



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA (DCT) - CARAÚBAS
CURSO INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Fernanda Marinho Soares

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE AO IMPACTO E DA DUREZA DO AÇO ASTM A36
SUBMETIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE PROCESSAMENTO
TÉRMICO**

CARAÚBAS

2025

Fernanda Marinho Soares

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE AO IMPACTO E DA DUREZA DO AÇO ASTM A36
SUBMETIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE PROCESSAMENTO
TÉRMICO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA.

Orientadora: Adiana Nascimento Silva, Prof^ª.
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.

S676a Soares, Fernanda Marinho.
Avaliação da tenacidade ao impacto e da dureza
do aço ASTM A36 submetido a diferentes
temperaturas de processamento térmico /
Fernanda Marinho Soares. - 2025.
45 f. : il.

Orientadora: Adiana Nascimento Silva.
Coorientador: Marcelo Batista de Queiroz.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2025.

1. Aço ASTM A36. 2. Processamento térmico. 3.
Tenacidade ao impacto. 4. Absorção de energia. I.
Silva, Adiana Nascimento, orient. II. Queiroz,
Marcelo Batista de, co-orient. III. 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.

Fernanda Marinho Soares

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE AO IMPACTO E DA DUREZA DO AÇO ASTM A36
SUBMETIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE PROCESSAMENTO
TÉRMICO**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em INTERDISCIPLINAR EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA.

Defendida em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Adiana Nascimento Silva, Prof^ª. Dra. (UFERSA)
Presidente

Maize Cibele de Lima Melo, Prof^ª. Ma.
Membro Examinador

Marcelo Batista de Queiroz, Prof. Dr.
Membro Examinador

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, Gislene Claudia Pereira Marinho, que não está mais em corpo presente entre nós, mas foi e sempre será uma das pessoas mais importantes para minha formação como cidadã e profissional, o sinônimo mais puro de resiliência, jovialidade, garra e a dona de um sorriso encantador. Eternas saudades e gratidão.

Dedico este trabalho também à Prof^ª. Dra. Adiana Nascimento Silva, gratidão extrema, por toda paciência incontestável, o veemente apoio e o desmedido conhecimento repassado durante a trajetória de construção e conclusão deste estudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me proporcionar as forças necessárias para chegar até aqui, mesmo diante de tantas adversidades.

Agradeço também aos meus pais, ao meu irmão e aos demais familiares que são alicerces nesse processo, que sempre se fizeram presentes mesmo distante, nunca deixaram de me apoiar e me orientar.

Ao meu namorado Guilherme de Lucena Pires, pelo companheirismo e incentivo, ao longo do curso e deste trabalho.

A Professora Dra. Adiana Nascimento Silva, que me faltam palavras para tamanha gratidão, mas ainda assim sou grata pela orientação, paciência, dedicação e por todo conhecimento repassado.

Agradeço também ao Professor Dr. Marcelo Batista de Queiroz, por todo conhecimento repassado e por todo auxílio durante a execução do trabalho.

Ao técnico do laboratório Samir Adson, por sempre estar a postos, ajudando em todas as etapas, com paciência e descontração.

A todos os funcionários do bloco de Laboratórios II, por sempre estarem disponíveis, solícitos e pelo café.

Agradeço a Banca Examinadora pela disponibilidade de avaliarem e contribuírem com este trabalho.

Agradeço aos meus amigos Gean Gonçalves, Josilândia dos Santos, Pablo Vinicius, Elaine Taís, Letícia Benevides, Luma Moraes, Nicole Cabral e a todos os meus colegas da Engrenagem Júnior por terem me dado todo o suporte necessário desde o início até a conclusão deste trabalho, pois sem eles essa defesa não seria possível.

Não entendo. Isso é tão vasto que ultrapassa qualquer entender. Entender é sempre limitado. Mas não entender pode não ter fronteiras. [...] O bom é ser inteligente e não entender. [...] Só que de vez em quando vem a inquietação: quero entender um pouco. Não demais: mas pelo menos entender que não entendo.

Clarice Lispector

RESUMO

A pesquisa por materiais que sejam mais resistentes, econômicos e menos densos, é altamente relevante para aplicações estruturais em projetos de engenharia, e o aço ASTM A36 apresenta essas características, sendo utilizado nas indústrias naval e, civil como também em tubulações para transporte de gases e líquidos contando com sua alta resistência, versatilidade e fácil obtenção. Com isso, há também propriedades que podem auxiliar nessas características por meio de variações no processamento térmico e mecânico, podendo favorecer a resistência, ductilidade, tenacidade e outros aspectos das propriedades mecânicas do material. Este estudo, avalia os efeitos do processamento térmico sobre a propriedade de tenacidade ao impacto e dureza do aço ASTM A36. Este aço no estado laminado foi aquecido no forno nas temperaturas de 650°C e 704°C, durante 6 horas, e logo após resfriado a ar até a temperatura ambiente. Foram submetidos ao Tratamento Térmico de Alívio de Tensão (TTAT) dois blocos, um em cada temperatura, citadas anteriormente, ao qual cada um foi dividido em três partes e cada parte seccionada em dois, resultando assim em seis corpos de prova para serem avaliadas por meio do ensaio de impacto Charpy. A análise da superfície, dos corpos de prova de impacto, foi realizada por meio de fotografia digital com a resolução 12 megapixels, em seguida os mesmos corpos de prova foram submetidos ao ensaio de dureza Rockwell (HRB). Os resultados mostraram que o aumento da temperatura de TTAT não favoreceu o aumento da absorção de energia, sendo verificado para a temperatura de 704°C uma energia de impacto, de $60 \pm 8,32$ J, enquanto na temperatura de 650°C a energia absorvida foi 88 ± 6 J. Os resultados de dureza apresentaram valores próximos, de $86,10 \pm 0,40$ HRB e $86,08 \pm 0,62$ HRB para as temperaturas de 650°C e 704°C, respectivamente. A análise fractográfica corroborou com os valores de tenacidade, sendo observado para a temperatura de 650°C mecanismos da fratura predominante dúctil, enquanto que na temperatura de 704°C identificou-se uma superfície de fratura frágil. Para as condições de tratamentos térmicos aplicados, os resultados de tenacidade ao impacto e de dureza do aço ASTM A36 não apontaram uma alteração expressiva de propriedades com aumento da temperatura de TTAT, sugerindo que as tolerâncias geométricas e de acabamento superficial dos corpos de prova de impacto influenciaram nos resultados.

Palavras-chave: Aço ASTM A36; processamento térmico; tenacidade ao impacto; absorção de energia

ABSTRACT

The search for materials that are stronger, more economical, and less dense is highly relevant for structural applications in engineering projects. ASTM A36 steel exhibits these characteristics and is widely used in the naval and civil industries, as well as in pipelines for transporting gases and liquids, due to its high strength, versatility, and ease of availability. Additionally, certain properties can be enhanced through variations in thermal and mechanical processing, which may improve strength, ductility, toughness, and other aspects of the material's mechanical behavior. This study evaluates the effects of thermal processing on the impact toughness and hardness of ASTM A36 steel. The rolled steel was heated in a furnace at temperatures of 650 °C and 704 °C for 6 hours, and then air-cooled to room temperature. Two blocks were subjected to Stress Relief Heat Treatment (SRHT), one at each of the aforementioned temperatures. Each block was divided into three parts, and each part was sectioned in two, resulting in six specimens to be evaluated using the Charpy impact test. The surface of the impact specimens was analyzed using digital photography with a resolution of 12 megapixels. Subsequently, the same specimens were subjected to Rockwell hardness testing (HRB scale). The results showed that increasing the SRHT temperature did not enhance energy absorption. At 704 °C, the impact energy was 60 ± 8.32 J, while at 650 °C the absorbed energy was 88 ± 6 J. The hardness results were similar, with values of 86.10 ± 0.40 HRB and 86.08 ± 0.62 HRB for the 650 °C and 704 °C treatments, respectively. Fractographic analysis supported the toughness results: at 650 °C, the fracture surface exhibited predominantly ductile mechanisms, while at 704 °C, a brittle fracture surface was observed. Under the applied heat treatment conditions, the impact toughness and hardness results of ASTM A36 steel did not show a significant change with increasing SRHT temperature, suggesting that geometric tolerances and surface finish of the impact specimens influenced the outcomes.

