rotação de acordo com a dimensão da fresa utilizada.

Figura 15 - Fresa de ângulo duplo simétrico – 45° DIN 847.



**Fonte:** Autoria própria (2025).

Figura 16 - Fresa de ângulo operando na direção concordante de rotação.



**Fonte:** Autoria própria (2025).

### 3.4 Ensaio de Impacto Charpy

Para a realização desse ensaio, conduziu-se os CPs para o laboratório de ensaios da UFERSA Campus Mossoró. Para a execução, utilizou-se a máquina de ensaio de impacto Charpy modelo JB-W300A representado na Figura 17.

Figura 17 - Máquina de Impacto Charpy.



**Fonte:** Autoria própria (2025).

Para a realização do ensaio, a máquina foi setada com um peso de 300 Joules. Em seguida, o martelo foi suspenso e travado, para que o operador pudesse posicionar os CPs na bigorna com segurança. Após o posicionamento, o martelo é liberado para que seja efetuado o impacto.

Neste momento, a máquina registra a energia absorvida pelo CP e esse dado é coletado mediante sua leitura na escala analógica da máquina. O mesmo passo a passo foi seguido para todos os dezoito corpos de prova. Todos os ensaios foram realizados a temperatura ambiente de 25 °C.

Ainda durante a coleta dos dados, foi percebido uma incoerência nos valores obtidos para dois dos CPs da direção longitudinal, tratados a temperatura de 704 °C. Provavelmente os valores incoerentes são decorrentes de um erro durante a confecção, se fazendo necessário o descarte desses corpos de prova e comprometendo a análise dos resultados para os CPs da temperatura de 704 °C e direção longitudinal.

Devido ao tempo que seria necessário para usinagem e a realização do TTAT, novos CPs não foram confeccionados e consequentemente os ensaios não foram refeitos, sendo descartada a análise para essa temperatura na direção longitudinal.

### 3.5 Fractografia

Após a realização do ensaio de impacto Charpy realizou-se a análise fractográfica da seção onde ocorreu a fratura. Para essa análise, as imagens foram produzidas com o uso de um aparelho celular *smartphone*. Essa região é analisada com o intuito de se verificar as características da fratura e entender melhor o tipo de fratura que ocorreu.

### 3.6 Ensaio de Dureza Rockwell

O ensaio de dureza ocorreu após o ensaio de Impacto Charpy, Para a realização do ensaio de dureza Rockwell, os CPs foram preparados utilizando-se lixas d'água com as granulometrias de 80, 180, 220, 320, 400, 600, 800 e 1200, respectivamente. Encerrada a metalografia, os CPs ficaram prontos para o ensaio de dureza. Ele foi realizado no laboratório de Metalografia da UFERSA Campus Caraúbas com o auxílio do Durômetro Rockwell Mitutoyo HR-300, representado na Figura 18.

Figura 18 - Durômetro Rockwell Mitutoyo HR-300.



Fonte: Autoria própria (2025).

Inicialmente, foram definidas as escalas de dureza HRB e HBS como objeto de estudo. Após a calibragem do durômetro, de acordo com a norma ASTM E18, foi

ajustada uma carga de 100 kgf e empregado um penetrador esférico de aço com diâmetro de 1/16", conforme definições da escala HRB.

Ao todo foram realizadas oito indentações e elas seguiram o padrão estabelecido pela norma ASTM E18, em que as três primeiras são descartados. Dessa forma, a cada resultado obtido com a penetração na escala HRB, utilizava-se o sistema de conversão do próprio durômetro para se obter o resultado de dureza Brinell S (HBS). Na Figura 19 pode-se ver como foram realizadas as indentações no CP.

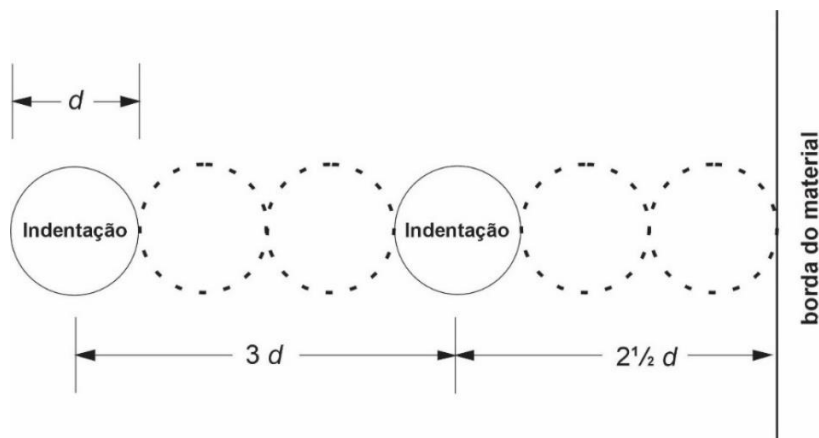
Figura 19 - CP com as oito indentações.



**Fonte:** Autoria própria (2025).

A distância entre os centros de duas indentações adjacentes deve ser de pelo menos três vezes o diâmetro  $d$  da indentação. Já a distância do centro de qualquer indentação até uma das bordas da peça de teste, deve ser de pelo menos duas vezes e meia o diâmetro da indentação, como mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Esquema de espaçamento mínimo de recuo.



