



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PABLO VINICIUS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE TENACIDADE DE AÇOS-LIGA
SUBMETIDOS A PROTEÇÃO CATÓDICA.**

CARAÚBAS-RN

2025

PABLO VINICIUS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE TENACIDADE DE AÇOS-LIGA
SUBMETIDOS A PROTEÇÃO CATÓDICA.**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Aiana Nascimento Silva,
Profa. Dra.

CARAÚBAS-RN

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.

S586a Silva, Pablo Vinicius da.
Avaliação do comportamento de tenacidade de aços-
liga submetidos a proteção catódica / Pablo
Vinicius da Silva. - 2025.
64 f. : il.

Orientadora: Adiana Nascimento Silva.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2025.

1. offshore. 2. proteção catódica. 3. ensaio
Charpy. 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.

PABLO VINICIUS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE TENACIDADE DE AÇOS-LIGA
SUBMETIDOS A PROTEÇÃO CATÓDICA.**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 27 / 03 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

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

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

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a uma pessoa que nos deixou tão cedo, mas que sempre será lembrada com muito carinho e admiração. Tio César, espero um dia ser, ao menos, metade da pessoa maravilhosa que o senhor foi. (In Memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado força pra chegar até o final dessa etapa da minha vida, por estar comigo em todos os momentos (fossem eles bons ou ruins).

Minha gratidão aos meus pais, Ana Nere e José Amaro, é algo que palavras jamais poderão expressar completamente. Tenho plena certeza de que, sem o empenho, o apoio incondicional (tanto emocional quanto financeiro) e a força de vocês, eu não teria chegado até aqui. Mãe, obrigada por todas as orações. Sei que, muitas vezes, você acordava na madrugada, se ajoelhava e pedia a Deus por mim, e isso nunca passará despercebido. O amor e a dedicação de vocês são o que me sustentaram em cada passo dessa jornada. A vocês, meus pais, todo o meu amor, respeito e eterna gratidão. Sem vocês, nada disso seria possível.

Quero expressar minha eterna gratidão à minha avó Ilza, que sempre esteve ao meu lado com tanto amor e apoio durante toda a minha trajetória acadêmica. Suas orações, seu carinho e dedicação foram pilares fundamentais para que eu chegasse até aqui. Admiro profundamente a senhora, não apenas pela força, mas também pelo amor imensurável que sempre demonstrou por mim. Amo a senhora demais, e sou eternamente grato por tudo.

Quero expressar minha profunda gratidão à minha orientadora, Adiana, por todo o apoio incondicional e pela orientação durante a construção deste trabalho. Seus conselhos, não apenas acadêmicos, mas também sobre a vida, foram fundamentais para minha jornada. Saiba que, para mim, a senhora é muito mais do que uma orientadora, é uma amiga que admiro profundamente. Torço sempre pelo melhor para você, porque merece tudo de bom que a vida tem a oferecer. Que Deus abençoe imensamente sua vida e que você continue com esse coração generoso e gigantesco. A senhora conquistou minha eterna admiração e respeito

Agradeço a Banca Examinadora por se dispor a avaliar o meu trabalho e também dar sugestões para enriquecer mais esse trabalho. Grato.

Agradeço também ao professor Wendell e o técnico em mecânica do campus Caraúbas, Samir, por todo o apoio durante o processo de usinagem e corte dos corpos de prova, o apoio de vocês foi essencial.

Agradeço também aos meus colegas de grupo de pesquisa, Gean e Fernanda, todos os finais de semana abdicados e até mesmo férias para realização da nossa pesquisa.

Sou profundamente grato à minha tia Ana Cléia, que me ensinou o verdadeiro significado de ser forte. Mesmo no momento de dor mais profunda, ao perder uma das pessoas que a senhora mais amava, se manteve firme e se tornou o pilar da sua família. Para mim, a senhora é um exemplo vivo de força, coragem e resiliência. Obrigado por tudo, tia. Pelos conselhos, pela sabedoria que sempre compartilhou comigo, e, principalmente, por todo o amor e carinho que sempre fez questão de demonstrar. Sou eternamente grato por ter você em minha vida.

Sou imensamente grato aos amigos que o ensino médio me proporcionou: Hávila, Ially, Mariana e Hian. Agradeço de coração por todo o apoio e força que sempre me ofereceram. Nos momentos em que estávamos juntos, parecia que o tempo não havia passado, como se nunca tivéssemos nos separado, apesar dos anos. Em especial a você, Hávila, minha pessoa, minha confidente, minha 'Umbrella'. Não existem palavras que possam expressar o quanto te admiro e o quanto o meu amor por você é grande. Sou eternamente grato a Deus por ter te colocado na minha vida. Mesmo estando distantes, em regiões diferentes, nossos corações estarão sempre conectados. Obrigado por tudo. Amo vocês.

Quero expressar minha eterna gratidão aos meus amigos de graduação: Josilândia, Giovanni, Felipe e Ana Carla. Sou profundamente grato a cada um de vocês, que sempre estiveram ao meu lado, me dando força e me incentivando a seguir em frente. Vocês confiaram no meu potencial quando, muitas vezes, eu mesmo duvidava de mim. Amigos da graduação que, na verdade, são mais do que isso: são irmãos e irmãs de jornada, companheiros que levarei para toda a minha vida. O carinho, o apoio e a amizade de vocês são insubstituíveis. Amo vocês imensamente.

RESUMO

A produção de petróleo em águas profundas representa um grande desafio, impulsionando o aperfeiçoamento dos sistemas offshore. Nessa aplicação, são atingidas profundidades superiores a sete mil metros, exigindo o uso de materiais com propriedades mecânicas e metalúrgicas especiais. Isso se deve às condições extremas, como altas temperaturas e pressões, além da suscetibilidade à corrosão e à ação do hidrogênio. Além disso, falhas nessas estruturas causaram derramamentos de petróleo, gerando impactos ambientais, danos à saúde humana e até perda de vidas. Esse trabalho faz parte de pesquisas que consideram os processamentos mecânico e térmico dos materiais utilizados em componentes soldados do sistema offshore. Considerando que esses componentes demandam o emprego de tratamentos térmicos pós soldagem, esse trabalho trata da aplicação do aço-ligas ASTM A182 F22 (F22) e ASTM A36 (A36) como fornecido, ou seja, aplicou-se os aços nos estados forjado e laminado, respectivamente. Nesse estudo considerou-se o comportamento de tenacidade ao impacto e dureza de aço-liga, F22 cortado na direção longitudinal e transversal do tarugo, e A36 cortado apenas na direção longitudinal (direção que é utilizada nas aplicações de componentes soldados no sistema *offshore*), para a condição com proteção catódica. Ambos os materiais passaram por um Tratamento Térmico de Alívio de Tensão (TTAT), para o F22 as temperaturas foram de 650 °C e 677 °C e para o A36 empregou-se 650 °C e 704 °C, com duração de 6 horas e resfriamento ao ar. A tenacidade foi avaliada por meio do ensaio de impacto Charpy e a dureza pelo ensaio Rockwell. Os corpos de prova foram submetidos à proteção catódica por 336 horas. O sistema de proteção catódica demonstrou-se eficiente, impedindo a oxidação dos corpos de prova de impacto e não promoveu alterações significativas na tenacidade ao impacto dos aços testados. Essa conclusão foi baseada na comparação dos valores de tenacidade com os encontrados na literatura para a condição sem proteção catódica e sob as mesmas condições experimentais. A energia absorvida durante o impacto foi maior nos corpos de prova do aço F22 extraídos longitudinalmente, registrando $144,66 \pm 17,47$ J à temperatura de 650°C e $161,33 \pm 18,47$ J à temperatura de 677°C. Seguido do aço A36 que apresentou $80 \pm 13,85$ J à temperatura de 650°C e, à temperatura de 704°C, obteve um valor de $68,667 \pm 10,26$ J. Por fim, a menor tenacidade foi observada para o aço F22 extraído transversalmente cujos valores foram de $28,66 \pm 5,03$ J à temperatura de 650°C e $37 \pm 12,12$ J à temperatura de 677°C. Assim, o F22 na orientação longitudinal apresentou melhor comportamento de tenacidade. Além disso, ao analisar os valores de desvio padrão, o TTAT não influenciou na tenacidade de ambos os aços. O aumento de temperatura de TTAT também não influenciou na resposta de dureza do material.

Palavras-chave: *offshore*; proteção catódica; ensaio Charpy.

ABSTRACT

Deepwater oil production represents a major challenge, driving the improvement of offshore systems. In this application, depths of over seven thousand meters are reached, requiring the use of materials with special mechanical and metallurgical properties. This is due to the extreme conditions, such as high temperatures and pressures, in addition to the susceptibility to corrosion and the action of hydrogen. In addition, failures in these structures have caused oil spills, generating environmental impacts, harm to human health and even loss of life. This work is part of research that considers the mechanical and thermal processing of materials used in welded components of the offshore system. Considering that these components require the use of post-weld heat treatments, this work deals with the application of ASTM A182 F22 (F22) and ASTM A36 (A36) alloy steels as supplied, that is, the steels were applied in the forged and rolled states, respectively. This study considered the impact toughness and hardness behavior of alloy steels, F22 cut in the longitudinal and transverse directions of the billet, and A36 cut only in the longitudinal direction (direction used in applications of welded components in the offshore system), for the condition with cathodic protection. Both materials underwent a Stress Relief Heat Treatment (PWHT). For F22, the temperatures were 650 °C and 677 °C, and for A36, 650 °C and 704 °C were used, lasting 6 hours and cooling in air. The toughness was evaluated by means of the Charpy impact test and the hardness by the Rockwell test. The test specimens were subjected to cathodic protection for 336 hours. The cathodic protection system proved to be efficient, preventing the oxidation of the impact test specimens and did not promote significant changes in the impact toughness of the tested steels. This conclusion was based on the comparison of the toughness values with those found in the literature for the condition without cathodic protection and under the same experimental conditions. The energy absorbed during the impact was higher in the F22 steel specimens extracted longitudinally, registering 144.66 ± 17.47 J at a temperature of 650°C and 161.33 ± 18.47 J at a temperature of 677°C. Followed by the A36 steel, which presented 80 ± 13.85 J at a temperature of 650°C and, at a temperature of 704°C, obtained a value of 68.667 ± 10.26 J. Finally, the lowest toughness was observed for the F22 steel extracted transversely, whose values were 28.66 ± 5.03 J at a temperature of 650°C and 37 ± 12.12 J at a temperature of 677°C. Thus, F22 in the longitudinal orientation presented better toughness behavior. Furthermore, when analyzing the standard deviation values, PWHT did not influence the toughness of both steels. The increase in PWHT temperature also did not influence the hardness response of the material.