Keywords: ASTM A36 steel; thermomechanical processing; impact toughness; energy absorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vigas utilizadas em construção civil.....	19
Figura 2: Tubulações utilizadas em transporte de líquidos.....	20
Figura 3: Microestrutura do aço ASTM A36 aumentado 20x.....	22
Figura 4: Representação do Ensaio de Impacto Charpy e Izod.....	24
Figura 5: Posição do CP no ensaio do tipo Izod.....	24
Figura 6: Posição do CP no ensaio do tipo Charpy.....	25
Figura 7: Transição dúctil-frágil relacionada com a temperatura, a energia de impacto e a porcentagem de fratura dúctil (amostra de aço A283).....	26
Figura 8: Ensaio de dureza Rockwell.....	27
Figura 9: Fluxograma da sequência e subsequências dos processos adotados no estudo.....	28
Figura 10: Chapa de aço A36.....	29
Figura 11: Amostras do aço A36 cortadas e prontas para o TTAT.....	30
Figura 12: Retirada do aço do forno mufla.....	30
Figura 13: Aço fragmentado em três blocos.....	32
Figura 14: Secção do aço em dois.....	32
Figura 15: Usinagem do CP na fresadora.....	33
Figura 16: Padronização do CP para o ensaio do tipo Charpy de acordo com a ISO 148-I.....	33
Figura 17: Usinagem do entalhe.....	34
Figura 18: Máquina pendular utilizada no ensaio Charpy.....	34
Figura 19: Durômetro Mitutoyo.....	35
Figura 20: Indentações no CP.....	36
Figura 21: Vistas do CPs rompidos para análise da seção de fratura na temperatura de 650°C... 38	
Figura 22: Vistas do CPs rompidos para análise da seção de fratura na temperatura de 704°C... 39	

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Ensaio de impacto nas duas condições de temperatura.....	37
Gráfico 2: Ensaio de Dureza Rockwell.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tempo, temperatura e taxa de aquecimento para o TTAT à 650° C.....	31
Tabela 2: Tempo, temperatura e taxa de aquecimento para o TTAT à 704° C.....	31

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Composição do aço A36.....	29
Quadro 2: Resultados do ensaio de impacto Charpy.....	38
Quadro 3: Ensaio de dureza Rockwell nas duas condições de temperatura.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	Sociedade americana de testes e materiais
CP	Corpo de Prova
Dr	Doutor
Ma	Mestra
TTAT	Tratamento Térmico de Alívio de Tensões
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 Objetivos.....	17
1.1.1 Objetivo geral.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos.....	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1 Aço ASTM A36.....	18
2.1.1 Composição química.....	18
2.1.2 Aplicações.....	19
2.1.3 Tratamentos térmicos dos aços.....	21
2.1.4 Microestrutura e propriedades de aço laminado.....	22
2.2 Ensaios Mecânicos.....	23
2.2.1 Ensaio de impacto.....	23
2.2.1.1 Tipos de ensaios de impacto.....	23
2.2.1.2 Fraturas.....	25
2.2.3 Ensaio de dureza.....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.1 Preparação dos corpos de prova.....	28
3.1.1 Corte e TTAT.....	28
3.1.3 Usinagem.....	31
3.2 Ensaios.....	34
3.2.1 Ensaio de Impacto Charpy.....	34
3.2.2 Ensaio de Dureza Rockwell.....	35
3.3 Mecanismos de fratura.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	37
4.1 Ensaios.....	37
4.1.1 Ensaio de Impacto Charpy.....	37
4.1.2 Superfície de fratura.....	38
4.1.3 Ensaio de Dureza Rockwell.....	39
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

Durante a Segunda Guerra Mundial a indústria passou por grandes evoluções e com isso houve muitas descobertas que mudaram a percepção e enriqueceram os conhecimentos adquiridos até hoje. Baseando-se nisso, tem-se o estudo de Garcia; Spim; Santos (2012), que cita que as embarcações e tanques de guerra desse período sofriam com o fenômeno de fraturas frágeis nas estruturas soldadas que causavam danos irreversíveis. Esses episódios ocorrem principalmente durante o inverno, pois um dos motivos desses acontecimentos eram as baixas temperaturas.

Dessa forma, perceberam que o problema não estava nas juntas soldadas, mas sim no material e no desconhecimento sobre mecanismos de falha que havia outrora. Com base nisso, iniciou-se investigações sobre a tenacidade dos materiais, e com essa prática encontra-se a tenacidade ao impacto que considera a energia absorvida pelo material até que ocorra sua fratura.

Atualmente os ensaios de impacto são amplamente utilizados em materiais poliméricos, cerâmicos, na indústria naval, bélica e em estruturas *offshore*. Consequente, Cavalcante (2014) aponta que o estudo da fratura é imprescindível para a escolha e a aplicação do material visto que, quando uma trinca se forma a importância da sua análise é inevitável.

Considerando que algumas falhas em componentes de plataformas petrolíferas e de gás natural que são fabricados com aços, têm sido correlacionadas a atuação do hidrogênio proveniente de sistemas de proteção, vem-se pesquisando a influência de parâmetros de processamento térmico em comparação com a microestrutura dos materiais empregados na confecção desses componentes (Saldana-Garza, 2017).

Com base nisso, são realizados tratamentos térmicos para alterar as estruturas dos materiais e observar o seu comportamento em relação à utilização do aço em diferentes ambientes. No estudo de Gallo (2006), é citado que os tratamentos térmicos conseguem mudar a microestrutura dos aços e dessa maneira alterar suas propriedades, na qual aços que possuem martensita e ferrita em sua composição têm melhores características mecânicas. Portanto, esses materiais apresentam maior resistência mecânica, elevada ductilidade, boa tenacidade à fratura e resistência ao desgaste. Além disso, o aumento do nível de encruamento pode contribuir para retardar o processo de fadiga.

Como pontua Claussen e Carmo (2021), o processamento termomecânico através de laminação controlada na produção de aços microligados é comumente empregado e é um dos processos mais eficientes. Com este processo é possível obter aumento da resistência mecânica e aprimoramento da microestrutura, sem necessitar do endurecimento por adição de elementos de liga. No mesmo processo, há também a presença de elementos em solução sólida e uma fina precipitação induzida pela deformação no campo austenítico-ferrítico que contribui para o endurecimento e garante um aço com baixo custo e boa soldabilidade.

Em vista disso, no presente trabalho realizou-se um estudo sobre tenacidade ao impacto e dureza do aço ASTM A36 laminado, por ser um aço bastante utilizado em elementos soldados na indústria *Offshore*. Bem como, considerando que esses elementos passaram falhas cujos estudos têm apontado a relação entre composição química e processamento térmico dos materiais que compõem essas uniões.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este estudo tem como objetivo geral avaliar a influência da aplicação de Tratamento Térmico de Alívio de Tensão (TTAT) nas propriedades mecânicas do aço ASTM A36, com ênfase para as propriedades de tenacidade ao impacto e dureza.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar Tratamento Térmico de Alívio de Tensão com temperaturas de 650°C e 704°C;
- Fabricar corpos de prova de tenacidade ao impacto, do tipo Charpy, do aço A36 para ambas temperaturas de TTAT;
- Avaliar a tenacidade do aço ASTM A36 submetido a diferentes temperaturas de TTAT;
- Analisar os mecanismos de fratura dos corpos de prova de impacto;
- Realizar ensaios de dureza do aço ASTM A36 após o TTAT em diferentes temperaturas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aço ASTM A36

O aço A36 além do carbono, apresenta outros elementos de ligas. Segundo a norma ASTM A36/A36M o mesmo contém manganês, silício, fósforo e enxofre, dentre outros elementos. No aço de baixa liga o teor de todos os elementos de liga não pode ultrapassar 6%, logo o aço A36 pode ser classificado nessa categoria (ASTM A941, 2021).

Considerando ainda que este aço pode ser utilizado de várias maneiras e dependendo da especificação esta composição de elementos pode variar. Além disso, o A36 possui outras características específicas como propriedades mecânicas entre outras que serão abordadas nos tópicos seguintes.

2.1.1 Composição química

De acordo com Callister (2020), o aço ASTM A36 é um dos materiais mais utilizados nas indústrias estruturais, devido à sua alta resistência, ductilidade, além do baixo custo e abundância, como pontua Chiaverini (2012). Ele é uma liga de ferro-carbono com teores de carbono abaixo de 0,3% além de possuir pequenas quantidades de outros elementos como silício (0,04% - 0,030%), manganês (0,6% - 0,9%) e fósforo (0,04 - 0,030%). Essa composição química garante a alta resistência à tração e à flexão do aço, como cita Callister (2020), tornando-o adequado para diversas aplicações, desde construções civis até equipamentos industriais.

Conforme Silva (2010), além de sua composição química, o processo de fabricação do aço ASTM A36 também influencia em suas propriedades mecânicas. Geralmente ele é produzido por laminação a quente, o que garante uma boa uniformidade e tenacidade do material.

Segundo Costa (2017), o aço ASTM A36 apresenta alta tenacidade, o que significa que ele tem boa capacidade de absorção de energia antes da fratura. Essa propriedade é importante em aplicações estruturais, onde é necessário garantir a segurança dos usuários. Além disso, o A36 tem dureza de 71 a 86 HRB, e segundo Almeida (2018), a dureza é uma propriedade fundamental para confirmar o desempenho e a confiabilidade de componentes de aço em várias aplicações.