**Fonte:** Adaptado de Norma ASTM E18-20.

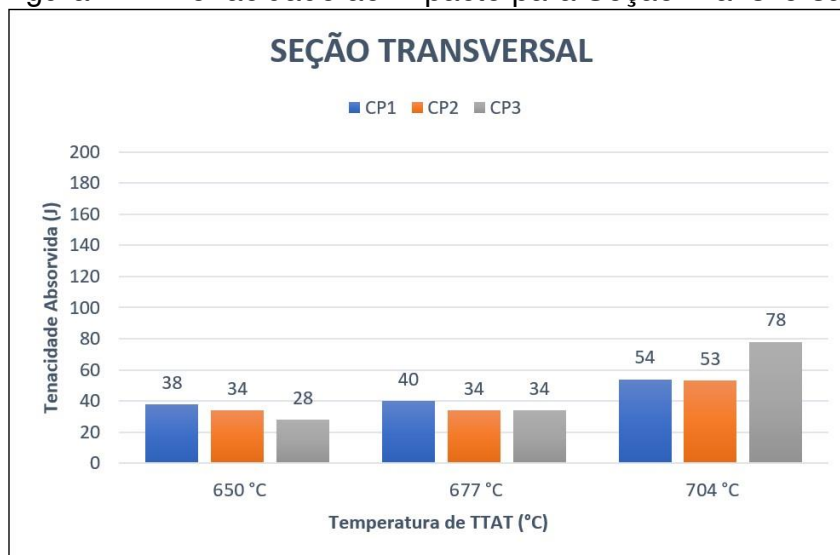
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Ensaio de Impacto Charpy

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através da metodologia adotada na pesquisa. Os primeiros resultados coletados foram os de tenacidade ao impacto mediante ensaio de impacto Charpy.

Na Figura 21 estão apresentados os valores de tenacidade ao impacto de cada corpo de prova ensaiado para o ASTM A182 F22, forjado e com entalhe na seção transversal, bem com TTAT nas temperaturas de 650 °C, 677 °C e 704 °C.

Figura 21 – Tenacidade ao impacto para Seção Transversal.



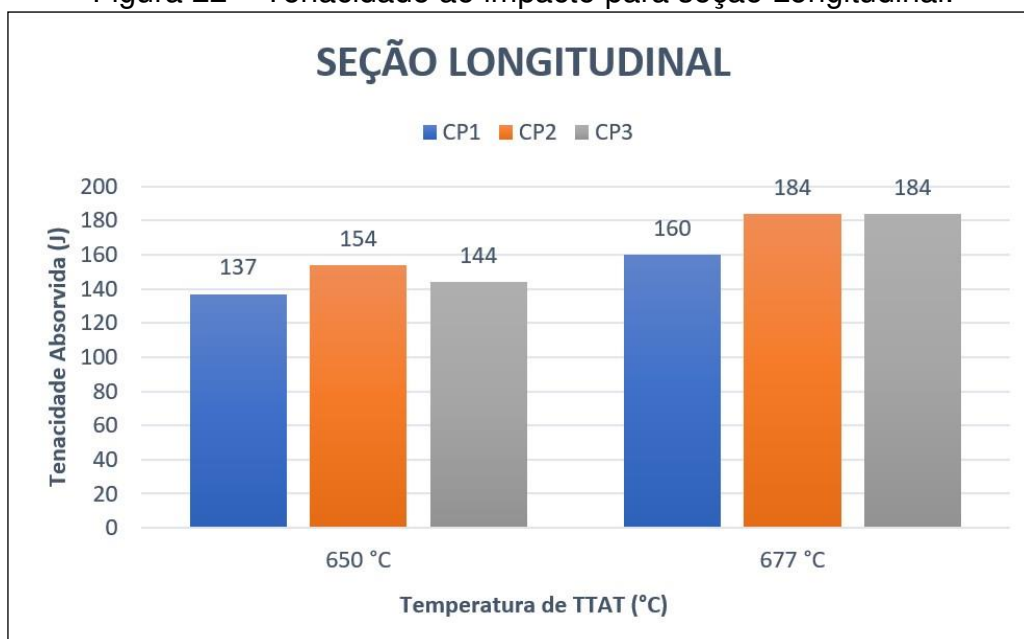
Fonte: Autoria própria (2025).

Já na Figura 22, se encontram os valores obtidos de tenacidade ao impacto para cada corpo de prova ensaiado para o F22 forjado, com TTAT nas temperaturas de 650 °C, 677 °C e 704 °C, e com entalhe localizado na seção longitudinal.

A princípio, considerando as Figuras 21 e 22, destaca-se de imediato a diferença na quantidade de energia absorvida para ambas as seções de localização do entalhe, ressaltando a maior energia absorvida por aqueles em que o entalhe foi confeccionado na direção longitudinal.

Outro ponto a se destacar na Figura 21, é a elevação de energia absorvida dos CPs à medida que a temperatura do TTAT aumentou. A mesma tendência pode ser constatada na Figura 22, referente a seção longitudinal, no entanto, nesta última condição o aumento foi menos expressivo.