Keywords: *offshore*; cathodic protection; Charpy test..

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Microestrutura AÇO ASTM F22 em corte Longitudinal e grau de ampliação 5x	17
Figura 2 - Processo de forjamento livre	19
Figura 3 - Processo de forjamento em matriz	19
Figura 4 - Processo de laminação e recristalização.	20
Figura 5 - Proteção catódica com anodo galvânico	21
Figura 6 - Proteção Catódica. A) corrente galvânica. B) corrente impressa.	22
Figura 7 - Estruturas cristalinas de face centrada e de corpo centrado com sítios...24	
Figura 8 - Superfície de fratura do ensaio de impacto no aço SAE 1020	26
Figura 9 - Fluxograma sintetizando todas etapas práticas que foram realizadas	27
Figura 10 - Serra fita mecânica Clark SF250.....	28
Figura 11 - Direções de extração dos corpos de prova do aço ASTM A182 F22 forjado.	29
Figura 12 - Direção de extração dos corpos de prova do aço ASTM A36 laminado.29	
Figura 13 - Forno tipo mufla Lucadema modelo Luca – 2000G/DI	30
Figura 14 - Dimensões do corpo de prova charpy.....	31
Figura 15 - Fresadora Eurostec modelo FTV-H6.....	32
Figura 16 - Torno mecânico Manrod modelo MR-302	32
Figura 17 - Fresadora montada para realização do entalhe	33
Figura 18 - Cuba montada para realização da proteção catódica	35
Figura 19 - Sistema montado para realização da proteção catódica.....	36
Figura 20 - Máquina de ensaio de impacto charpy modelo JB-W300A	37
Figura 21 - Corpo de prova posicionado para a realização do ensaio de impacto charpy	38
Figura 22 - Durômetro Mitutoyo HR – 320 MS.	38
Figura 23 - Corpos de prova no aparato de proteção catódica.....	40
Figura 24 - Tenacidade ao impacto no aço ASTM A36 com proteção catódica.	42
Figura 25 - Tenacidade ao impacto no aço ASTM A182 F22 cortado transversalmente com proteção catódica.....	43
Figura 26 - Energia absorvida ao impacto no aço ASTM A182 F22 cortado longitudinalmente com proteção catódica	45

Figura 27 - Comparativo de tenacidade para todas as temperaturas aplicadas de TTAT para F22 com proteção e sem proteção catódica.	47
Figura 28 - Comparativo de tenacidade para todas as temperaturas aplicadas de TTAT para A36 com proteção e sem proteção catódica.	48
Figura 29 - Superfície de fratura dos corpos de prova do Aço A36 a 650 °C com Proteção Catódica.....	49
Figura 30 - Superfície de fratura dos corpos de prova do Aço A36 a 704°C com Proteção Catódica.....	50
Figura 31 - Superfície de fratura dos corpos de prova do Aço F22 longitudinal a 650°C com Proteção Catódica	50
Figura 32 - Superfície de fratura dos corpos de prova do Aço F22 longitudinal a 677°C com Proteção Catódica	51
Figura 33 - Superfície de fratura dos corpos de prova do Aço F22 TRANSVERSAL a 650°C com Proteção Catódica	51
Figura 34 - Superfície de fratura dos corpos de prova do Aço F22 TRANSVERSAL a 677°C com Proteção Catódica	52
Figura 35 - Valores de dureza Brinell para o aço ASTM A36 nas duas condições de TTAT.	53
Figura 36 - Valores de dureza Brinell para o aço ASTM A182 F22 cortado longitudinalmente nas duas condições de TTAT.....	54
Figura 37 - Valores de dureza Brinell para o aço ASTM A182 F22 cortado transversalmente nas duas condições de TTAT.	55
Figura 38 - Comparativo de dureza para todas as temperaturas aplicadas de TTAT.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química, em peso, do aço ASTM 182 F22 e ASTM A36.....	28
Tabela 2 - Taxa de aquecimento do forno para cada temperatura do TTAT	30
Tabela 3 - Tenacidade ao impacto nos corpos de prova do aço ASTM A36 com proteção catódica.	42
Tabela 4 - Tenacidade ao impacto nos corpos de prova do aço ASTM A182 F22 extraído transversalmente e com proteção catódica.	44
Tabela 5 - Tenacidade ao impacto nos corpos de prova do aço ASTM A182 F22 extraído longitudinalmente e com proteção catódica.	45
Tabela 6 - Valores de dureza Brinell para o aço ASTM A36 nas duas condições de TTAT.	53
Tabela 7 - Valores de dureza Brinell para o aço ASTM A182 F22 cortado longitudinalmente nas duas condições de TTAT.....	54
Tabela 8 - Valores de dureza brinell para o aço ASTM A182 F22 cortado transversalmente nas duas condições de TTAT.	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS.....	15
2.1	OBJETIVO GERAL.....	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
3.1	AÇO ASTM A182 F22.....	16
3.2	AÇO ASTM A36.....	17
3.3	PROCESSOS DE CONFORMAÇÃO MECÂNICA	18
3.3.1	FORJAMENTO.....	18
3.3.2	LAMINAÇÃO	20
3.4	PROTEÇÃO CATÓDICA	20
3.5	FRAGILIZAÇÃO PELO HIDROGÊNIO.....	23
3.6	MODOS DE FRATURA.....	25
4	MATERIAIS E MÉTODOS	27
4.1	DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS	28
4.2	CORTE DOS AÇOS.....	28
4.3	TRATAMENTO	30
4.4	CONFECÇÃO DOS CORPOS DE PROVA DE IMPACTO	31
4.5	PROTEÇÃO CATÓDICA	35
4.6	ENSAIOS	37
4.6.1	IMPACTO CHARPY	37
4.6.2	ENSAIO DE DUREZA ROCKWELL	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1	PROTEÇÃO CATÓDICA	40
5.2	ENSAIO CHARPY.....	41
5.2.1	TENACIDADE DO AÇO ASTM A36.....	41
5.2.2	TENACIDADE DO AÇO ASTM A182 F22 FORJADO, DIREÇÃO TRANSVERSAL	43
5.2.3	TENACIDADE DO ASTM A182 F22 FORJADO, DIREÇÃO LONGITUDINAL	44
5.2.4	COMPARATIVO DE TENACIDADE DO ASTM A182 F22 E ASTM A36 COM E SEM PROTEÇÃO CATÓDICA.....	46
5.3	SUPERFÍCIE DE FRATURA.....	49

5.3.1	SUPERFÍCIE DE FRATURA PARA O AÇO ASTM A36.....	49
5.3.2	SUPERFÍCIE DE FRATURA PARA O AÇO ASTM A182 F22 EXTRAÍDO LONGITUDINALMENTE	50
5.3.3	SUPERFÍCIE DE FRATURA PARA O AÇO ASTM A182 F22 EXTRAÍDO TRANSVERSALMENTE	51
5.4	DUREZA	52
5.4.1	DUREZA NO AÇO ASTM A36	52
5.4.2	DUREZA NO ASTM A182 F22 EXTRAÍDO LONGITUDINALMENTE.....	53
5.4.3	DUREZA NO ASTM A182 F22 EXTRAÍDO TRANSVERSALMENTE	54
6	CONCLUSÃO	57
7	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1 INTRODUÇÃO

A produção de petróleo em águas profundas é um grande desafio e isso tem gerado o aperfeiçoamento dos sistemas *Offshore*. Segundo Almeida (2014), na extração de petróleo nesse meio, tem-se profundidades acima de sete mil metros que exigem materiais com características mecânicas e metalúrgicas especiais, pois são locais com altas temperaturas e altas pressões, como também suscetível a corrosão (por se tratar de um ambiente agressivo) e a ação do hidrogênio. Dessa forma, mostra a importância da escolha dos materiais que serão empregados nesses sistemas, demandando características mecânicas e metalúrgicas especiais (CAVALCANTE, 2014). Além disso, falhas ocorreram em estruturas desses sistemas provocando o derramamento de petróleo, resultando em diversos impactos negativos ao meio ambiente e aos seres humanos, provocando inclusive a perda de vidas (FERREIRA, 2017).

R1 Asset Integrity (2024) cita que a proteção catódica desempenha um papel crucial em sistemas *Offshore*, pois previne a corrosão de estruturas submersas, como plataformas de perfuração e oleodutos, em razão das condições adversas do ambiente marinho. A exposição contínua à água salgada acelera o deterioramento dos materiais metálicos, tornando essa medida indispensável para garantir a durabilidade e a integridade dessas instalações.

Ferreira (2017) diz que diversos componentes submarinos (meio agressivo), como amarras, fixadores, manifolds, árvores de Natal e dutos, são protegidos catodicamente para mitigar a corrosão por perda de massa. Porém em decorrência dessa proteção, há liberação do hidrogênio nessa reação catódica e com isso podendo levar a fragilização e consequentemente falhas desses componentes.

Cavalcante (2014) afirma que aplicações envolvendo juntas dissimilares (uniões soldadas entre materiais de diferentes composições químicas e propriedades mecânicas) expostas a ambientes protegidos catodicamente, os íons H^+ difundem-se no material e tendem a se acumular em regiões de menor difusividade e maior solubilidade. Esse fenômeno pode levar ao aprisionamento de hidrogênio, aumentando o risco de fratura do material.

Considerando esse cenário, a análise dessas falhas tem demonstrado uma correlação com a atuação do hidrogênio em componentes soldados. Na extração de petróleo em sistemas *offshore*, além da presença do hidrogênio, esses componentes

estão expostos a temperaturas elevadas, corrosão e submetidos a grandes solicitações mecânicas. A presença do hidrogênio somada a essas condições ocasiona a fragilização em alguns materiais, pois, a microestrutura do material também está associada a essa fragilização. Consonante a isso, Silva (2018) cita que, alguns autores mencionam que a microestrutura martensítica, devido a sua elevada dureza está mais susceptível a fragilização pelo hidrogênio que a microestrutura ferrítica, que tem menor dureza.

Devido as falhas ocasionadas a fragilização pelo hidrogênio, vem se estudando a correlação entre essa fragilização e a microestrutura dos materiais que experimentaram esse tipo de falha. Nesse sentido, o presente estudo irá analisar a viabilidade do emprego de aços no estado conformado (como fornecido) e submetidos a Tratamentos Térmicos de Alívio de Tensão (TTAT) que são empregados após processos de soldagem.