Contudo, é importante destacar que o aço não é indicado para aplicações em ambientes

corrosivos, pois ele não apresenta resistência à corrosão atmosférica, entretanto há técnicas de proteção contra a corrosão (Viana, 2019).

2.1.2 Aplicações

De acordo com Allgayer (2017), o A36 é um aço estrutural utilizado em inúmeros ramos da indústria metalmeccânica, pois o mesmo mostra boa soldabilidade e uma alta resistência. Os perfis estruturais feitos de chapas de aço soldadas que possuem média resistência e são utilizados em diversos componentes estruturais do mais comum ao mais complexo, por exemplo, estruturas metálicas em geral Viana (2019), máquinas, serralheria, calçadas e implementos agrícolas, além de máquinas rodoviárias e ferroviárias.

Na construção civil, o aço é utilizado em diversos elementos estruturais de edifício e pontes, como podemos observar na Figura 1, em vigas suportando as cargas verticais e horizontais de prédios garantindo estabilidade, nas colunas transmitindo as cargas do edifício para o solo, suportando todo o peso da estrutura, em placas utilizadas em pisos, paredes e telhados, proporcionando rigidez e resistência à estrutura, ou seja, é ideal para a construção civil devido a alta resistência, ductilidade, soldabilidade e durabilidade (Ventrella, 2011).

Figura 1: Vigas utilizadas em construção civil



Fonte: Krona (<https://www.krona.com.br/blog/lajes-vigas-e-pilares-diferencas-e-caracteristicas/>)

Aplicado também na construção naval, o A36 proporciona a elaboração dos cascos de navios e/ou barcaças, fornecendo a estrutura principal da embarcação e suportando a pressão da água, no momento em que os converses suportam o peso da carga e dos passageiros (Callister, 2020).

Empregado também em tubulações, para transporte de líquidos como água, petróleo e de gases como por exemplo gás natural, gás propano, como apresenta a Figura 2.

Figura 2: Tubulações utilizadas em transporte de líquidos



Fonte: Wanlei Steel Pipe (<http://pt.weldsteelpipe.com/steel-pipe/welded-steel-pipe/astm-a36-steel-pipe.html>)

O aço ASTM A36 possui várias aplicações, porém ele apresenta também algumas desvantagens como a baixa resistência fadiga, o que o torna inviável para obras com aplicações com vibrações e cargas cíclicas. Apesar de ser um aço com boa maleabilidade e resistência em locais com nível mais elevado de corrosão, como zonas salinas ou com produtos químicos, faz-se necessário algum tipo de revestimento, pois ele pode deteriorar ao longo do tempo (Silva, 2020).

O autor Chiaverini (2012), destaca as seguintes desvantagens para que o aço A36:

- Soldabilidade limitada: É necessário usar técnicas de soldagem adequadas e eletrodos compatíveis com o A36 seria ideal para assegurar a qualidade da junta soldada;
- Menor resistência ao fogo: O aço pode amolecer e deformar, em caso de incêndio, comprometendo a integridade de sua aplicação;
- Menor resistência à abrasão: Em aplicações que demandam alta resistência à abrasão, como tubulações de minérios e equipamentos de mineração, ele pode se desgastar rapidamente.

Entretanto, segundo Viana (2019), o aço ASTM A36, possui várias vantagens, nas quais são:

- Alta resistência: O aço possui boa resistência à tração e à compressão, o que o torna ideal para suportar altas cargas;

- Versatilidade: Possui uma grande gama de aplicações, o que permite ser aproveitado em vários projetos;
- Durabilidade: A depender da sua proteção adequada ele pode resistir a intempéries e outros agentes agressivos;
- Fácil obtenção: É um material facilmente comercializado, ou seja, sua compra é fácil.

2.1.3 Tratamentos térmicos dos aços

O tratamento térmico é uma técnica amplamente utilizada para modificar a microestrutura e as propriedades mecânicas dos materiais metálicos. Segundo Chiaverini (2012), esse processo consiste em aquecer o material a uma determinada temperatura e mantê-lo nessa condição por um período de tempo, seguido de um resfriamento controlado. O tratamento térmico pode ser utilizado para melhorar a resistência, ductilidade, tenacidade e outros aspectos das propriedades mecânicas do material.

Os processos de tratamento térmico são amplamente utilizados para melhorar as propriedades mecânicas e microestruturais de diversos materiais metálicos. Segundo Callister (2012), existem vários tipos de processamento térmico, que incluem recozimento, normalização, têmpera e revenido, e coalescimento.

O aquecimento e resfriamento de materiais metálicos são processos importantes para melhorar suas propriedades mecânicas e microestruturais. Cada um desses processos apresenta características específicas e pode ser utilizado para atender a diferentes requisitos de projeto (Novikov, 1994).

O processo de austenitização seguido de têmpera é outra categoria de tratamento térmico que pode ser aplicado ao aço ASTM A36. No entanto, essa microestrutura também apresenta uma menor ductilidade e tenacidade, o que pode limitar sua aplicação em certas situações (Callister, 2020).

O recozimento é um processo de tratamento térmico que consiste em aquecer o material a uma temperatura elevada e mantê-lo nessa condição por um período de tempo, provocando a transformação da austenita em perlita, seguido de um resfriamento lento, no interior do forno, desta mesma maneira ocorre com a normalização. Este processo tem, como objetivo principal, eliminar as tensões internas, melhorar a ductilidade e a tenacidade, e promover o crescimento dos grãos do material (Chiaverini, 2012).

Já o tratamento de alívio de tensão (TTAT), é um processo térmico utilizado para

reduzir a tensão interna em materiais metálicos, como aços carbono, aços inoxidáveis e alumínio que podem ser gerados durante processos como forjamento, usinagem, soldagem, entre outros (Silva, 2021). Além disso, o autor cita também que o TTAT pode ser utilizado para reduzir a tensão interna em juntas soldadas de aço carbono, melhorando a sua resistência à tração e a fadiga.

De acordo com a pesquisa de Zorzi; Melo; Santos (2019), o TTAT consiste em aquecer o material a uma temperatura abaixo da sua temperatura de recristalização, mantendo-o nessa condição por um determinado período de tempo e, em seguida, resfriá-lo lentamente. O Tratamento Térmico de Alívio de Tensão tem como finalidade, como o próprio termo já cita, reduzir a tensão interna do material, assim como também sua estabilidade dimensional e a resistência à fadiga.

2.1.4 Microestrutura e propriedades de aço laminado

É sabido que a microestrutura é um fator importante e que influencia o comportamento mecânico dos aços. Como pontua Allgayer (2017), o aço ASTM A36 apresenta uma microestrutura predominantemente ferrítica (parte clara), com pequenas partes de perlita (parte escura) e inclusões não metálicas dispersas. A presença dessas inclusões pode afetar as propriedades mecânicas do material, como a tenacidade e a resistência à fadiga. A Figura 3 mostra o A36 usado em uma união de solda e na imagem pode-se observar com clareza a microestrutura citada anteriormente, observa-se uma microestrutura com pequenas zonas (círculos vermelhos) com grãos deformados e/ou orientados, logo baixo nível de deformação mecânica.

Figura 3: Microestrutura do aço ASTM A36 aumentado 20x



A variação na microestrutura do aço ASTM A36 também é alcançada por meio de tratamentos térmicos. Segundo Chiaverini (2012), este é um processo utilizado para alterar a microestrutura dos aços, com o objetivo de melhorar suas propriedades mecânicas.

Esses processos podem ser realizados de diversas formas, como o tratamento térmico, a laminação a quente e a deformação plástica. Cada método apresenta características específicas e pode ser utilizado para atender a diferentes requisitos de projeto (Novikov, 1994).

2.2 Ensaios Mecânicos

2.2.1 Ensaio de impacto

De acordo com Callister (2020), o ensaio de impacto é um método utilizado para avaliar a tenacidade e a resistência dos materiais a colisão. Nesse ensaio, um corpo de prova é submetido a uma carga de impacto em uma temperatura específica, e o resultado é avaliado pela capacidade do material de absorver a energia do impacto previamente à fratura. O ensaio de impacto é importante para a avaliação de materiais que serão tratados em situações de cargas dinâmicas, como equipamentos de transporte, construções, entre outros.

Como cita Garcia; Spim; Santos (2012), os resultados do ensaio de impacto também são utilizados para o desenvolvimento de modelos de previsão de vida útil dos materiais, que consideram o comportamento do material em situações de carga dinâmica. Esses modelos são importantes para a seleção de materiais adequados às aplicações específicas e para a avaliação do desempenho de materiais em serviço ao longo do tempo.