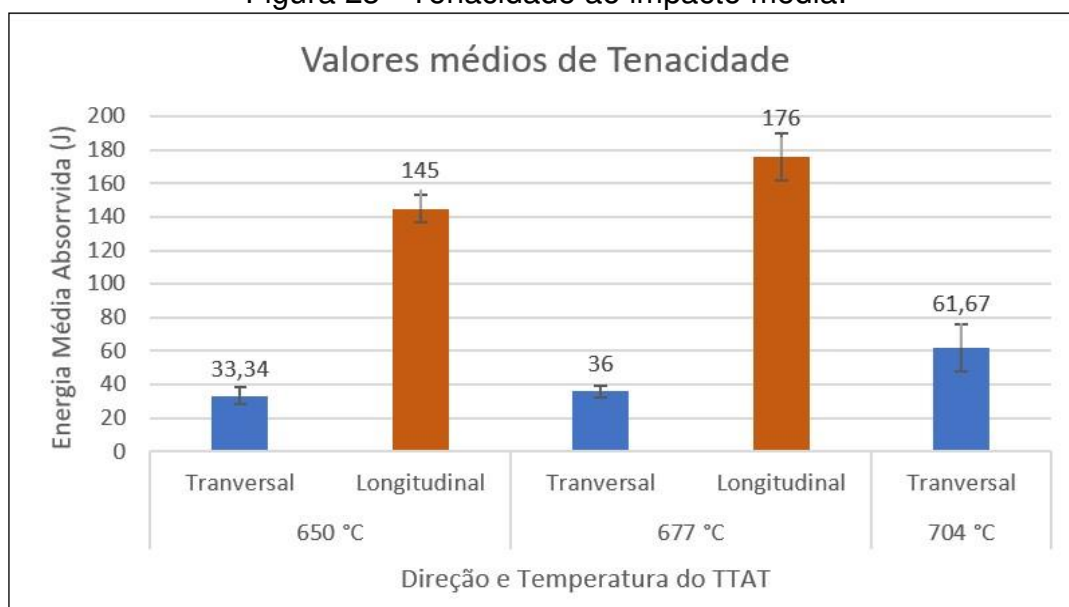
Figura 22 – Tenacidade ao impacto para seção Longitudinal.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Figura 23, é apresentado por meio de colunas os valores médios de tenacidade ao impacto em Joules e desvio padrão obtidos através do ensaio de Impacto Charpy. Nas colunas de cor azul, estão representados os resultados da direção transversal, enquanto as colunas de cor laranja correspondem a direção longitudinal.

Figura 23 - Tenacidade ao impacto média.



Fonte: Autoria própria (2025).

Analisando a Figura 23 percebemos os valores médios de energia absorvida pela seção longitudinal (colunas laranja), de 145 J e 176 J para as temperaturas de 650 °C e 677 °C, respectivamente. Estes resultados foram maiores em comparação aos valores obtidos para a seção transversal (colunas azuis), que foram de 33,34 J, 36 J e 61,67 J para as temperaturas de 650 °C, 677 °C e 704 °C, respectivamente. Além disso, é perceptível uma certa tendência ao aumento de energia absorvida à medida que se eleva a temperatura do TTAT.

Essa mesma tendência foi observada nos estudos de Cozza et al. (2019) e Batista et al. (2021), que avaliaram a influência de diferentes parâmetros de temperatura e tempo no TTAT, destacando sua relevância para o desempenho estrutural do material.

As tabelas 4 e 5 resumem os resultados de tenacidade ao impacto encontrados em cada CP, de acordo com a temperatura do TTAT, assim como mostra o valor médio, o desvio-padrão e coeficiente de variação Cv%.

Tabela 4 - Valores de energia absorvida para a seção transversal.

| <b>Temperatura (°C)</b> | <b>650 °C</b> | <b>677 °C</b> | <b>704 °C</b> |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|
| CP1                     | 38            | 40            | 54            |
| CP2                     | 34            | 34            | 53            |
| CP3                     | 28            | 34            | 78            |
| <b>Média (J)</b>        | 33,333        | 36            | 61,667        |
| <b>Desvio-Padrão</b>    | 5,033         | 3,464         | 14,154        |
| <b>Cv%</b>              | 15%           | 10%           | 23%           |

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 5 - Valores de energia absorvida para a seção Longitudinal.

| <b>Temperatura (°C)</b> | <b>650 °C</b> | <b>677 °C</b> |
|-------------------------|---------------|---------------|
| CP1                     | 137           | 160           |
| CP2                     | 154           | 184           |
| CP3                     | 144           | 184           |
| <b>Média (J)</b>        | 145           | 176           |
| <b>Desvio-Padrão</b>    | 8,544         | 13,856        |
| <b>Cv%</b>              | 6%            | 8%            |

Fonte: Autoria própria (2025).

Esse aumento de tenacidade ao impacto pode estar associado a microestrutura final e direção dos grãos, que afetam diretamente a propagação das trincas. Outro fator que pode ter influenciado foi a temperatura do TTAT, reduzindo as tensões residuais internas que poderiam atuar como pontos de nucleação para trincas, melhorando a resistência ao impacto.

Ainda nas tabelas 4 e 5, analisando os valores de CV% - Coeficiente de variação para a seção transversal, tem-se uma variabilidade excessiva dos resultados que indicam uma dispersão alta por apresentar valores acima de 10%. Já na direção longitudinal, há uma boa homogeneidade, com valores de 6% para 650 °C e 8% para 677°C.