Segundo Chiaverini (2002) e Lima (2006) aços carbono-molibdênio com teor de carbono variando entre 0,20% e 0,35%, independentemente da espessura, geralmente possuem temperaturas de alívio de tensões entre 675°C e 760°C, com um tempo de tratamento de aproximadamente duas a três horas por polegada de seção. Dodge (2014) afirma que, na indústria *offshore*, o tempo de tratamento térmico aplicado em juntas dissimilares varia entre 5 e 10 horas. Em sua tese, foram utilizadas temperaturas entre 650±5°C e 675±5°C. Com isso, para esse trabalho optou-se por utilizar as temperaturas de TTAT de 650, 677 e 704°C com um tempo de permanência no forno de 6 horas.

Portanto, considerando as necessidades do sistema *Offshore*, o presente trabalho avaliou a tenacidade ao impacto e dureza dos aços ASTM A182 F22 forjado e A36 laminado. Para o primeiro, os corpos de prova foram extraídos ao longo das seções longitudinal e transversal do tarugo. Já para o aço ASTM A36 os corpos de prova foram confeccionados para a direção longitudinal. Nessa análise considerou-se ainda submissão dos aços a condições variadas de TTAT e a proteção catódica. Com o intuito de analisar a influência do hidrogênio os resultados obtidos foram comparados com os de outros estudos (sem proteção catódica), nas mesmas condições de tratamento térmico de alívio de tensão.

Com isso, pretende-se contribuir com as pesquisas da área, considerando a possibilidade de uma redução de custo, associada a fabricação desses

componentes, decorrente da eliminação de tratamento térmico anterior a soldagem, e a aplicação somente do tratamento térmico pós-soldagem, TTAT.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem o objetivo de avaliar a tenacidade ao impacto e a dureza dos aços ASTM A182 F22 forjado e ASTM A36 laminado, ambos com condições variadas de Tratamento Térmico de Alívio de Tensão (TTAT) e submetidos à proteção catódica.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar os Tratamento Térmicos de Alívio de Tensão no aço ASTM A182 F22 forjado, para as temperaturas de 650 °C e 677 °C com tempo de permanência de 6 horas;
- Realizar os Tratamento Térmicos de Alívio de Tensão no aço ASTM A36 laminado, para as temperaturas de 650 °C e 704 °C com tempo de permanência de 6 horas;
- Confeccionar corpos de prova de impacto nas direções longitudinal e transversal para o aço ASTM A182 F22 forjado e com TTAT;
- Confeccionar corpos de prova de impacto do aço ASTM A36 laminado e com TTAT;
- Submeter os corpos de prova de impacto, de ambos os aços, à proteção catódica por corrente impressa durante 14 dias;
- Realizar ensaios de impacto e dureza dos aços ASTM A182 F22 e ASTM A36, com TTAT e proteção catódica;
- Caracterizar a superfície de fratura dos corpos de prova de impacto.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Aço ASTM A182 F22

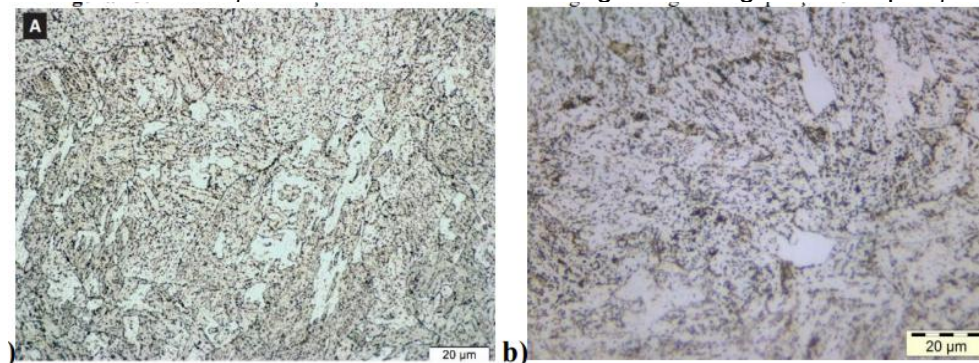
Segundo Oliveira (2013) o aço ASTM A182 F22 (F22) é um aço baixa liga tipo 2,25Cr – 1Mo que foi inicialmente desenvolvido para aplicações em altas temperaturas, mas também se destaca por possuir alta estabilidade mecânica decorrente dos carbonetos estáveis que estão presentes em sua microestrutura,

Thomson e Miller (1998) e Peddle e Pickles (2000) relatam também que o aço alto resistência e baixa liga grau 22 (classe Cr-Mo) é amplamente utilizado no estado forjado em sistemas *offshore*, ou seja, em componentes responsáveis pela captação de petróleo em águas profundas. Citando também que a adição de Cr e Mo tem o intuito de deixar a liga tenaz e com uma boa resistência a fluência e a corrosão, se comparado com os aços carbono.

Brito (2014) destaca que a microestrutura dos aços Cr-Mo, como o F22, varia conforme sua composição química e as condições do tratamento térmico aplicado. Essas variações influenciam diretamente suas propriedades mecânicas, permitindo que esses aços sejam utilizados em diferentes tipos e níveis de solicitações mecânicas, o que os torna altamente versáteis para aplicações em engenharia.

Na Figura 1 tem-se o comparativo da microestrutura do F22 em corte longitudinal no estado como fornecido de dois trabalhos, no qual Dai e Lippold (2017) descrevem como uma microestrutura predominantemente de martensita revenida, podendo-se observar também grãos alongados de ferrita em sua microestrutura para a imagem (a) e Almeida (2018) descreve as duas microestruturas com semelhanças e como é sabido, a presença de martensita revenida tende a conferir uma combinação favorável de resistência mecânica e tenacidade, enquanto os grãos alongados de ferrita tende a proporcionar uma melhora nas propriedades mecânicas do material.

Figura 1 - Microestrutura AÇO ASTM F22 em corte Longitudinal e grau de ampliação 5x



Fonte: A) Dai e Lippold (2017). B) Almeida (2018)

No presente trabalho foi estudado o aço da classe Cr-Mo de alta resistência e baixa liga grau 22 (F22), com entalhe nas direções longitudinal e transversal, no estado forjado com tratamento térmico de alívio de tensão (TTAT) nas temperaturas de 650, 677 e 704°C submetidos a proteção catódica, de modo a analisar o efeito dos tratamentos e da proteção catódica na tenacidade ao impacto do aço e em sua dureza, já que é um aço utilizado em sistemas offshore, ou seja, locais que exigem materiais que suportem altas temperaturas e pressões, como também a corrosão e a fragilização pelo hidrogênio.

3.2 Aço ASTM A36

Segundo Viana (2019), o aço ASTM A36 é um aço estrutural de baixo carbono, com um teor máximo de 0,27% em peso, caracterizado por sua boa soldabilidade, porém com resistência mecânica moderada e baixa usinabilidade. Trata-se de um aço-carbono manganês ou microligado, podendo apresentar baixa, média ou alta resistência mecânica, sendo produzido por laminação convencional, laminação controlada ou laminação controlada com resfriamento acelerado (TMCP). Sua aplicação é ampla, incluindo componentes estruturais de pontes, edifícios, galpões, torres eólicas, máquinas agrícolas, implementos rodoviários e também em juntas soldadas em aplicações *Offshore*.

Uma das principais preocupações principalmente nas aplicações *offshore* é a corrosão nos aços, principalmente pelo meio corrosivo dentro do mar. Um dos tipos de corrosão mais comuns em aços estruturais, como o ASTM A36, é a

corrosão atmosférica. Esse fenômeno ocorre por meio de um mecanismo eletroquímico e, geralmente, de maneira uniforme, ou seja, espalhando-se por toda a superfície do metal. A taxa de corrosão atmosférica é influenciada por fatores como temperatura, poluentes presentes no ar e umidade relativa. A presença de sais na atmosfera tende a acelerar esse processo, sendo que, em ambientes marítimos, a corrosão ocorre com maior intensidade (GENTIL, 2007) e (FONSECA ET AL., 2020).

A taxa de corrosão pode ser impactada pelas características do ambiente, sendo que fatores como o pH, a temperatura, a concentração de oxigênio e a presença de sais dissolvidos são amplamente reconhecidos por influenciarem significativamente a velocidade desse processo (GENTIL, 2007).

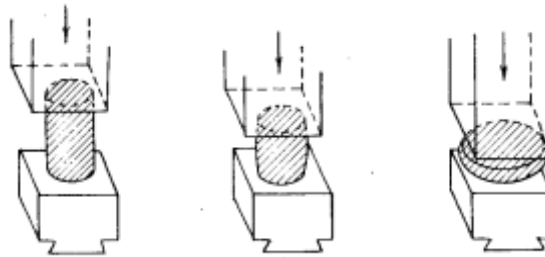
Para evitar essa corrosão Ferreira (2017) menciona que diversos componentes submarinos, como amarras, fixadores, manifolds, árvores de Natal e dutos, são protegidos catodicamente para mitigar a corrosão.

3.3 Processos de conformação mecânica

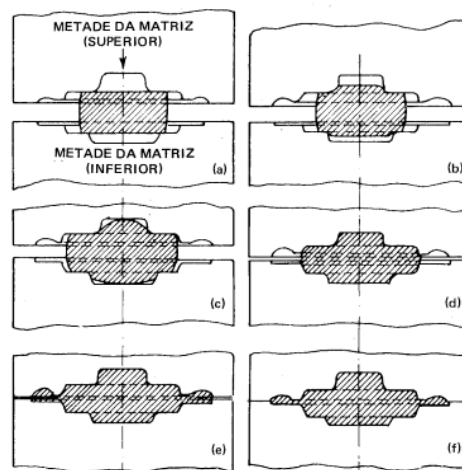
3.3.1 Forjamento

Chiaverini (1986) Define forjamento como um processo de conformação mecânica que transforma a estrutura de um material metálico por meio de prensagem ou martelamento. Essa técnica de deformação a quente altera a forma de um bloco metálico ao aplicar força, seja de maneira dinâmica ou estática. Podendo ser classificado em duas categorias principais, forjamento livre (também chamada de matriz aberta) e forjamento em Matriz (também chamada como forjamento em matriz fechada).

O forjamento livre, como exemplificado na Figura 2, o material é moldado entre ferramentas planas ou de geometria simples, permitindo que o metal escoe livremente em direções perpendiculares à força aplicada. Essa técnica é amplamente utilizada para peças de grande porte ou em casos em que a produção em baixa escala não justifica o investimento em matrizes específicas.