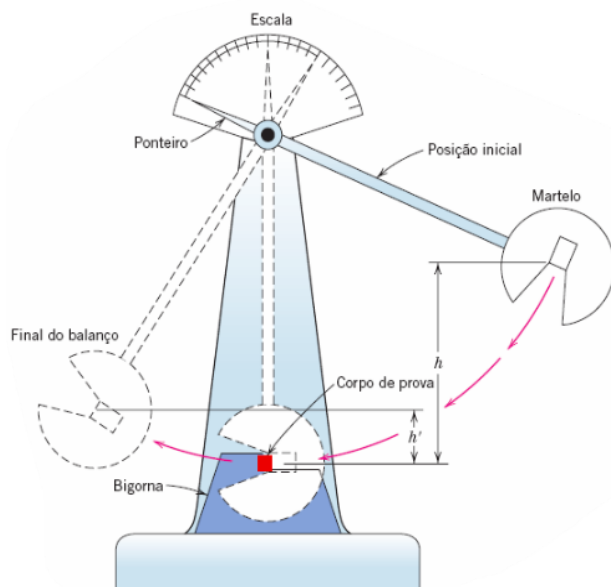
2.2.1.1 Tipos de ensaios de impacto

Os ensaios de impacto são testes mecânicos amplamente utilizados na engenharia para avaliar a resistência e a tenacidade de um material sob condições de carregamento dinâmico. Os principais tipos de ensaios de impactos utilizados são o Charpy e o Izod, a diferença desses dois ensaios é em relação a posição da peça, já sua semelhança é a maneira como o ensaio é executado (Callister, 2020).

Na Figura 4, observa-se o equipamento utilizado em ambos ensaios e a forma de execução do ensaio e obtenção do resultado. Já na Figura 5, está apresentado a maneira como

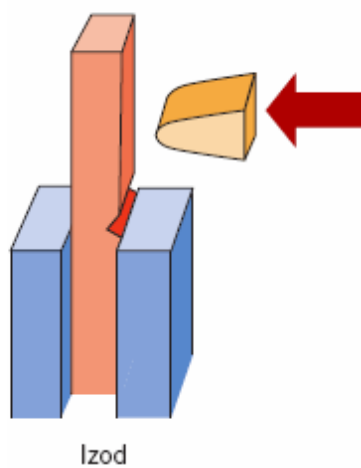
a peça deve ficar posicionada para o ensaio de impacto Izod e na Figura 6 como o CP se posiciona no ensaio tipo Charpy.

Figura 4: Representação do Ensaio de Impacto Charpy e Izod



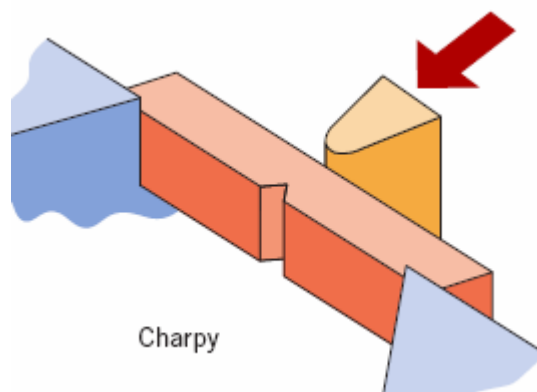
Fonte: Callister, 2020

Figura 5: Posição do CP no ensaio do tipo Izod



Fonte: Callister, 2020

Figura 6: Posição do CP no ensaio do tipo Charpy



Fonte: Callister, 2020

O ensaio de impacto Charpy é realizado em um equipamento que consiste em um pêndulo que é levantado até uma determinada altura e, em seguida, liberado para atingir uma amostra que é apoiada em uma posição horizontal. A quantidade de energia absorvida pela amostra durante a fratura é medida pelo deslocamento do pêndulo após a colisão. O ensaio de impacto Izod é semelhante ao Charpy, mas a amostra é fixada em uma posição vertical e o pêndulo atinge a amostra em um ponto próximo à base (Callister, 2020).

O ensaio Charpy é um dos mais utilizados para medir a tenacidade ao impacto dos materiais. Ele é particularmente útil para avaliar a capacidade de um material de absorver energia durante a deformação plástica, o que é um fator importante para o desempenho de componentes funcionais que podem ser expostos a cargas de impacto. O ensaio Charpy também é usado para avaliar a qualidade de soldas e revestimentos que podem ser apresentados a cargas de impacto (Pereira et al, 2021).

A tenacidade ao impacto é influenciada por muitos fatores, incluindo composição química do material, tipo de tratamento térmico, geometria da amostra e a velocidade de impacto. Esse ensaio é considerado uma ferramenta valiosa para avaliar a qualidade dos materiais e para identificar falhas potenciais em componentes remanescentes (Garcia; Spim; Santos, 2012).

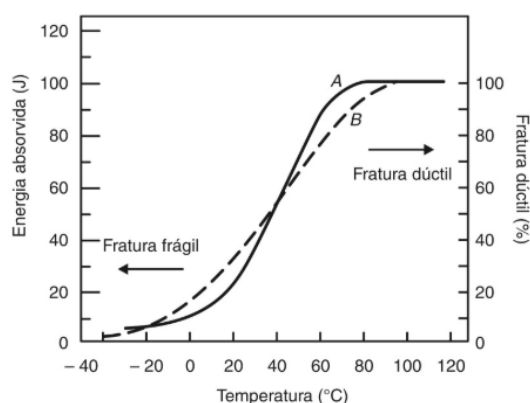
2.2.1.2 Fraturas

Há dois modos de fratura: frágil e dúctil. O que os difere é a possibilidade ou não do material se deformar na região de fratura. Quando a fratura acontece, com rápida propagação e sem nem uma deformação visível, se dá o nome de fratura frágil e está comumente

associado a esse tipo de fratura a nucleação e propagação de algumas trincas por clivagem, envolvendo fratura transgranular ao longo de planos cristalográficos específicos (Garcia, Spim; Santos, 2017).

A transição dúctil-frágil, Figura 7, está relacionada com a absorção da energia de impacto em relação à temperatura. Em temperaturas mais elevadas, a energia de impacto do corpo de prova é relativamente grande, o que corresponde a uma fratura dúctil. Conforme a temperatura é reduzida, a energia de impacto cai repentinamente ao longo de uma faixa de temperaturas relativamente estreita, abaixo da qual a energia possui um valor constante, porém pequeno, dessa maneira ocorre uma fratura frágil (Almeida, 2024).

Figura 7: Transição dúctil-frágil relacionada com a temperatura, a energia de impacto e a porcentagem de fratura dúctil (amostra de aço A283)



Fonte: Garcia; Spim; Santos, (2012)

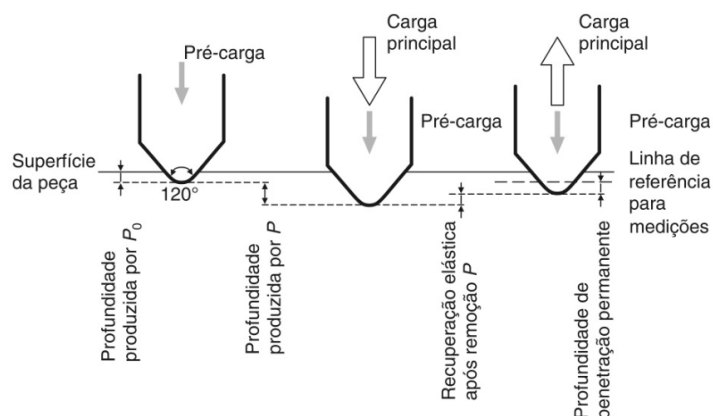
2.2.3 Ensaio de dureza

O autor Zarur (2017), classifica a dureza como uma propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente. Citando que a dureza de um material depende diretamente das forças de ligação entre átomos, íons ou moléculas, do escorregamento de planos atômicos, assim como da resistência mecânica.

Os ensaios de dureza mais utilizados hodiernamente são os ensaios Rockwell e Brinel e os de microdureza Vickers e o Knoop. O ensaio de dureza Rockwell é o mais usual internacionalmente, Zarur (2017) esclarece que esse ensaio utiliza da profundidade da impressão causada por um penetrador sob a ação de uma carga aplicada em dois estágios

(pré-carga e carga efetiva) como indicador da medida de dureza, e não há relação com a área da impressão, como no caso da dureza Brinell. Na Figura 8, observa-se esses estágios de aplicação de cargas. Esse ensaio é realizado com indentador esférico cônico de diamante com ângulo de 120° ou esferas de aço endurecida ou de carboneto de tungstênio.