Uma variabilidade excessiva pode estar relacionada a heterogeneidade microestrutural, problemas no processo de fabricação e tratamentos térmicos mal controlados ou erros no preparo das amostras, apontando que seria necessário revisar o processo de fabricação como um todo, afim de mitigar a causa e se obter uma melhor homogeneidade dos resultados.

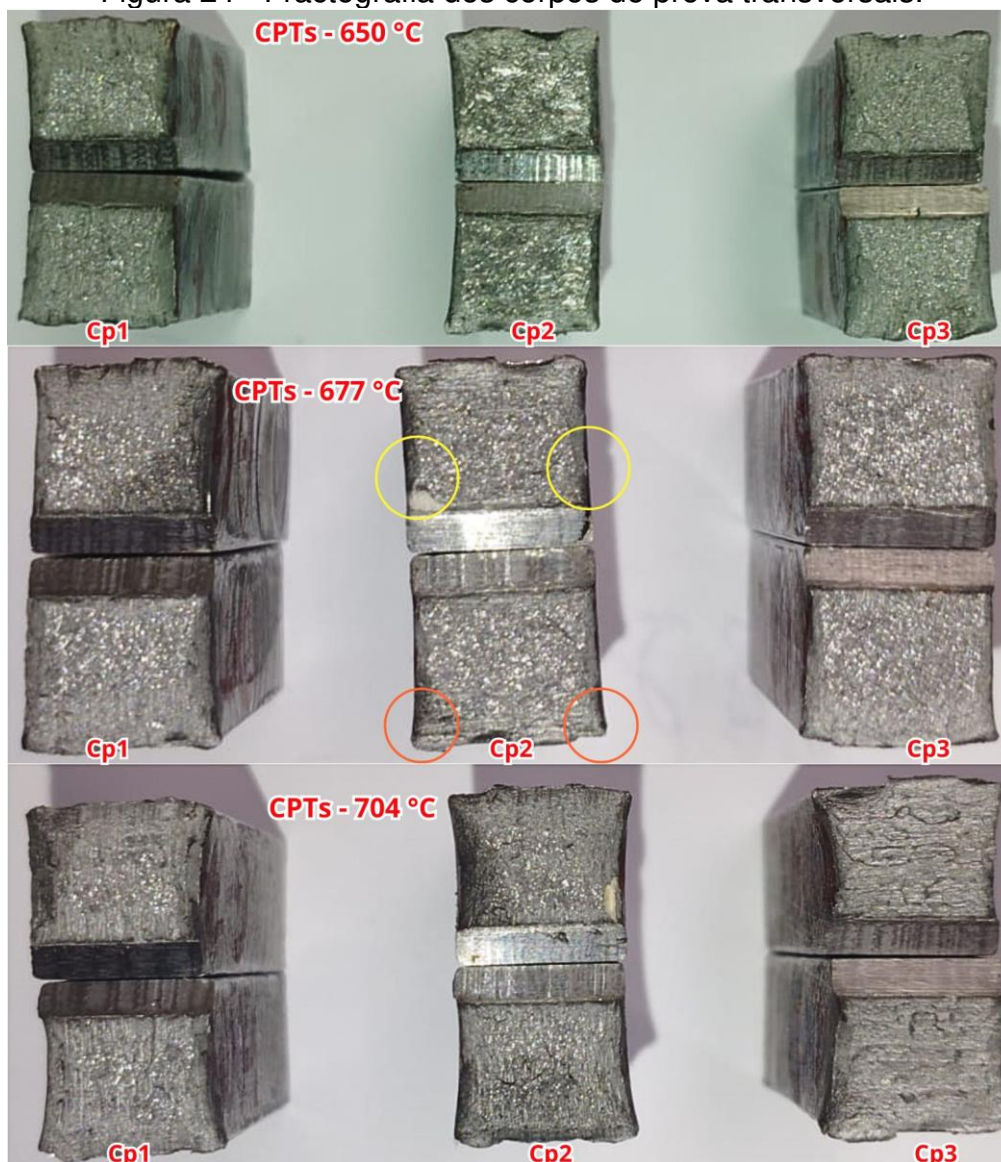
## **4.2 Fractografia**

Nas Figuras 24 e 25 têm-se as imagens da superfície de fratura dos corpos de prova de impacto do aço F22 com TTAT e com entalhe nas direções longitudinal (CPL) e transversal (CPT) conforme Figura 9.

Pode-se visualizar na Figura 24 que os CPTs, referentes a direção transversal e as três temperaturas de TTAT utilizadas, possuem superfícies de fratura mais planas e cristalinas, característico de fraturas mais frágeis.

Nas regiões dos círculos laranjas, pode-se visualizar pouca expansão lateral e nos círculos amarelos, próxima a região da raiz do entalhe, temos também pouca contração. Este resultado está correlacionado com os valores de tenacidade obtidos no ensaio de impacto, que apresentaram valores baixos de energia absorvida, evidenciando a fratura de forma frágil.

Figura 24 - Fractografia dos corpos de prova transversais.



**Fonte:** Autoria própria (2025).

Na Figura 25, estão as imagens dos CPLs para as temperaturas de 650 °C e 677°C. Como dito anteriormente, os CPLs da temperatura de 704 °C foram descartados, devido a uma incompatibilidade nos resultados coletados, evidenciando um possível erro de fabricação.