Figura 2 - Processo de forjamento livre**Fonte:** Chiaverini (1989)

O forjamento em Matriz, exemplificado na Figura 3, o material é moldado entre duas metades de matrizes que reproduzem a forma desejada da peça. A conformação ocorre sob alta pressão dentro de uma cavidade fechada, garantindo maior precisão dimensional. Devido ao alto custo das matrizes, essa técnica é mais adequada para produção em larga escala.

Figura 3 - Processo de forjamento em matriz**Fonte:** Chiaverini (1989)

O forjamento é amplamente utilizado principalmente porque é um processo de conformação que aprimora a qualidade interna da peça forjada, pois as deformações compressivas geram uma estrutura de grãos mais homogênea, fragmentam as dendritas formadas durante a solidificação do aço, reduzem a porosidade e minimizam padrões de macro segregação. Além disso, a tenacidade é aumentada devido ao fluxo de grãos, resultando em maior resistência à fadiga e em uma fibragem mais favorável (OLIVEIRA, 2017).

3.3.2 Laminação

Para Viana (2019), a laminação (a quente) é um processo de conformação mecânica que envolve a deformação plástica de um lingote de metal previamente aquecido em um forno de reaquecimento ou diretamente após o lingotamento contínuo (laminação direta). Nesse processo, o metal é comprimido ao passar entre dois cilindros que giram em sentidos opostos e com a mesma velocidade. A distância entre os cilindros é menor do que a espessura original da peça, promovendo a redução de sua seção transversal. Esse processo é realizado em vários passes a depender da espessura final desejada da peça, a Figura 4 mostra como é o processo de laminação.

Figura 4 - Processo de laminação e recristalização.



Fonte: Maxwell, PUC RIO.

3.4 Proteção catódica

A proteção catódica é fundamental em sistemas *offshore* para evitar a corrosão de componentes submersos, como plataformas de perfuração e oleodutos, devido às condições severas do ambiente marítimo. A constante exposição à água salgada acelera o desgaste dos materiais metálicos, tornando essa proteção uma estratégia essencial para assegurar a integridade e a longevidade dessas estruturas (R1 ASSET INTEGRITY, 2024).

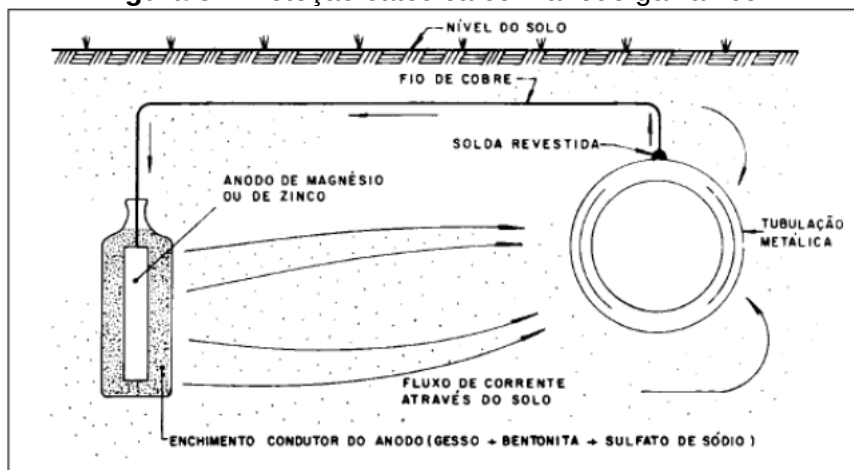
Segundo a empresa Instalações e Engenharia de Corrosão LTDA (2017) a proteção catódica nada mais é que uma técnica que tem como intuito proteger da corrosão instalações metálicas que estejam submersas ou enterradas.

Existem dois tipos de sistemas de proteção, a proteção por sistema galvânico e o sistema por corrente impressa.

A proteção por sistema galvânico é composta por anodos de sacrifício de ligas especiais (Zinco, alumínio e cobre) ou anodo galvânico. O funcionamento desse sistema se dá através da diferença de potencial entre o aço e o anodo, de modo que ocorra a circulação de uma corrente elétrica através do eletrólito, seja água, solos ou concreto. A circulação da corrente irá modificar o potencial do aço em relação ao eletrólito, com isso elimina-se as pilhas de corrosão (GENTIL, 2017).

Castro e Aguiar (2010) falam que a proteção por anodo galvânico, é aplicada normalmente quando se precisa de pouca quantidade de corrente para proteger determinada estrutura, e quando o local possui baixa resistividade elétrica. Esse tipo de sistema é constituído de um metal que seja eletronegativo em relação a estrutura que se deseja proteger, quando ele é ligado a essa estrutura, no solo ou na água (em um eletrólito), irá atuar como anodo e com isso liberando a corrente de proteção. Essa corrente adentra no material a ser protegido através do solo ou da água, bloqueando as correntes de corrosão e por fim, como se trata de um circuito fechado, retorna ao seu ponto inicial por um fio de cobre como mostra na Figura 5.

Figura 5 - Proteção catódica com anodo galvânico.



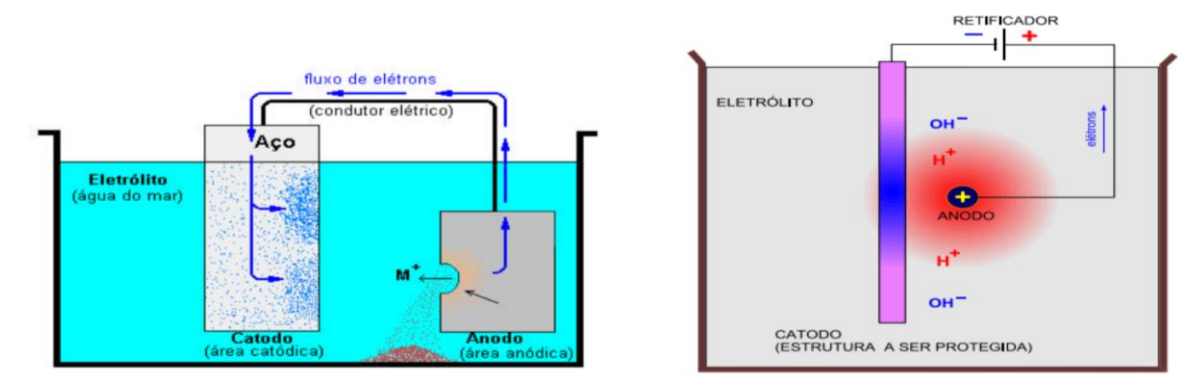
Fonte: Castro e Aguiar (2010)

O segundo método é o sistema por corrente impressa, que é o que foi utilizado no presente trabalho, neste tem-se o uso de uma fonte externa de corrente em conjunto com anodos inertes especiais, que nesse caso o utilizado foi o de Titânio. A corrente elétrica de proteção é gerada pela fonte e não pela diferença de potencial entre o metal protegido e o anodo (INSTALAÇÕES E ENGENHARIA DE CORROSÃO LTDA, 2017).

Castro e Aguiar (2010) falam que o sistema de proteção catódica por corrente impressa é largamente utilizado para sistemas nos quais há instalações metálicas enterradas ou submersas. Utilizam retificadores, equipamentos relativamente simples, que são alimentados por intermédio de um circuito de corrente alternada, fornecendo a quantidade de corrente contínua necessária para a eliminação de pilhas de corrosão que possam se formar no material que se deseja proteger. Além dos retificadores, são utilizados também anodos inertes no solo, ou na água, a depender da aplicação, como mostra a Figura 6 (B).

Na Figura 6 tem-se um esquema que demonstra como são realizados os dois tipos de proteção catódica.

Figura 6 - Proteção Catódica. A) corrente galvânica. B) corrente impressa.



Fonte: Horta Et al. (2014)

Porém, segundo Akselsen et al. (2005) o uso desses tipos de proteção, muitas vezes poderá fazer com que haja a evolução de hidrogênio na superfície do aço e dessa forma gerar condições para que haja a difusão de hidrogênio para o interior do material. A quantidade desse elemento no material, combinado com as condições de aplicação e microestrutura, podem levar a perda da integridade mecânica do material, denominada de fragilização pelo hidrogênio. Gentil (2017) relata que a ação desse elemento (hidrogênio) em matérias metálicas promove o trincamento microestrutural e/ou a redução de tenacidade.

3.5 Fragilização pelo hidrogênio

Um efeito da aplicação da proteção catódica é a presença do hidrogênio atômico na superfície do metal protegido. Esse hidrogênio pode ser absorvido pelo material, levando à fragilização por hidrogênio (AKSELSEN et al., 2005). Dessa forma o presente trabalho pretende avaliar a influência do hidrogênio advindo da proteção catódica.

A fragilização por hidrogênio, também chamada de trincas induzidas pelo hidrogênio, é um fenômeno que está relacionado com a alteração das propriedades mecânicas, dentre elas a perda da ductilidade e tenacidade, em aços quando estão na presença do hidrogênio (LIMA, 2017).

Costa (2011) cita que apesar do hidrogênio possuir um raio atômico extremamente pequeno, é um elemento extremamente danoso aos aços, visto que a fragilização pelo hidrogênio causa uma perda da resistência e tenacidade nos aços. Corroborando com isso, Dias (2009) também fala que o hidrogênio vai ocupar os sítios intersticiais da rede cristalina dos metais, com isso, vindo a favorecer o surgimento de sítios tetraédricos nos metais CCC e os octaédricos nos metais CFC. Além disso, há outros fenômenos que a atuação do hidrogênio causa, como a presença de lacunas que se formam devido as elevadas pressões e a presença deste elemento.

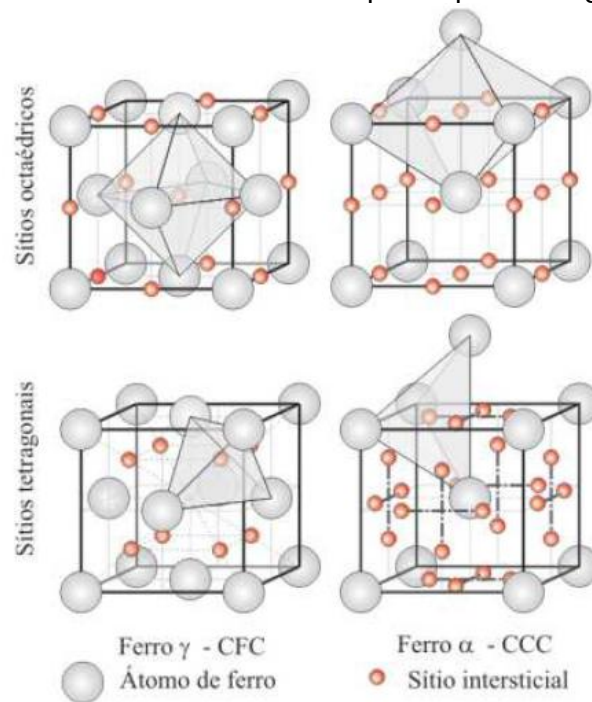
A respeito de como o hidrogênio adentra no material, Silva (2018):

“A presença do hidrogênio, na forma atômica, sobre a superfície do metal, pode promover a difusão deste para o interior do material, e, em seguida este pode retornar à forma molecular, preferencialmente nos defeitos presentes na rede cristalina, como por exemplo, vazios, discordâncias e contornos de grão. A saturação de moléculas de hidrogênio no metal, elevam significativamente a pressão interna, provocando o aparecimento de bolhas e microfissuras.” (SILVA, 2018, P.60).