Figura 8: Ensaio de dureza Rockwell



Fonte: Garcia; Spim; Santos, (2012)

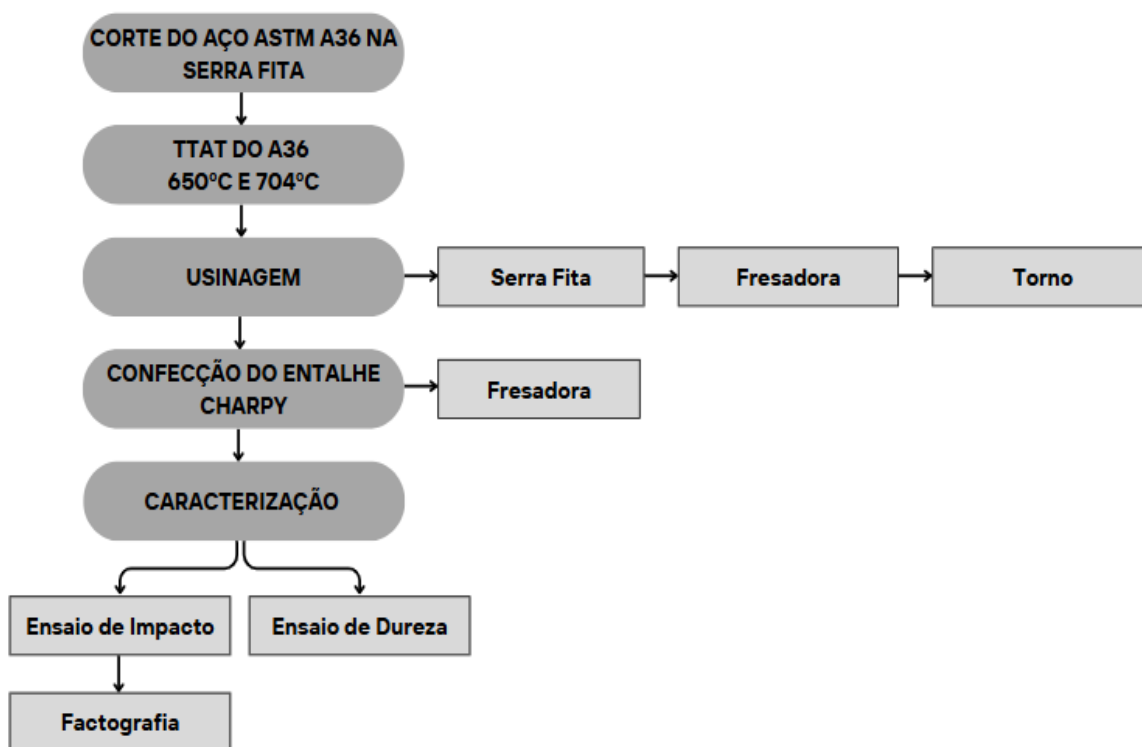
A aplicação da pré-carga é necessária para eliminar a ação de eventuais defeitos superficiais e ajudar na fixação do corpo de prova no suporte, além de causar pequena deformação permanente, eliminando erros causados pela recuperação do material devido à deformação elástica (Garcia; Spim; Santos, 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico serão abordados os materiais e métodos utilizados para a concepção e intuito do trabalho desenvolvido, baseando-se em estudos teóricos e práticos para avaliar a tenacidade ao impacto do aço ASTM A36 submetido a Tratamento Térmico de Alívio de Tensão à 650°C e 704°C.

No fluxograma exposto na Figura 9 é possível acompanhar a cronologia dos processos executados neste trabalho.

Figura 9: Fluxograma da sequência e subsequências dos processos adotados no estudo



Fonte: Autoria própria, (2025)

3.1 Preparação dos corpos de prova

3.1.1 Corte e TTAT

Para a realização deste estudo, foi utilizado uma chapa retangular do aço ASTM A36 laminado com 25,4 mm de espessura, 215 mm de largura, e 350 mm de comprimento, que pode ser observada na Figura 10. Já no Quadro 1, tem-se a composição química do aço

ASTM A36, tendo como principais elementos de liga carbono e manganês.

Figura 10: Chapa de aço A36



Fonte: Autoria própria, (2024)

Quadro 1: Composição química do aço A36

C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Demais Elementos
0,28%	0,6 - 0,9 %	0,04%	0,05%	0,04%	-	-	-

Fonte: Tenax Aços Especiais (https://www.tenax.com.br/tenax/wp-content/themes/rocco/pdfs/acos-para-construcao-mecanica/Catalogo_Construcao_Mecanica.pdf)

O procedimento experimental iniciou com o corte da chapa da Figura 10 (anterior) com o intuito de extrair as amostras para o Tratamento Térmico de Alívio de Tensão (TTAT). Na Figura 11 observa-se as duas amostras cortadas e prontas para TTAT, cujas dimensões foram 25,4 mm x 70 mm x 60 mm aproximadamente.

Figura 11: Amostras do aço A36 cortadas e prontas para o TTAT



Fonte: Autoria própria, (2024)

Em seguida, as chapas foram submetidas ao tratamento térmico, com temperaturas de 650°C e 704°C, tempo de permanência na temperatura de 6 horas, e posteriormente, resfriadas ao ar. Na Figura 12 observa-se o momento em que a chapa é retirada do forno, para a etapa de resfriamento, assim como visualiza-se o forno do tipo mufla Lucadema modelo Luca-2000G/DI usado nos tratamentos térmicos.

Figura 12: Retirada do aço do forno mufla



Fonte: Autoria própria, (2024)

Nas tabelas 1 e 2 observa-se o aquecimento do forno e as temperaturas registradas com o intervalo de tempo de aproximadamente 10 minutos, pois o forno não apresentava controle de aquecimento e obteve-se as taxas de aquecimento média de, aproximadamente, 9,28°C/min e 10,06°C/min para os TTATs à 650°C e 704°C respectivamente.

Tabela 1: Tempo, temperatura e taxa de aquecimento para o TTAT à 650° C

Tempo	Temperatura	Taxa de aquecimento
10 min	82°C	8,2°C/min
20 min	287°C	20,5°C/min
30 min	404°C	11,7°C/min
40 min	494°C	9°C/min
50 min	572°C	7,8°C/min
60 min	642°C	7°C/min
70 min	650°C	0,8°C/min

Fonte: Autoria própria, (2025)

Tabela 2: Tempo, temperatura e taxa de aquecimento para o TTAT à 704° C

Tempo	Temperatura	Taxa de aquecimento
10 min	29°C	2,9°C/min
20 min	267°C	23,8°C/min
30 min	411°C	14,4°C/min
40 min	519°C	10,8°C/min
50 min	607°C	8,8°C/min
60 min	692°C	8,5°C/min
70 min	704°C	1,2°C/min

Fonte: Autoria própria, (2025)

3.1.3 Usinagem

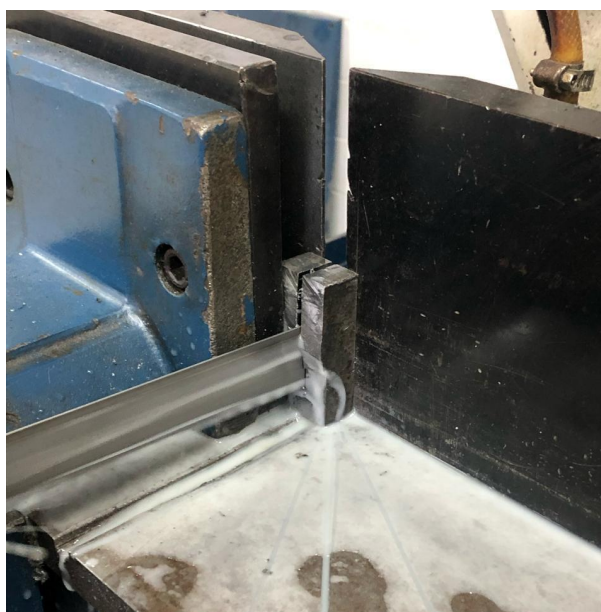
Após o resfriamento até a temperatura ambiente, cada chapa foi conduzida para serra fita, e cada bloco foi dividido em duas (Figura 13) e depois cada secção foi dividida em dois (Figura 14), resultando em seis barras através das quais confeccionou-se os 6 CPs de impacto.

Figura 13: Aço fragmentado em três blocos



Fonte: Autoria própria, (2024)

Figura 14: Secção do aço em dois



Fonte: Autoria própria, (2024)

Depois do processo de corte iniciou-se, no Laboratório de Soldagem e Usinagem da UFERSA – Campus Caraúbas, as etapas de fresamento e torneamento através dos equipamentos Eurostec modelo FTV-H6 e Manrod modelo MR-302, respectivamente. Nessas etapas ajustou-se o de esquadro e dimensões de acordo com a Norma da ABNT ISO 148-1 do ensaio do tipo Charpy. A usinagem na fresadora está representada na Figura 15, nesta é possível observar o fluido lubrificante resfriando a fresa, essa refrigeração tem a finalidade de evitar o aquecimento do corpo de prova, o que pode ocasionar a mudança de microestrutura e até mesmo o desgaste antecipado da ferramenta.