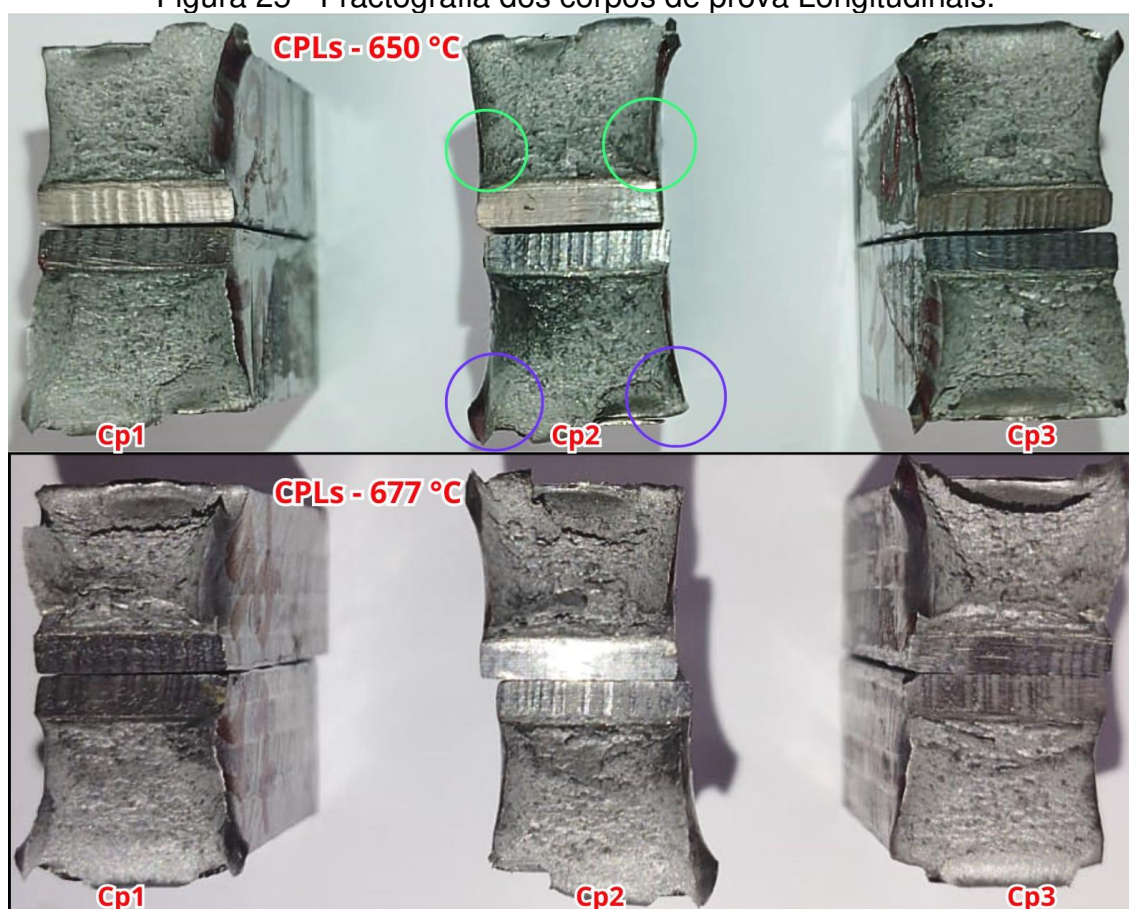
Analisando as imagens, que correspondem aos corpos prova efetivamente considerados neste estudo, verifica-se que os CPLs possuem superfícies de fratura mais fibrosas e opacas, característico de fraturas mais dúcteis.

Outro detalhe evidenciado na Figura 25, é a distorção da seção de fratura dos corpos de provas após o ensaio, onde observa-se as regiões de contração e expansão lateral bem definidas, característico da deformação plástica.

Durante o impacto, o CP absorve energia e a dissipa, gerando a compressão e expansão lateral. Na região dos círculos roxos, pode-se ver a expansão lateral na região oposta a raiz do entalhe, enquanto nos círculos verdes é possível visualizar a compressão próxima a região do entalhe.

Esse resultado está correlacionado com os obtidos através do ensaio de impacto, em que a tenacidade variava entre valores médio de 145 e 176 Joules.

Figura 25 - Fractografia dos corpos de prova Longitudinais.



Fonte: Autoria própria (2025).