E como bem sabemos, em sistemas *offshore* o hidrogênio é bem presente, já que, em muitos componentes, há a necessidade de um elevado nível de proteção catódica.

A Figura 7 mostra estruturas cristalinas de faces centradas (CFC) e de corpo centrado (CCC) com os sítios octaédricos e tetraédricos pelos quais o hidrogênio ocupa.

Figura 7 - Estruturas cristalinas de face centrada e de corpo centrado com sítios octaédricos e tetraédricos ocupados pelo hidrogênio.



Fonte: Adaptado de Torres (2011)

Gonçalves (2013) fala que, o hidrogênio se difunde para o interior da rede cristalina, interagindo com os defeitos que há nesta, e com isso acontece o aprisionamento, ou a reação química. O autor também relata que esse hidrogênio poderá promover a transformação de fase e com isso fazer com que haja a diminuição da tenacidade e da resistência do metal, causadas pela fragilização e pelo ataque do hidrogênio.

Vitiello (2009) diz que não há nenhum benefício no efeito do hidrogênio nos aços, visto que a fragilização advinda pelo hidrogênio se reflete na diminuição das propriedades do material, sendo mais evidente na diminuição considerável nos valores de tenacidade.

Silva (2018) diz que o hidrogênio atômico se origina, na proteção catódica, devido a reação eletroquímica no catodo no qual os íons de hidrogênio hidratados como H_3O^+ que estão diluídos na solução e dessa forma, quando há o contato com o metal a ser protegido, no caso o aço, sofre uma redução, que está mostrada na equação abaixo:



Rosado (2011) explana que a fragilização devida o hidrogênio vem a ocorrer por conta do hidrogênio que se aprisiona nos defeitos e interstícios do material, nas formas iônica (H^+) e molecular (H_2), e também como composto, hidretos.

Dias (2009) relata que as tubulações submersas em água do mar são geralmente protegidas contra corrosão por proteção catódica, porém no método de proteção catódica em aços em soluções aquosas tem como princípio a formação de uma polarização catódica e dessa forma através da evolução do hidrogênio pela polarização tem-se uma “fonte formadora de hidrogênio”.

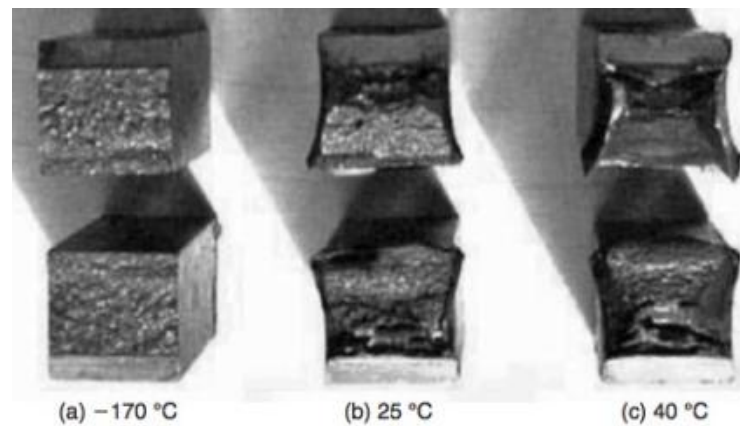
Em relação a entrada e o transporte do hidrogênio no aço, é iniciada pela adsorção do hidrogênio na superfície do material e dessa forma, a evolução desse hidrogênio na superfície do material faz com que favoreça o fluxo desse hidrogênio para o interior do aço, com isso o processo de proteção catódica em aços pode vir a favorecer a presença e a fragilização pelo hidrogênio em aços. (DIAS, 2009; AKSELSEN et al., 2005; STROE, 2006).

3.6 Modos de Fratura

Segundo Garcia; Spim e Santos (2012), há dois tipos de modos de fratura, sendo elas frágil e dúctil, e, estão associados a capacidade do material em se deformar plasticamente, no local onde ocorre a fratura. Eles relatam também que na fratura frágil não há deformação apreciável, logo o rompimento ocorre de forma abrupta, sendo observado um aspecto cristalino na superfície de fratura do material. Já na fratura dúctil, tem-se uma alta absorção de energia, com uma extensa deformação plástica.

Na Figura 8 tem-se os modos de fratura do aço SAE 1020 ensaiado nas temperaturas de -170, 25 e 40°C, na qual observa-se a transição dúctil frágil do material. É importante destacar que no presente trabalho o ensaio de impacto foi empregado na temperatura ambiente com o intuito de avaliar a influência do TTAT.

Figura 8 - Superfície de fratura do ensaio de impacto no aço SAE 1020



Fonte: Garcia; Spim; Santos (2012)

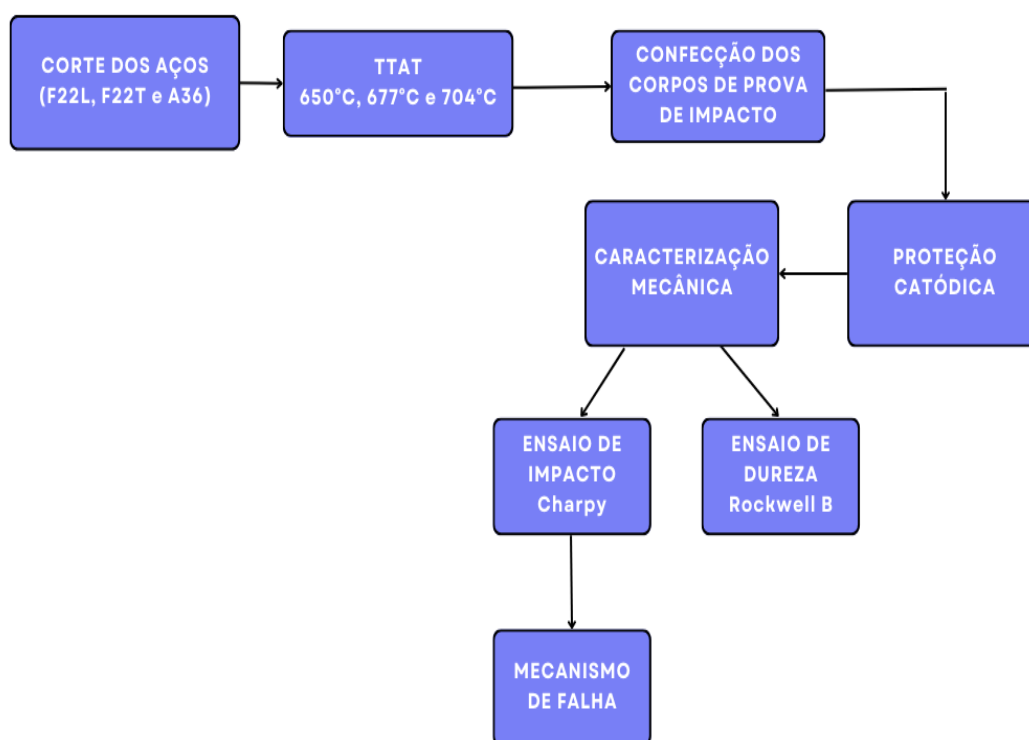
Na Figura 8 de Garcia; Spim; Santos (2012), pode-se observar como já falado mais acima, a superfície do corpo de prova da imagem A (ensaiado a -170°C), um aspecto cristalino e sem nenhuma contração ou expansão em todo o comprimento da face fraturada, indicando fratura frágil. Já nos corpos de prova B e C ensaiados a 25°C e 40°C respectivamente, pode-se observar uma expansão na face oposta ao entalhe e uma pequena contração próximo a face do entalhe, caracterizando fratura dúctil.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico será abordado a metodologia da pesquisa, como também os materiais e métodos necessários para a realização desse trabalho de conclusão de curso, ao qual tem como intuito avaliar a tenacidade ao impacto de aços-liga submetidos a proteção catódica, de modo a verificar uma possível atuação do hidrogênio.

Os corpos de prova foram fabricados no Laboratório de usinagem e soldagem da Ufersa campus Caraúbas. Os ensaios foram realizados no laboratório de ensaios e metalografia também no campus Caraúbas e no laboratório de ensaios mecânicos na UFERSA campus Mossoró. A proteção catódica foi realizada no laboratório de Metrologia da UFERSA Campus Caraúbas. No fluxograma exposto na Figura 9 está representado todo o processo realizado durante a pesquisa.

Figura 9 - Fluxograma sintetizando todas etapas práticas que foram realizadas



Fonte: Autoria Própria

4.1 Descrição dos materiais utilizados

Foram utilizados um tarugo do aço ASTM A182 F22 fornecido pela Special Steel Comercial de Aços e Metais Eireli e uma chapa do aço ASTM A36 fornecida pela Madiba ligas especiais. Na Tabela 1 estão expostas as composições químicas de ambos os aços:

Tabela 1 - Composição química, em peso, do aço ASTM 182 F22 e ASTM A36

	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cr (%)	Mo (%)	Fe (%)
Aço F22	0,05- 0,15	0,30- 0,60	0,04	0,04	0,05	2,00- 2,50	0,87- 1,13	Bal.
Aço A36	0,28	0,6 – 0,9	0,04	0,05	0,04	-	-	Bal.

Fonte: Norma ASTM 182 F22 (2016) e TENAX aços especiais.