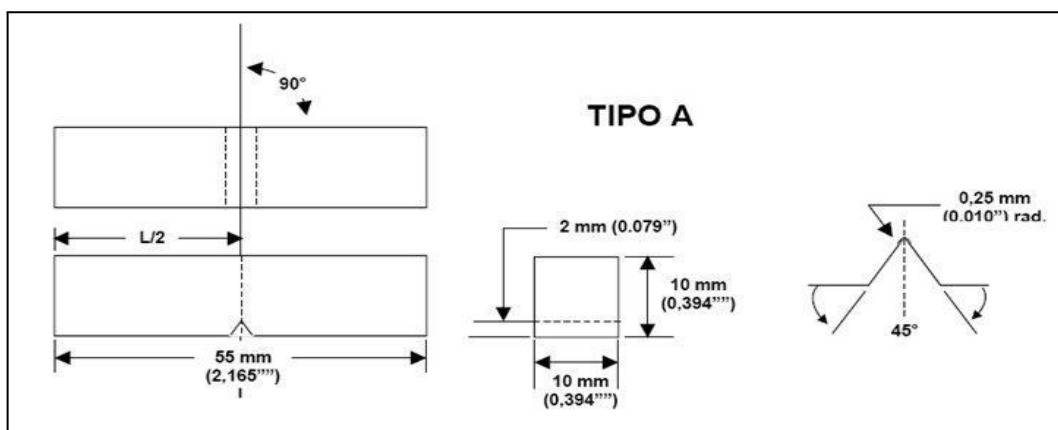
Figura 15: Usinagem do CP na fresadora



Fonte: Autoria própria, (2024)

Após a usinagem, a seção transversal dos CPs ficaram com $10 \pm 0,5$ mm e 55 mm de comprimento, e por fim foram realizados os entalhes em V, com aproximadamente 45° e 2 mm de profundidade no eixo transversal dos CPs de acordo com a Figura 16. Na Figuras 17 é possível observar essa fabricação do entalhe, assim como a ferramenta de ângulo duplo e o corpo de prova montados na fresadora.

Figura 16: Padronização do CP para o ensaio do tipo Charpy de acordo com a ISO 148-I



Fonte: Laboratório Metarlugico - LabTeste (<https://www.labteste.com.br/ensaio-impacto-charpy>)

Figura 17: Usinagem do entalhe



Fonte: Autoria própria, (2024)

3.2 Ensaaios

3.2.1 Ensaio de Impacto Charpy

Após serem feitos os entalhes, os seis corpos de prova de impacto, do tipo Charpy foram levados ao Laboratório de Ensaaios do curso de Engenharia Mecânica da UFERSA - Campus Mossoró, para ser feito o ensaio de impacto na Máquina pendular DB300 que realiza medidas de resistência ao impacto em Joules (0-300J), que está representado na Figura 18.

Figura 18: Máquina pendular utilizada no ensaio Charpy



Fonte: Universal Testing Machine (<https://www.hydraulicuniversaltestingmachine.com/pt/about>)

3.2.2 Ensaio de Dureza Rockwell

O ensaio de dureza Rockwell foi realizado no Laboratório de Ensaaios Mecânicos e Metalografia da UFERSA - Campus Caraúbas, com um Durômetro Mitutoyo HR – 320MS, seguindo a norma ASTM E18. Na Figura 19 tem-se uma imagem do equipamento, juntamente com o corpo de prova.

Figura 19: Durômetro Mitutoyo



Fonte: Autoria própria, (2024)

O indentador escolhido para o ensaio foi a esfera de carbeto de tungstênio com 1,59 mm de diâmetro, que está associado a uma carga de 981 N, tais critérios atendem a escala HRB. Foram empregadas oito indentações nos corpos de prova para cada condição de processamento térmico, na Figura 20 pode-se observar as indentações realizadas.

Figura 20: Indentações no CP



Fonte: Autoria própria, (2024)

3.3 Mecanismos de fratura

Diante do ensaio de impacto utilizado, e a submissão dos CPs em diferentes faixas de temperatura foi avaliado a energia absorvida pelo material durante a fratura e a transição dúctil-frágil de tal, observando a olho nu e identificando através das imagens capturadas se o aço apresenta fratura dúctil ou frágil. Onde o comportamento dúctil, é confirmado por uma ampla deformação plástica e sua superfície de aspecto fibroso e a frágil por uma fratura brusca e com aparência cristalina. Após o ensaio de impacto, a superfície de fratura foi protegida com um algodão para manter suas características de ruptura mais autênticas possíveis e posteriormente, foi fotografada com uma câmera de 12 megapixels.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

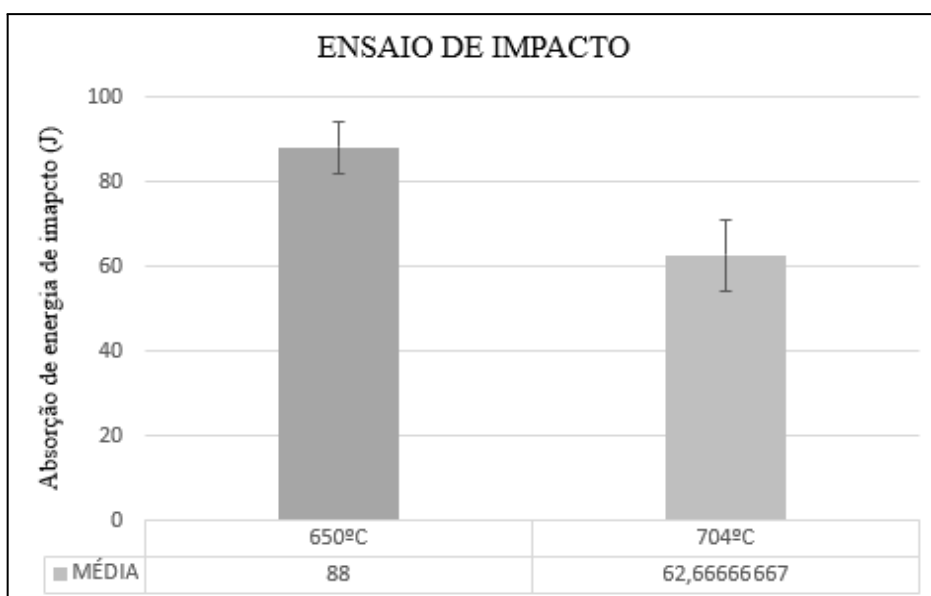
Neste tópico, tem-se os resultados obtidos nos experimentos realizados no aço ASTM A36 em condições variadas de tratamento térmico, bem como a análise deste.

4.1 Ensaaios

4.1.1 Ensaio de Impacto Charpy

No Gráfico 1 e no Quadro 2, tem-se os resultados dos ensaios de impacto do aço A36 laminado e com TTAT para ambas temperaturas consideradas neste estudo, 650°C e 704°C. Considerando a energia absorvida média para o processamento térmico à 650°C (coluna cinza escuro) tem-se um valor de 88 ± 6 J. Já para a temperatura de 704°C (coluna cinza claro) a energia absorvida média ficou em $60 \pm 8,3$ J. Ou seja, o aço submetido ao TTAT à 704°C teve uma redução de aproximadamente, 22% na sua energia de impacto. Esse resultado pode está associado a dois fatores, o primeiro um possível crescimento de grãos, pois em temperaturas elevadas os grãos podem crescer e consequentemente gerar a redução da resistência ao impacto (Viana, 2019). Já o segundo seria as variações geométricas e de acabamento superficial decorrentes da usinagem dos corpos de prova, os autores Diniz; Marcondes; Coppini (2014) citam que essas variações podem gerar alterações na tenacidade.

Gráfico 1: Ensaio de impacto nas duas condições de temperatura



Fonte: Autoria própria, (2024)

Quadro 2: Resultados do ensaio de impacto Charpy

	650°C	704°C
	82 J	56 J
	88 J	60 J
	94 J	72 J
MÉDIA	88 J	60 J
D. PADRÃO	6	8,326664

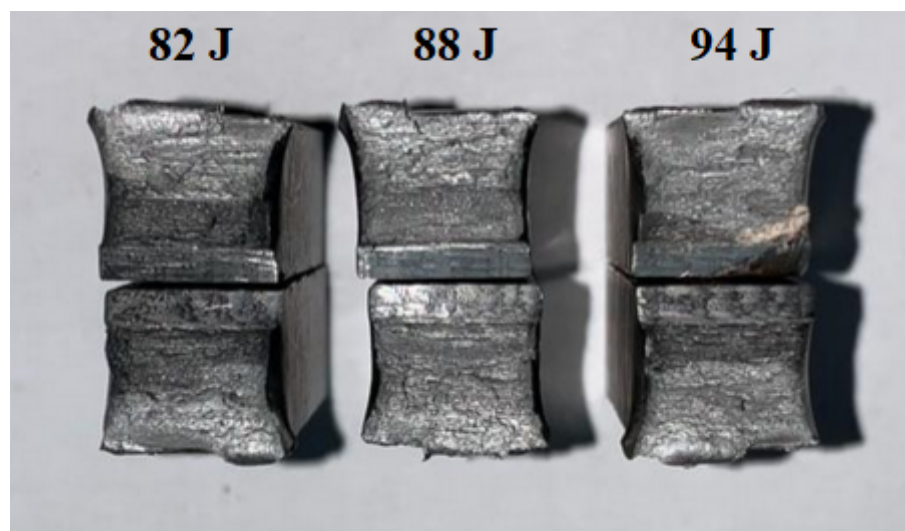
Fonte: Autoria própria, (2024)

4.1.2 Superfície de fratura

Nesta seção serão apresentadas as características das superfícies de fratura dos corpos de prova de impacto para a verificação do mecanismo de fratura existente no aço A36 laminado e com TTAT. Portanto, nas Figuras 21 e 22, tem-se as imagens das superfícies de fratura, correspondentes, respectivamente, aos tratamentos à 650°C e 704°C.