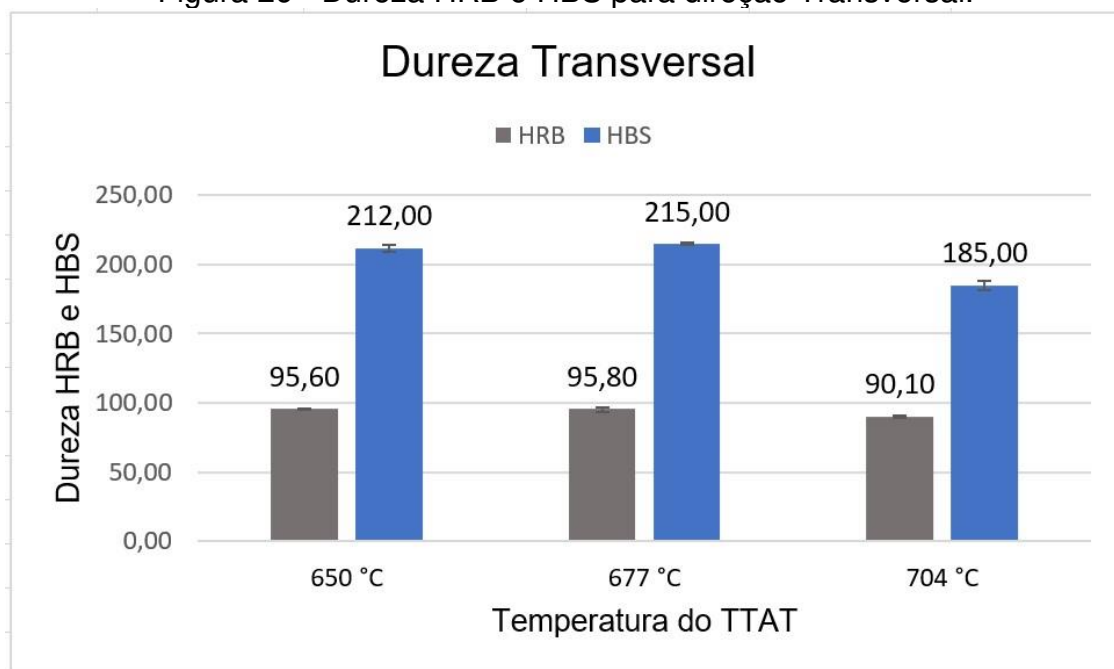
### 4.3 Dureza

Os resultados obtidos no ensaio de dureza Rockwell, utilizando a escala Rockwell B, juntamente com os valores de dureza Brinell S, obtidos pelo sistema de conversão do durômetro, podem ser visualizados nas Figuras 26 e 27.

A dispersão dos resultados, avaliada pelo desvio padrão, demonstrou uma boa homogeneidade do material, sugerindo uma microestrutura uniforme e que o tratamento térmico aplicado foi adequado.

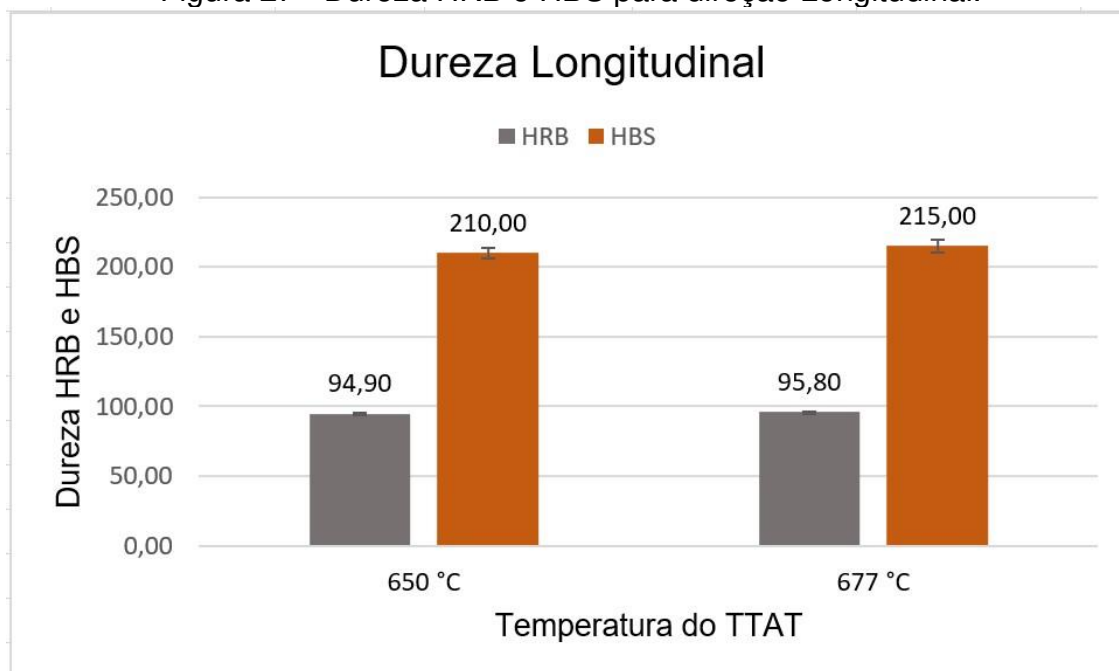
As duas direções apresentaram durezas semelhantes, indicando que a direção de corte não influencia na dureza final do material. Entretanto, a direção de corte influenciou diretamente na tenacidade ao impacto, mostrando que a dureza não está relacionada com a tenacidade ao impacto do material, uma vez que não apresentaram resultados correlatos.

Figura 26 - Dureza HRB e HBS para direção Transversal.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 27 - Dureza HRB e HBS para direção Longitudinal.



Fonte: Autoria própria (2025).

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo levantar a tenacidade ao impacto do aço ASTM A182 F22, buscando entender qual seria a influência da direção de corte e do TTAT no comportamento mecânico. Para isso, foram realizados tratamentos térmicos de alívio de tensões em 3 temperaturas diferentes (650 °C, 677 °C, 704 °C) para corpos de provas em duas direções diferentes, Transversal e Longitudinal. Em seguida, foram realizados ensaios de impacto Charpy, análise Fractográfica e ensaio de Dureza Rockwell.