4.2 Corte dos aços

O primeiro passo consistiu no corte dos tarugos para a confecção das peças destinadas aos tratamentos térmicos e, posteriormente, à fabricação dos corpos de prova de impacto. O processo utilizado foi a usinagem, realizada no laboratório de Usinagem e Soldagem da UFERSA-Caraúbas. Inicialmente, as amostras foram cortadas com dimensões adequadas para a posterior confecção dos corpos de prova de impacto, utilizando a serra-fita mecânica Clark SF250, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Serra fita mecânica Clark SF250

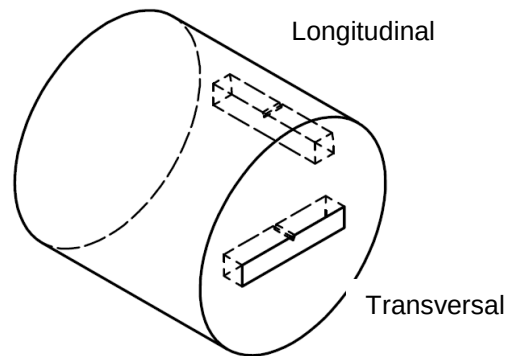


Fonte: Clark Machine

Em todos os processos de usinagem (corte e desbaste) foram realizados com fluido refrigerante em jorro (fluido refrigerante adicionado entre a peça usinada e a ferramenta) para que não houvesse aquecimento dos corpos de prova durante o processo de usinagem.

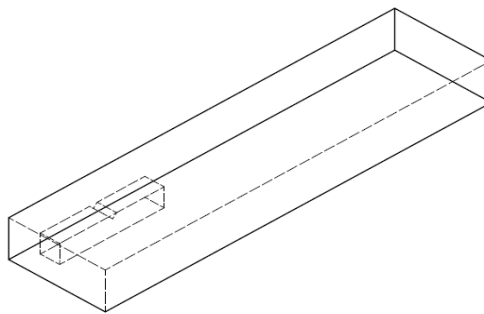
Nas figuras abaixo tem-se como foram extraídas as peças para posteriormente usina-las para confecção dos corpos de prova de impacto:

Figura 11 - Direções de extração dos corpos de prova do aço ASTM A182 F22 forjado.



Fonte: Autoria Própria

Figura 12 - Direção de extração dos corpos de prova do aço ASTM A36 laminado.



Fonte: Autoria Própria

. Como aço ASTM A36 laminado não tem apresentado falhas nas aplicações *offshore* e tem sido aplicado sem tratamento térmico após a conformação mecânica, considerou-se apenas a direção longitudinal (Figura 12) que corresponde a direção usualmente empregada na fabricação de componentes soldados.

4.3 Tratamento

O tratamento térmico de Alívio de tensão (TTAT) foi realizado no laboratório de Ensaio e Metalografia na UFRSA-Caraúbas por meio de um forno tipo mufla Lucadema modelo Luca-2000G/DI como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Forno tipo mufla Lucadema modelo Luca – 2000G/DI



Fonte: Autoria própria

Com base em estudos da área, como o de Dodge (2014), verifica-se que o tempo de tratamento térmico aplicado em juntas dissimilares varia entre 5 e 10 horas. Em sua tese, foram utilizadas temperaturas entre $650 \pm 5^\circ\text{C}$ e $675 \pm 5^\circ\text{C}$. Portanto, para o seguinte trabalho, foram empregadas três temperaturas distintas de TTAT, sendo elas 650°C , 677°C e 704°C com tempo de permanência no forno de 6 horas e o resfriamento do tipo lento, ao ar. A tabela 2 mostra as taxas de aquecimentos para cada temperatura de TTAT realizado nos corpos de prova.

Tabela 2 - Taxa de aquecimento do forno para cada temperatura do TTAT

Temperaturas	650°C	677°C	704°C
Taxa de aquecimento	$9,5 \pm 6,5^\circ\text{C/min}$	$12 \pm 4,6^\circ\text{C/min}$	$13 \pm 3,46^\circ\text{C/min}$

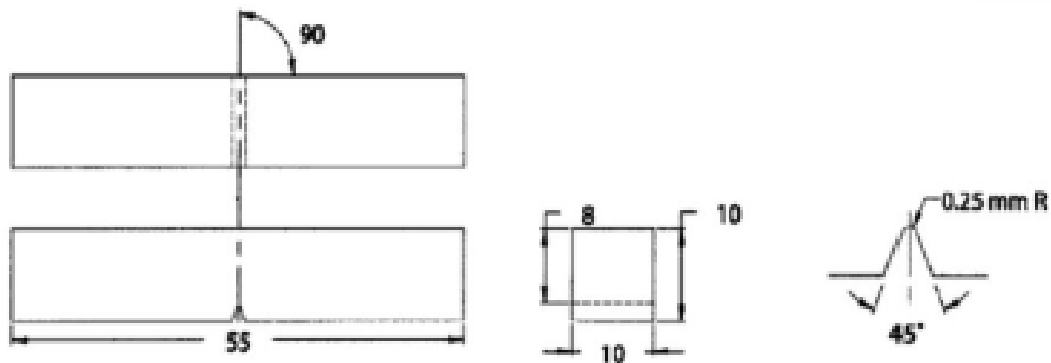
Fonte: Autoria Própria

Tanto o aço F22, quanto o aço A36 foram tratados nas temperaturas de 650, 677 e 704°C , no entanto, em virtude de problemas durante a confecção dos corpos de prova de impacto, os resultados de impacto do aço F22 na temperatura de 704°C , assim como para o aço A36 na temperatura de 677°C ficaram comprometidos, dessa forma, não podendo ser considerados nas análises de resultado.

4.4 Confeccção dos corpos de prova de impacto

Após a realização do TTAT nas temperaturas predefinidas, foi dado início a confecção dos corpos de prova de impacto, o processo foi iniciado com a usinagem que também realizado no laboratório de Usinagem e Soldagem da UFERSA-Caraúbas. Inicialmente, realizou-se o corte das amostras tratadas em dimensões próximas as dimensões finais, utilizando a serra fita Clark SF250, Figura 10. a Figura 14 mostra as dimensões e o formato do corpo de prova, do tipo charpy segundo a norma ASTM E23 – 07a.

Figura 14 - Dimensões do corpo de prova charpy



Fonte: Adaptado da Norma ASTM E23(2007)

Com o intuito de analisar o comportamento de tenacidade ao impacto do aço ASTM A182 F22 no estado forjado, foram extraídos corpos de prova nas direções Longitudinal e Transversal, conforme demonstrado na Figura 11.

Foram confeccionados 18 corpos de prova, sendo 3 corpos de prova para cada temperatura de TTAT realizado.

- 6 corpos de prova para o aço F22 cortado na direção longitudinal para o TTAT nas temperaturas de 650°C e 677°C (3 para cada temperatura).
- 6 corpos de prova para o aço F22 cortado na direção transversal para o TTAT nas temperaturas de 650°C e 677°C (3 para cada temperatura).
- 6 corpos de prova para o aço A36 cortado na direção longitudinal para o TTAT nas temperaturas de 650°C e 704°C (3 para cada temperatura).

Na sequência realizou-se o processo de fresamento, utilizando a fresadora Eurostec modelo FTV-H6 mostrada na Figura 15, este compreendeu o desbaste de todas as faces laterais do corpo de prova até que chegassem nas dimensões predefinidas como mostra na Figura 7 nas dimensões de 10x10 mm.

Figura 15 - Fresadora Eurostec modelo FTV-H6



Fonte: Autoria Própria

Após o processo de fresamento, foi realizado o processo de torneamento utilizando o torno mecânico Manrod modelo MR-302, Figura 16, para desbastar os corpos de prova em seu comprimento chegando a medida de 55mm.

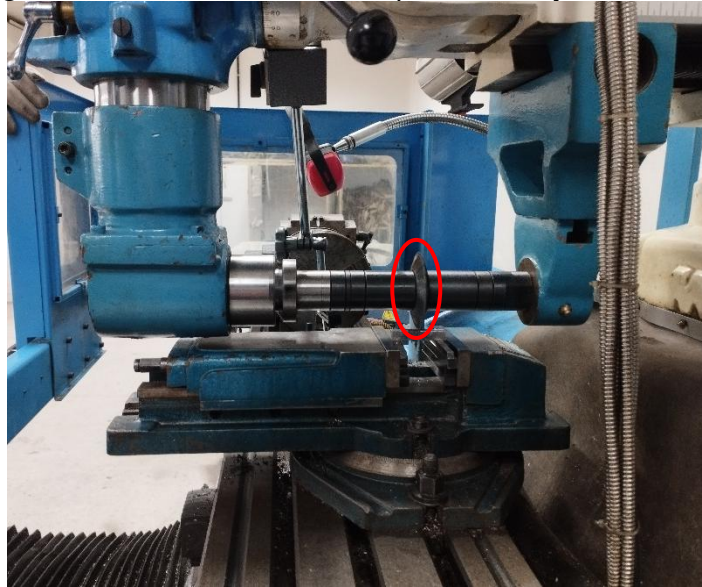
Figura 16 - Torno mecânico Manrod modelo MR-302



Fonte: Autoria própria

O entalhe também foi realizado no laboratório de Usinagem e soldagem na UFERSA – Caraúbas, utilizando também a fresadora mostrada na Figura 15, porém a ferramenta de corte utilizada foi uma fresa de ângulo duplo simétrico – 45° DIN 847, que pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 - Fresadora montada para realização do entalhe



Fonte: Autoria própria

O entalhe foi realizado com uma angulação de 45°, localizado no centro do CP e com profundidade de 2mm, conforme norma ASTM E23-18 e Figura 14.

É importante destacar que a precisão e a consistência dos resultados do ensaio Charpy podem ser comprometidas caso os corpos de prova apresentem dimensões incorretas. Para assegurar a confiabilidade e a comparabilidade dos dados obtidos, normas como a ASTM E23 (2018) e a ISO 148-1 (2016) estabelecem dimensões padronizadas para os corpos de prova, definindo critérios rigorosos para o ensaio.

Dentre os principais efeitos de variações dimensionais nos valores de tenacidade ao impacto, destacam-se:

Espessura e largura fora do padrão:

Corpos de prova com espessura menor do que a especificada (por exemplo, 8 mm em vez de 10 mm) podem apresentar uma resistência ao impacto

aparentemente maior, pois há menor restrição à deformação plástica. Por outro lado, se a espessura for maior que a recomendada, a absorção de energia pode ser reduzida, tornando o material mais suscetível à fratura frágil (ASTM E23, 2018).

Profundidade incorreta do entalhe:

O entalhe em V ou U deve obedecer às dimensões padronizadas, sendo de 2 mm no caso do entalhe em V. Se a profundidade for superior ao especificado, a tenacidade medida tende a ser menor, uma vez que a redução da área resistente facilita a propagação da trinca. Já um entalhe mais raso pode favorecer um comportamento mais dúctil, superestimando a tenacidade (ISO 148-1, 2016).