Para a condição do aço laminado e com TTAT à 650°C, Figura 21, as três superfícies de fratura apresentaram características dúcteis, pois de acordo com Garcia; Spim; Santos (2012), a superfície de fratura dúctil mostra-se com regiões de contração e expansão na seção transversal e um aspecto fibroso.

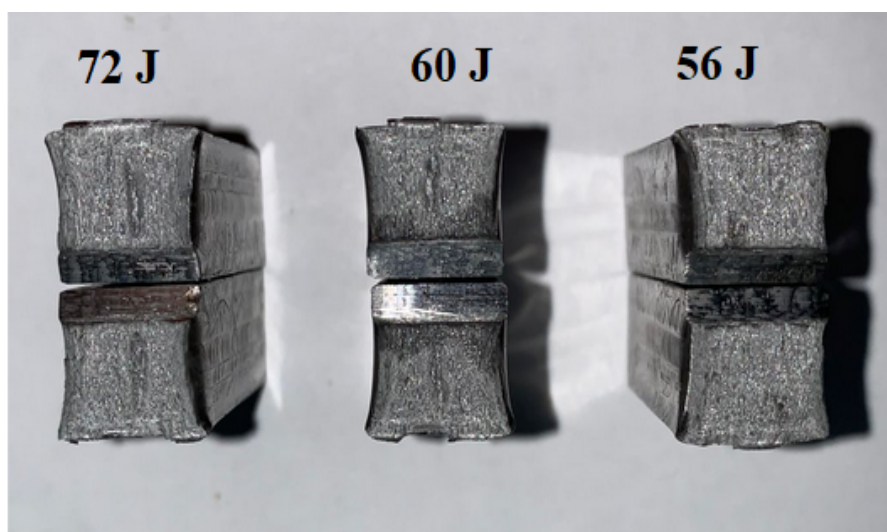
Figura 21: Vistas dos CPs rompidos para análise da seção de fratura na temperatura de 650°C



Fonte: Autoria própria, (2024)

Com relação a Figuras 22, observa-se que as faces da seção transversal apresentam pequenas distorções e uma superfície de fratura pouco fibrosa, ou seja, um mecanismo de fratura frágil ficou mais evidente, principalmente quando comparado com a imagem da Figura 21. Além disso, a energia absorvida nos ensaios de impacto dos corpos de prova de 650°C foi maior que o material de 704°C, corroborando com as imagens das Figuras 21 e 22.

Figura 22: Vistas dos CPs rompidos para análise da seção de fratura na temperatura de 704°C

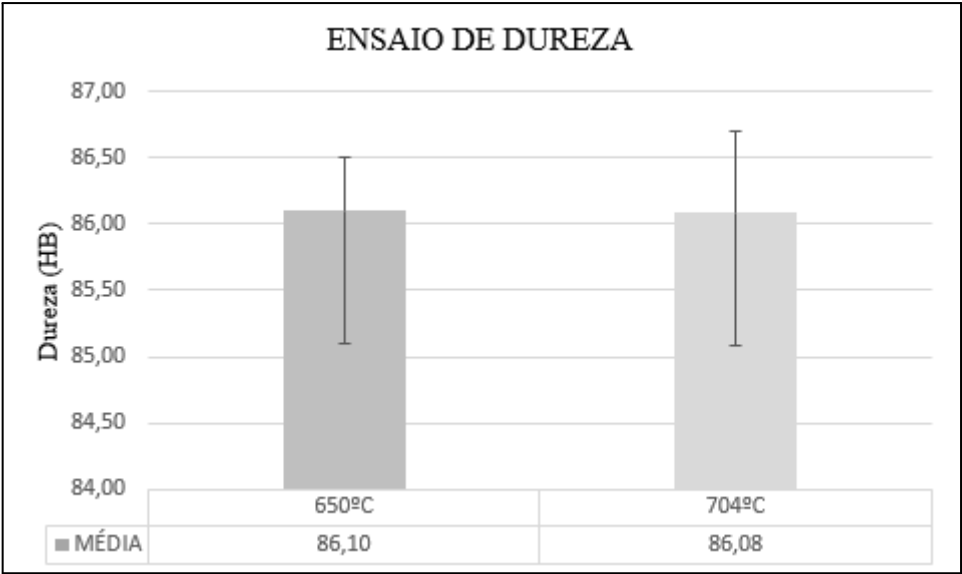


Fonte: Autoria própria, (2024)

4.1.3 Ensaio de Dureza Rockwell

No Gráfico 2 e no Quadro 3, constam os valores obtidos no teste de dureza Rockwell escala B (HRB), do aço A36 laminado e com TTAT, sendo a coluna cinza escuro associada ao TTAT à 650 °C e cinza claro para o tratamento realizado à 704°C. Nota-se que os valores encontrados nas peças das temperaturas 650°C e à 704°C tiveram variações próximas, onde à 650°C obteve $86,10 \pm 0,40$ HRB e à 704°C $86,08 \pm 0,62$ HRB, isso pode ter ocorrido devido a microestrutura ter se comportado de maneira semelhante em ambas as condições, ou seja, o tratamento térmico pode não favorecer a ocorrência de nenhuma transformação de fase. Quando se compara o comportamento de dureza com o de tenacidade, tem-se uma divergência, pois, conforme citado no item 4.1.1, a tenacidade apresentou uma redução 22% com o aumento da temperatura de TTAT. Essa divergência pode estar associada ao acabamento superficial e variações geométricas dos corpos de prova de impacto.

Gráfico 2: Ensaio de Dureza Rockwell



Fonte: Autoria própria, (2024)

Quadro 3: Ensaio de dureza Rockwell nas duas condições de temperatura

	650°C	704°C
	85,5 HRB	85,1 HRB
	86,3 HRB	86,1 HRB
	86,5 HRB	86,5 HRB
	86,4 HRB	86,5 HRB
	86,2 HRB	86,7 HRB
	85,7 HRB	85,6 HRB
MÉDIA	86,10 HRB	86,08 HRB
D. PADRÃO	0,404969	0,621021

Fonte: Autoria própria, (2024)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto, o intuito do trabalho de avaliar o comportamento de tenacidade ao impacto do aço ASTM A36 em condições variadas de processamento térmico foi concluído, onde os dados coletados e o estudo realizado mostraram as diferentes condições e maneiras que o material se comportou durante a avaliação. Desse modo é possível afirmar que:

- A tenacidade à fratura do aço A36 apresentou uma tendência de redução à medida que a temperatura de TTAT aumentou de 650 °C para 704 °C, sendo essa redução de aproximadamente 22%. Considerando que a dureza do material não teve alteração com o aumento da temperatura de TTAT, possivelmente, esse comportamento de tenacidade ao impacto esteja associado às variações geométricas e de acabamento superficial dos corpos de prova de impacto;
- O aço A36 tratado termicamente à 650°C apresentou mecanismo de fratura predominantemente dúctil, com a presença de contração e expansão na região do entalhe. Enquanto que, para a temperatura de 704°C, a superfície de fratura apresentou-se frágil de aspecto cristalino e, praticamente, sem contrações e expansões;
- Os parâmetros de tratamento térmico adotados não promoveram alterações significativas na dureza do aço A36, sugerindo a ausência de transformações de fase relevantes.

REFERÊNCIAS

ALLGAYER, A. A. **CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E METALÚRGICAS DE UMA JUNTA DE AÇO ASTM A36 SOLDADO PELO PROCESSO DE ARCO SUBMERSO (SAW) COM DIFERENTES APORTES TÉRMICOS**. 2017. 70 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Vale do Taquari, 2017. Disponível em: <https://www.univates.br/bduserver/api/core/bitstreams/34fd089b-5d97-469c-92f4-594c165bd22e/content>. Acesso em: 25 fev. 2024.