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que:

- Na seção transversal, o melhor resultado de tenacidade ao impacto foi alcançado a 704 °C, em que a energia média chegou a 61,67 J. Já na direção longitudinal, a maior energia absorvida foi observada a 677 °C, com uma energia média de 176 J. Essa diferença significa um percentual de 185,39% de mais energia absorvida do CP longitudinal em relação ao transversal.
- O coeficiente de variação acima de 10% nos CPs com entalhe na seção transversal evidencia que seria interessante refazer os corpos de provas e ensaiá-los novamente, para uma maior confiabilidade dos resultados.
- De acordo com os ensaios de impacto e fractografia, os CPs com entalhe na direção transversal apresentaram ruptura frágil, enquanto os CPs com entalhe na longitudinal tiveram resultados mais tenazes.
- A dureza não muda em relação a direção de corte, uma vez que os resultados foram bem semelhantes para ambas as direções.
- A dureza na temperatura de 704 °C foi a menor em relação as outras temperaturas, o que pode indicar uma mudança na microestrutura a partir do TTAT a essa temperatura.

Por fim, considerando tanto os resultados de tenacidade quanto de dureza, fica evidente que para aplicações *Offshore*, o aço cortado na direção longitudinal é o mais adequado, devido, principalmente, aos maiores valores de tenacidade ao impacto e a presença de mecanismo de fratura dúctil, necessário para suportar o ambiente crítico de trabalho no qual será submetido.

## REFERÊNCIAS

- ABREU, CCS. **Tratamentos térmicos e suas aplicações em materiais metálicos**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/44647/1/CAIO+CAMIZAS+SA+SILVA+ABREU+--+DEFESA+TCC.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2025.
- ALMEIDA, José Gonçalves. **Influência do Hidrogênio na Tenacidade Quase Estática de uma Junta Soldada Dissimilar Constituída de Aços ARBL e Metal de Adição BS NA 21 (INCONEL 625)**. 2014. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.
- ALMEIDA, MS. **Análise comparativa da microestrutura e da dureza do aço ASTM A182 F22**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. Disponível em: UFPB.
- ASM INTERNATIONAL. **Heat Treatment of Welded Structures**. In: ASM HANDBOOK. Materials Park, Ohio: ASM International, 2018. v. 4, p. 150-190.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM A182/A182M-22: Standard Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless Steel Pipe Flanges, Forged Fittings, and Valves and Parts for High-Temperature Service**. West Conshohocken: ASTM International, 2022. Disponível em: [https://www.astm.org/a0182\\_a0182m-22.html](https://www.astm.org/a0182_a0182m-22.html). Acesso em: 04 abr. 2025.
- ASTM INTERNATIONAL. **ASTM E18-20: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. Disponível em: <https://www.astm.org/e0018-20.html>. Acesso em: 3 abr. 2025.
- BATISTA, V. R.; PEREIRA, E. M. A.; FRAGA, R. C. F. **Efeito do tratamento térmico de alívio de tensão e do preaquecimento na microestrutura e microdureza da interface entre depósitos de Inconel 625 e aços AISI 8630M e ASTM A182 F22**. *Revista Matéria*, 2021. DOI: 10.1590/S1517-707620210001.1220.
- BHADESHIA, H. K. D. H. **Steels: Microstructure and Properties**. 4th ed. Elsevier, 2017.
- CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020.
- CARDENAS MANOSALVA, AL. **Influência dos ciclos de tratamentos térmicos nas propriedades mecânicas e no aprisionamento de hidrogênio do aço 2,25Cr-1Mo-0,25V**. 2018. 145f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/12877>. Acesso em: 23 fev. 2025.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2003.
- COZZA, LM; MEDEIROS, JLB; BIEHL, LV; SOUZA, J. **Escolha das energias de soldagem para aplicação na técnica da dupla camada na soldagem do aço ASTM 131 grau AH 36**. *Revista Soldagem e Inspeção*, São Paulo, v. 3, pág. 159-172, 2019.

Disponível

em:

<https://www.scielo.br/j/si/a/cRfD5zcby5VDhW9Tc5mXSvj/?format=pdf&lang=pt>.

Acesso em: 23 fev. 2025.

DANTAS, VA; JÚNIOR, MQS; GOMES, AVR. **Estudo das propriedades mecânicas para diversos tratamentos térmicos do aço ASTM A182 F22**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais (CBECIMAT), 2016. Disponível em: Metallum.

DAVIS, J. R. **Alloying: Understanding the Basics**. Materials Park, OH: ASM International, 2004.

DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy**. 3rd ed. McGraw-Hill, 2016.

DODGE, Michael Francis. **The effect of heat treatment on the embrittlement of dissimilar welded joints**. 2014. PhD Thesis – Department of Engineering, University of Leicester, Leicester, United Kingdom. Available at: [https://figshare.le.ac.uk/articles/thesis/The\\_effect\\_of\\_heat\\_treatment\\_on\\_the\\_embrittlement\\_of\\_dissimilar\\_welded\\_joints/10157156](https://figshare.le.ac.uk/articles/thesis/The_effect_of_heat_treatment_on_the_embrittlement_of_dissimilar_welded_joints/10157156). Accessed: April 5, 2025.