Posicionamento incorreto do entalhe:

O entalhe deve estar precisamente centralizado no corpo de prova. Pequenos deslocamentos podem fazer com que o impacto ocorra em uma região com tensões desiguais, influenciando os resultados obtidos no ensaio (ASTM E23, 2018).

Comprimento fora do padrão:

Para um suporte adequado nos apoios do pêndulo, o corpo de prova Charpy deve possuir 55 mm de comprimento. Qualquer variação nessa medida pode afetar a transmissão de energia e alterar o momento do impacto, distorcendo os valores de tenacidade registrados (ISO 148-1, 2016).

Superfície irregular ou acabamento inadequado:

Rugosidades excessivas podem gerar concentrações de tensão indesejadas, afetando o início da fratura. Um acabamento impreciso pode modificar o comportamento da trinca, comprometendo a confiabilidade dos resultados (ASTM E23, 2018).

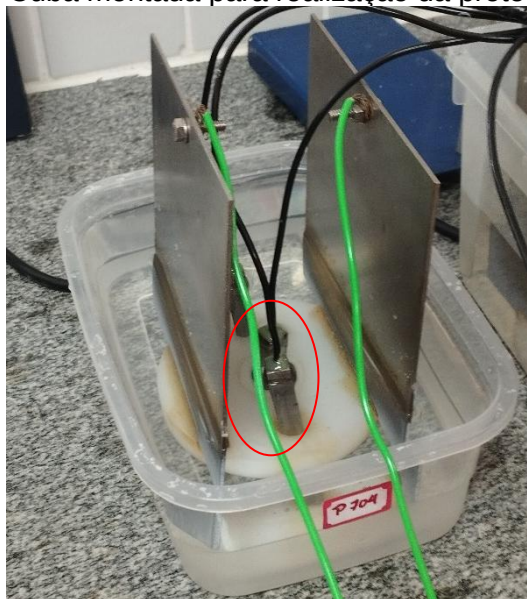
De forma geral, a ASTM E23 (2018) reforça que qualquer variação significativa nas dimensões do corpo de prova pode comprometer a precisão e a consistência dos valores de tenacidade ao impacto. Além disso, a norma estabelece que o entalhe deve estar rigorosamente centralizado e possuir a profundidade

correta, conforme especificado. Da mesma forma, a ISO 148-1 (2016) destaca a importância do controle dimensional para garantir a comparabilidade dos ensaios.

4.5 Proteção catódica

No processo de proteção catódica utilizou-se um aparato composto de duas placas de titânio, que atua como ânodo inerte, com dimensões de 160mm x 130mm x 2mm. Essas placas foram conectadas a uma fonte de alimentação elétrica HF-3205S, por meio de um conjunto de fios e parafusos como mostra a Figura 18. O polo positivo é advindo da fonte de tensão, enquanto o polo negativo é fixado no próprio corpo de prova. Tanto os corpos de prova quanto as placas de titânio foram posicionados na base de nylon, com o intuito garantir o paralelismo entre as placas e os corpos de prova, conforme observado na Figura 18.

Figura 18 - Cuba montada para realização da proteção catódica



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 18, destacado em vermelho tem-se o corpo de prova posicionado e preparado para a realização da proteção.

Figura 19 - Sistema montado para realização da proteção catódica



Fonte: Autoria própria

A proteção catódica foi realizada a temperatura ambiente, e utilizou-se um potencial de proteção de $-1100 \text{ mV}_{\text{ERC}}$, Almeida (2014) cita que esse potencial é comumente aplicado em sistemas *Offshore*, onde favorece a atuação do hidrogênio, o que, por sua vez, contribui para a fragilização da estrutura metálica. Como eletrólito foi empregado uma solução aquosa de NaCl com concentração de 3,5% e com pH aproximadamente 7. O tempo de proteção foi realizado durante 336h ou 14 dias. Tanto o pH quanto a tensão foram monitorados uma vez ao dia, de maneira que os parâmetros não apresentassem uma grande variação.

Para o monitoramento de pH foi utilizado um eletrodo senso de pH combinado tipo difusão de vidro SC06 juntamente com um pHmetro microprocessador de bancada – Q400MT. Em relação ao ajuste, se a solução estivesse com o pH menor que 7, era adicionado algumas gotas de uma solução de NaOH com concentração 0,1 M, mas se a solução estivesse com o pH maior que 7, era adicionado algumas gotas de uma solução de HCl com concentração de 0,1 M.

Para o monitoramento da tensão foi utilizado um eletrodo HI5414 juntamente com um multímetro Agilent U1252B, e conforme a necessidade era realizado o ajuste na fonte de alimentação.

Com o intuito de evitar a liberação de hidrogênio, ao encerrar o período de proteção catódica, os corpos de prova foram mergulhados, durante 20 s, em uma solução de CuSO_4 .

4.6 Ensaaios

4.6.1 Impacto charpy

Para a realização do ensaio de impacto charpy, foi utilizada a máquina da marca Time e modelo JB-W300A, localizada no laboratório de ensaios da UFERSA – Mossoró como mostra a Figura 20. Esse equipamento fornece os valores de energia absorvida ao impacto de forma analógica, expressas na própria máquina, através de um ponteiro.

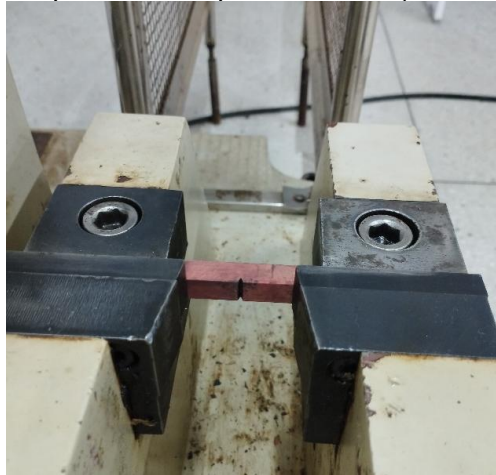
Figura 20 - Máquina de ensaio de impacto charpy modelo JB-W300A



Fonte: Autoria Própria

Os ensaios de impacto charpy foram realizados a temperatura ambiente, utilizando um martelo pendular de 300J. O corpo de prova foi posicionado de forma que o pêndulo atingisse a face oposta ao entalhe. Na Figura 21 é possível observar o corpo de prova apoiado na base do equipamento e pronto para a execução do ensaio.

Figura 21 - Corpo de prova posicionado para a realização do ensaio de impacto charpy



Fonte: Autoria própria

Após o posicionamento do corpo de prova, o pêndulo é acionado e ocorre a colisão entre o pêndulo e o corpo de prova, ao haver esse impacto, a máquina fornece o resultado de forma analógica.

4.6.2 Ensaio de Dureza Rockwell

O ensaio de dureza foi realizado no laboratório de Ensaios e metalografia da UFERSA-Caraúbas, utilizando o durômetro Mitutoyo HR – 320MS como mostra a Figura 22. Todo o ensaio foi regido pela norma ASTM E18:2007.

Figura 22 - Durômetro Mitutoyo HR – 320 MS.



Fonte: Autoria própria

No ensaio de dureza Rockwell, a peça é posicionada logo abaixo do indentador, neste trabalho empregou-se indentador de esfera de carbeto de tungstênio com 1,59 mm de diâmetro, a carga escolhida foi a de 100 kgf ou 981 N,

correspondendo a escala Rockwell B (HRB). Após o posicionamento da peça, são realizadas as indentações, para este trabalho foram realizadas 5 indentações em um corpo de prova para cada aço e para cada uma das condições de processamento térmico, ou seja, para as 3 temperaturas. Vale salientar que para a realização do ensaio de dureza, foram realizados os processos de metalografia, ou seja, lixamento utilizando a lixa d'água de granulometria 80 até 600.

Embora o ensaio tenha sido realizado na escala HRB, foi utilizada a conversão do próprio equipamento para a escala Brinell (HBS).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção tem-se a apresentação dos resultados juntamente com a análise e a discussão dos experimentos realizados com os aços ASTM A36 laminado e ASTM A182 F22 no estado forjado. As propriedades mecânicas foram levantadas para esses materiais após aplicação de TTAT nas temperaturas de 650, 677°C para o F22. Para o A36 foram levantadas após a aplicação de TTAT nas temperaturas de 650 e 704°C e submissão à proteção catódica para ambos os materiais.

5.1 Proteção catódica

Os corpos de prova foram submetidos a proteção catódica por um período de 14 dias, de modo que ao decorrer desses dias foram realizados levantamentos e ajustes necessários tanto no pH da solução (ideal $\text{pH} = 7$), quanto a tensão ($-1100 V_{\text{ERC}}$) uma vez ao dia. Durante todo o período de aplicação da proteção, não se observou nenhuma corrosão dos corpos de prova e/ou escurecimento da solução, demonstrando assim a eficiência do sistema e parâmetros empregados, a Figura 23 mostra o corpo de prova no aparato de proteção catódica.

Figura 23 - Corpos de prova no aparato de proteção catódica.



Fonte: Autoria própria.

5.2 Ensaio Charpy

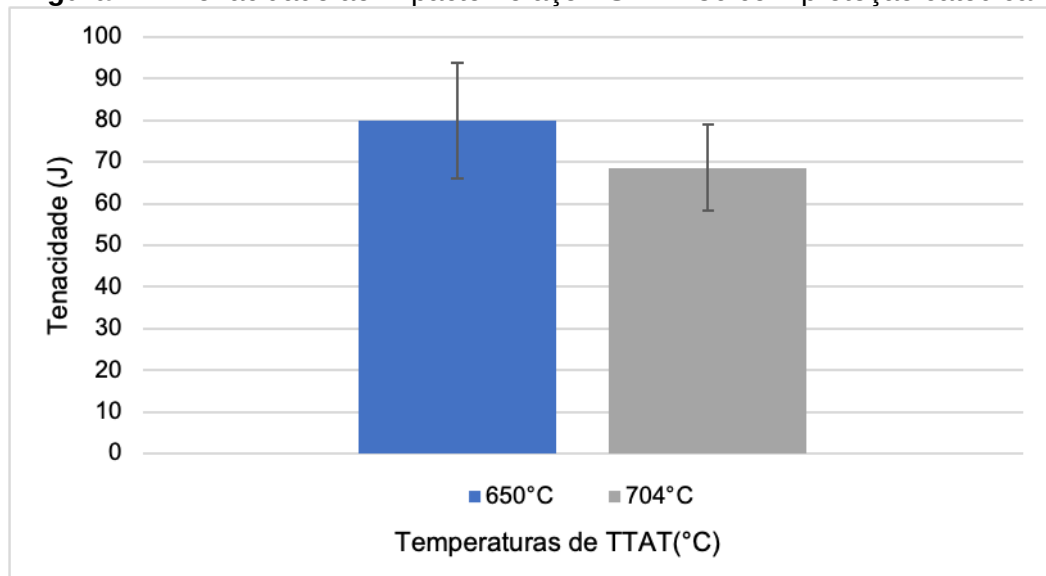
Nesse tópico, serão apresentados os resultados do ensaio de impacto Charpy com proteção catódica, visando avaliar se o tratamento aplicado influenciou nos resultados. Além disso, será verificada a possível atuação do hidrogênio, comparando os valores de tenacidade obtidos neste estudo com os valores de Araújo (2025) e Soares (2025), pertencentes ao mesmo grupo de pesquisa. Esses autores consideraram os mesmos materiais, mesmas direções de corte e condições de TTAT.