ALMEIDA, Julio Cezar de. **Projeto mecânico: enfoque baseado na fadiga e na mecânica da fratura**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2024. *E-book*. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 01 abr. 2025.

ALMEIDA, Monica Santos. **Análise comparativa da microestrutura e da dureza do aço ASTM A182 F22**. 2018. Monografia – Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/13718>. Acesso em: 25 fev. 2024.

ANTOLIN, G. D. C.; ANTOLIN, M. C.; SILVA, O. W. **Correlação entre as propriedades mecânica e microestruturais dos aços navais - A36**. Revista Naval e Oceânica, Rio de Janeiro, v.1, p. 1-14, setembro, 2023. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/rno/article/view/76261/51778>. Acesso: 13 mar. 2025.

ASTM INTERNACIONAL. **ASTM A36/A36M-19: Especificação padrão para aço estrutural de carbono**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021. Disponível em: <https://drive.google.com/drive/u/1/folders/14URLZzf-smFpkt1ScpMMY8sliHD1BGqi>. Acesso em: 25 fev. 2024.

ASTM. **ASTM A941 – Standard Terminology Relating to Steel, Stainless Steel, Related Alloys, and Ferroalloys**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2021.

CALLISTER, W. D. J. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2020. E-book. ISBN 9788521637325. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521637325/>. Acesso em: 25 fev. 2024.

CAVALCANTE, Fabrício José Nóbrega. **Influência do hidrogênio na**

tenacidade quase estática de uma junta soldada dissimilar constituída de aço AISI 8630m amanteigado com er80s-d2. 2014. 127 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/5380>. Acesso em: 26 nov. 2023.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais tratamentos térmicos principais tipos.** 7. ed. São Paulo: Abm, 2012. Disponível em: https://www.academia.edu/37125289/_A%C3%A7os_Ferros_Fundidos_Vicente_Chiaverini. Acesso em: 09 de out. 2024

CLAUSSEN, E. V. R.; CARMO, N. C. **Influência de parâmetros de soldagem nas propriedades de juntas soldadas pelo processo GTAW com Inconel 625 em aço API 5L X70.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Centro Federal de Educação e Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <http://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/Influ%C3%Aancia%20Par%C3%A2metros%20de%20Soldagem%20nas%20Propriedades%20de%20Juntas%20Soldadas%20pelo%20Processo%20GTAW%20com%20Inconel%20625%20em%20A%C3%A7os%20API%205L%20X70.pdf>. Acesso em: 26 nov. 2023.

COSTA, M. R. M. **A utilização do aço ASTM A36 em pontes rolantes.** 2017. 56f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Acesso em: 25 fev. 2024.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., & Coppini, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** São Paulo: Artliber Editora, 2014. Disponível em: https://www.artliber.com.br/amostra/tecnologia_da_usinagem.pdf. Acesso em: 03 abr. 2025.

DUTRA, W. T.; MACHADO, I. G. **Influência do Pré-aquecimento Indutivo Localizado sobre Características Metalúrgicas de Juntas Soldadas.** Soldagem & Inspeção, v. 22, n. 3, p. 333–342, jul. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI2203.10>. Acesso em: 27 nov. 2023.

ASTM

GALLO, Giulliano Batelochi. **INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE A TENACIDADE DE UM AÇO AISI SAE 1045 COM MÉDIO TEOR DE CARBONO, AVALIADA POR ENSAIOS DE IMPACTO**. 2006. Dissertação de Mestrado - Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais, Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, São Paulo, 2006. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/97094> . Acesso em: 26 nov. 2023.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A.; SANTOS, Carlos Alexandre dos. **Ensaio dos Materiais, 2ª edição** . Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2012. E-book. ISBN 978-85-216-2114-0. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/978-85-216-2114-0/>. Acesso em: 26 nov. 2023.

GROOVER, Mikell P. **Introdução aos Processos de Fabricação** . Rio de Janeiro: LTC, 2014. E-book. pi ISBN 978-85-216-2640-4. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2640-4/>. Acesso em: 09 mar. 2025.

NBR ISO148-1 DE 04/2021 - Materiais metálicos - Ensaio de impacto por pêndulo Charpy - Parte 1: Método de ensaio. Disponível em: <https://www.normas.com.br/autorizar/visualizacao-nbr/33653/identificar/visitante>. Acesso em: 02 abr. 2025.

NOVIKOV, I., **Teoria dos Tratamentos Térmicos dos Metais**, Rio de Janeiro, Editora UFRJ, 1994. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/596191326/NOVIKOV-ILIA-Teoria-dos-Tratamentos-Termicos-dos-Metais-pdf>. Acesso em: 30 mar. 2025.

PEREIRA, L., Blas, J., Griza, S., & Darwish, F. **Uso de ensaios charpy instrumentados na caracterização da tenacidade à fratura de materiais metálicos**. 2021. Artigo -Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/2176-1523.20212469>. Acesso em: 16 mar. 2025.

SALDANA-GARZA, E. **Mechanical Properties and Microstructure of Large Steel Forgings for Applications in the Energy Sector**. 2017. Phd em Filosofia - The University of

Sheffield. Departamento de Ciências dos Materiais e Engenharia, Reino Unido, 2017. Disponível em:
<https://etheses.whiterose.ac.uk/18005/1/PhD%20Thesis%20Edgar%20Saldana%20Aug2017-Final%20Version-.pdf>. Acesso em: 06 jan. 2025.

SILVA, André Luiz de V. da Costa e; Mei, Paulo Roberto. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda. 2010. Disponível em:
https://www.google.com.br/books/edition/A%C3%A7os_e_ligas_especiais/phmzDwAAQBAJ?hl=pt-BR&gbpv=1&pg=PA1&printsec=frontcover. Acesso em: 09 out. 2024.

SILVA, Danrley Sena e. **INFLUÊNCIA DA HIDROGENAÇÃO NA TENACIDADE AO IMPACTO DO AÇO 1045 PARA CONDIÇÕES VARIADAS DE PROCESSAMENTO TÉRMICO**. 2021. 51p. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2021. Disponível em:
<https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/8186>. Acesso em: 25 fev. 2024.

SILVA, Jardel Freire da. **Estudo sobre proteção contra corrosão do metal em ambiente salina**. 2020. Monografia – Curso de Ciência e Tecnologia, Departamento das Ciências Exatas e Naturais, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2020. Disponível em:
<https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/34e19c83-bddf-4f99-a487-0341ba9d4ef6/content>. Acesso em: 25 mar. 2024.

VENTRELLA, V. A. et al. **MICROESTRUTURAL DO METAL DE SOLDA DE PERFIS SOLDADOS DE UM LADO SÓ UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 2011. Artigo - Departamento de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2011. Disponível em:
<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/maprotec/cobef20030558.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2024.

VIANA, Davila de Oliveira. **TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇO CARBONO ASTM A36 E SUA INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia de Metalúrgica, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em:
https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/49232/1/2019_tcc_doviana.pdf. Acesso em: 07 jan. 2025.

ZARUR, G. D. **ANÁLISE DE ENSAIOS DE DUREZA EM AÇOS DE CONSTRUÇÃO MECÂNICA EM DIVERSOS ESTADOS**. 2017. Artigo - Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/59656627/Artigo_3_-_Ensaio_de_Dureza20190610-67157-c6kkay-libre.pdf?1560220311=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DANALISE_DE_ENSAIOS_DE_DUREZA_EM_ACOS_DE.pdf&Expires=1742189071&Signature=Y~O0zYj2~D2ctYU-xpeY5O37EOOHqeyc0VUG3UPzMRDcGJdN~UmrORylpzLFb~kd7jVqkNIZMQkCprf1MRm6uluasC4GtJHuPno2UwNBjYJXX60zVjxPq6cjkj-clBcZPE3D8shu-YYta9KYDoamy23Y8BRkkxNnsfOf9Ztg9iVBvwaAlnjZI-UTdffiTRmV0JGfJFz0bwEaFoNkDfluTeSr1Mdv7bLw3hCzbqevI8S61y-GBXuaGA2WLLI0LkReY5kW7Gb2SVHRgQlTivabW4c9mnX7n~5xTkTqVM7P0OWd9ak7H8GM76u~D3edT7E2ddTfP83hby08GXjKMjYSMA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA Acesso: 16 mar. 2025.

ZORZI, J. C. de S.; MELO, T. M. F. de; SANTOS, D. B. **EFEITO DA TEMPERATURA DE RECOZIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA MICROESTRUTURA DE UM AÇO COM ALTO TEOR DE Mn LAMINADO A FRIO**. Laminação Rolling, 51º Seminário de Laminação Processos e Produtos Laminados e Revestidos - Internacional. p. 207 - 217. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/en/article/download-pdf/efeito-da-temperatura-de-recozimento-nas-propriedades-mecnicas-e-na-microestrutura-de-um-ao-com-alto-teor-de-mn-laminado-a-frio>. Acesso em: 25 fev. 2024.