ESCRIVÀ-CERDÁN, Clara; OOI, Steve W.; JOSHI, Gaurav R.; MORANA, Roberto; BHADESHIA, H. K. D. H.; AKID, Robert. **Effect of tempering heat treatment on the CO<sub>2</sub> corrosion resistance of quench-hardened Cr-Mo low-alloy steels for oil and gas applications**. Corrosion Science, v. 154, p. 36-48, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010938X18317967>. Acesso em: 3 abr. 2025.

FALLAHMOHAMMADI, E.; BOLZONI, F.; FUMAGALLI, G.; RE, G.; BENASSI, G.; LAZZARI, L. **Hydrogen diffusion into three metallurgical microstructures of a C–Mn X65 and low alloy F22 sour service steel pipelines**. International Journal of Hydrogen Energy, v. 39, n. 25, p. 13300-13313, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036031991401862X>. Acesso em: 3 abr. 2025.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaaios dos Materiais**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GARCIA, D. N. **Comportamentos mecânico e metalúrgico de junta soldada em aço ASTM A182 F22 aplicado na indústria offshore**. 2018. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24838>. Acesso em: 23 fev. 2025.

IANNUZZI, M.; BARNOUSH, A.; JOHNSEN, R. **Materials and corrosion trends in offshore and subsea oil and gas production**. Nature Reviews Materials, [S.l.], v. 2, p. 17003, 2017. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41529-017-0003-4>. Acesso em: 3 abr. 2025.

LEAL, GS; MORAIS, GS. **Sensibilidade quanto à escolha de variáveis na soldagem do aço ASTM A182 F22 e sua influência na orientação dos grãos e propriedades anisotrópicas**. 2019. Trabalho acadêmico – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/337448002>. Acesso em: 10 mar. 2025.

LI, Z.; ZHANG, J.; DING, H.; et al. **Surface crack growth in offshore metallic pipelines under cyclic loading: A review**. Journal of Marine Science and

Engineering, v. 8, n. 5, p. 339, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-1312/8/5/339>. Acesso em: 3 abr. 2025.

MENDANHA, A.; GOLDENSTEIN, H. **Tenacidade do aço ferramenta para trabalho a frio AISI D2 – Parte I: Influência da microestrutura de partida**. 2003. Disponível em: <http://heattech.com.br/trabalhos/2003%20-%201o%20ABM%20Moldes%20-%20AISI%20D2%20Parte%20I.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2025.

MISHRA, A. **Corrosion study of base material and welds of a Ni–Cr–Mo–W alloy**. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), v. 30, p. 326-332, 2017. Disponível em <https://doi.org/10.1007/s40195-017-0559-6> . Acesso em: 23 fev. 2025.

MORAIS, Willy Ank de; SANTOS, Aluizio Cugler dos; SANTA'ANA, Audrey Duarte de; SANTOS, Bruna Rodrigues dos; MARGUERITO, Caio Nunes Ferreira; MATHIAS, Luiz Felipe Passos. **Descrição da tenacidade por impacto Charpy ao redor de juntas soldadas de aço estrutural e simulação de suas curvas dinâmicas força x tempo**. In: Congresso Técnico-Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 2020, Brasil. Anais [...]. Brasil: CONFEA, 2020.

MOURA FILHO, AJS. **Avaliação de juntas soldadas dos aços AISI 8630M e ASTM A182 F22 amanteadas pelo processo PTA com a liga de níquel UNS N06625**. Universidade Federal do Ceará, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/10740>. Acesso em: 10 mar. 2025.

NASCIMENTO, AB. **Avaliação da suscetibilidade à fragilização por hidrogênio de juntas soldadas e metais dissimilares para aplicações submarinas no setor de petróleo e gás**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014. Disponível em: <https://bdtd.ufcg.edu.br/jspui/handle/riufcg/28256>. Acesso em: 23 fev. 2025.

OLIVEIRA, BF. **Estrutura, textura e propriedades mecânicas de aços microligados**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2019. Disponível em: [https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2019/10/B%C3%A1rbara-Ferreira-de-Oliveira\\_tese.pdf](https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2019/10/B%C3%A1rbara-Ferreira-de-Oliveira_tese.pdf). Acesso em: 10 mar. 2025.

OLIVEIRA, GLG. **Soldagem dissimilar dos aços AISI 8630M e ASTM A182 F22 para aplicações subaquáticas**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Metalúrgica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/7804>.

OLIVEIRA, José Alberto. **Fractografia Quantitativa: Relações Entre Diferentes Condições de Tratamento Térmico e a Dimensão Fractal**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), São Paulo, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/152081>

PINHEIRO, PHM. **Efeitos da temperatura de interpasse sobre as alterações metalúrgicas e propriedades mecânicas de juntas diferentes do aço ASTM A182-F22 soldadas com ligas**. Universidade Federal do Ceará, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/10733>. Acesso em: 10 mar. 2025.

SCANDIAN, C.; BOHER, C.; MELLO, J. D. B. de; RÉZAÏ-ARIA, F. **Effect of molybdenum and chromium contents in sliding wear of high-chromium white**

**cast iron: The relationship between microstructure and wear.** *Wear*, v. 267, n. 1–4, p. 401-408, 2009. ISSN 0043-1648. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.12.095> . Acesso em: 23 fev. 2025.

TANI, T., NAGUMO, M. **Fracture Process of a Low Carbon Low Alloy Steel Relevant to Charpy Toughness at Ductile-Brittle Fracture Transition Region.** *Metallurgical and Materials Transactions A*, 26: 391–399, 1995.