5.2.1 Tenacidade do aço ASTM A36

No gráfico da Figura 24 tem-se os resultados dos ensaios de impacto, valores médios e desvio padrão, para os corpos de prova (CPs) do aço ASTM A36 (A36) laminado com proteção catódica e TTAT, conforme parâmetros apresentados na seção 3.2.

Através do gráfico da Figura 24 e da Tabela 3 é possível observar que os corpos de prova do aço A36 laminado e com proteção catódica, apresentaram valores médios de tenacidade ao impacto próximos, para as duas temperaturas de TTAT aplicadas. Sendo esses valores médios de 80 J, e 68,66 J, para 650 °C e 704 °C, respectivamente.

Considerando os valores médios observa-se uma diminuição de tenacidade com o aumento da temperatura de TTAT. No entanto, quando se analisa os valores de desvio padrão na Figura 24 e na tabela 3, nota-se que não houve alteração de tenacidade com o aumento de temperatura do TTAT. Demonstrando que o tratamento aplicado para as temperaturas de 650 e 677°C não influenciou na tenacidade.

Figura 24 - Tenacidade ao impacto no aço ASTM A36 com proteção catódica.

Fonte: Autoria Própria

Tabela 3 - Tenacidade ao impacto nos corpos de prova do aço ASTM A36 com proteção catódica.

Aço A36	650°C	704°C
CP 1	64 J	60 J
CP 2	88 J	80 J
CP 3	88 J	66 J
Média	80 J	68,66 J
Desvio Padrão	13,85	10,26

Fonte: Autoria Própria

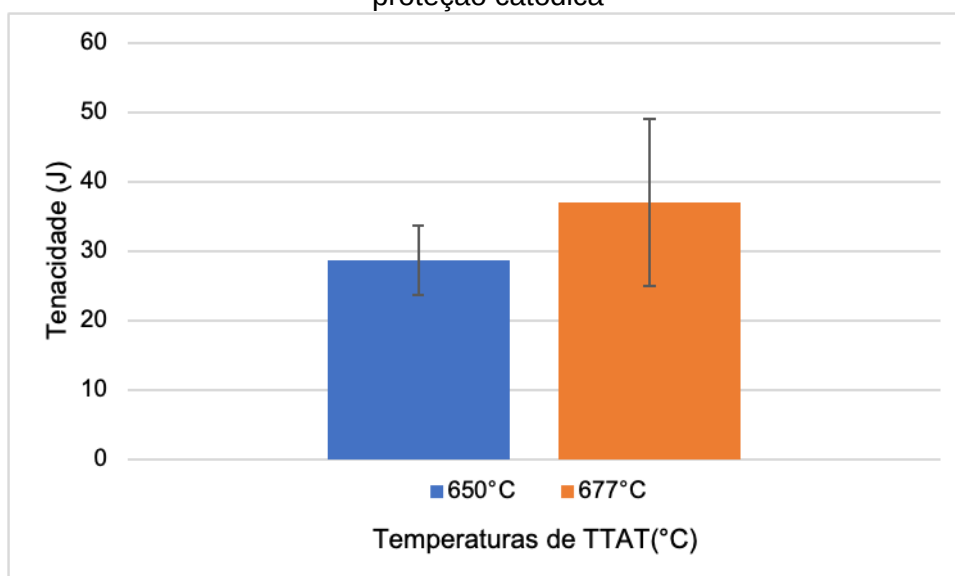
Com a aplicação do TTAT, espera-se que o aumento da temperatura reduza as tensões internas do material (CAVALCANTE, 2017). No entanto uma possível explicação para essa diminuição nos valores médios de tenacidade pode ser o crescimento dos grãos, pois, a temperatura e tempo aplicados no TTAT podem ter sido suficiente para promover o aumento do tamanho dos grãos. Os autores Cozza et al., (2018), citam que o aumento do grão pode promover a perda sutil de algumas propriedades mecânicas, inclusive da tenacidade do material.

5.2.2 Tenacidade do aço ASTM A182 F22 forjado, direção transversal

Na Figura 25 tem-se os valores médios de tenacidade, com respectivo desvio padrão, após proteção catódica, para os CPs do aço F22 forjado, com entalhe na direção transversal do tarugo, e TTAT nas temperaturas de 650, e 677°C.

Através do gráfico da Figura 25 e da Tabela 4, observa-se que, ao contrário do aço A36, os corpos de prova do aço F22 forjado com proteção catódica apresentaram, nos valores médios, indícios de aumento de tenacidade com o aumento da temperatura de TTAT. Com TTAT a 650°C, a tenacidade foi de 28,66J, e a 677°C foi de 37J. No entanto, a dispersão indicada pelo desvio padrão, indica que não houve qualquer alteração na tenacidade com o aumento da temperatura de TTAT, sugerindo que a temperatura não teve impacto sobre a tenacidade.

Figura 25 - Tenacidade ao impacto no aço ASTM A182 F22 cortado transversalmente com proteção catódica



Fonte: Autoria Própria

Na tabela 4 é possível observar o valor de tenacidade para cada corpo de prova ensaiado, assim como o desvio padrão utilizados na Figura 25.

Tabela 4 - Tenacidade ao impacto nos corpos de prova do aço ASTM A182 F22 extraído transversalmente e com proteção catódica.

Aço F22 T	650°C	677°C
CP 1	24 J	24 J
CP 2	28 J	39 J
CP 3	34 J	48 J
Média	28,66 J	37 J
Desvio Padrão	5,03	12,12

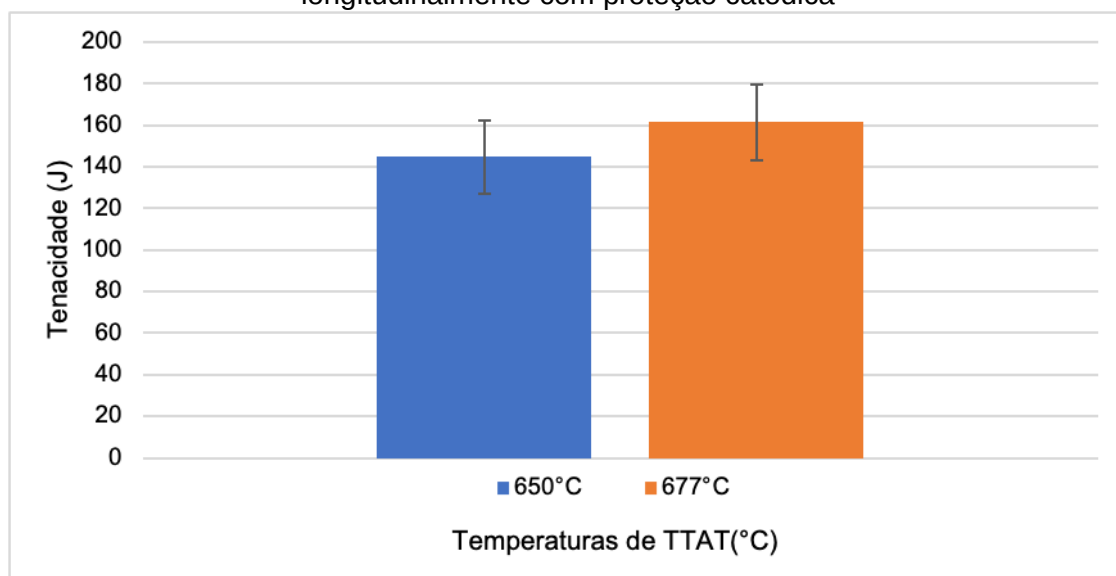
Fonte: Autoria Própria

5.2.3 Tenacidade do ASTM A182 F22 forjado, direção longitudinal

Na Figura 26 tem-se os valores médios de tenacidade, com respectivo desvio padrão, após proteção catódica, para os CPs do aço F22 forjado, com entalhe ao longo da seção longitudinal e TTAT, nas temperaturas de 650 e 677 °C.

Semelhante ao comportamento de tenacidade do F22 cortado na transversal, quando se compara os valores médios de tenacidade, Figura 26, para as temperaturas de 650°C e 677°C, 141,66 J e 161,33J respectivamente pode-se verificar também indícios de aumento de tenacidade com o aumento da temperatura de TTAT. No entanto, de forma similar ao A36 e ao F22 transversal, ao analisar os valores de desvio padrão (Figura 26 e Tabela 5), observa-se que o TTAT aplicado não teve influência na tenacidade do material. Isso sugere que o aumento da temperatura de tratamento não alterou os valores de tenacidade.

Figura 26 - Energia absorvida ao impacto no aço ASTM A182 F22 cortado longitudinalmente com proteção catódica



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 5 apresenta os valores de tenacidade correspondentes a cada corpo de prova ensaiado, conforme ilustrado na Figura 26.

Tabela 5 - Tenacidade ao impacto nos corpos de prova do aço ASTM A182 F22 extraído longitudinalmente e com proteção catódica.

Aço F22 L	650°C	677°C
CP 1	130 J	172 J
CP 2	140 J	172 J
CP 3	164 J	140 J
Média	144,66 J	161,33 J
Desvio Padrão	17,47	18,47

Fonte: Autoria Própria

Cavalcante (2017) relata que uma das funções principais do TTAT é a melhoria na tenacidade, já que há a diminuição das tensões residuais presentes no material, principalmente por se tratar de um material forjado, com isso, explicando a melhoria na tenacidade nos valores médios, com o aumento de temperatura de TTAT para o F22.

Dantas et al. (2016) observaram em seus experimentos que o aço F22, na condição de fornecimento, apresentou uma tenacidade de 152 J. Nesse trabalho, após o tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT) a 677°C, a tenacidade média do corpo de prova na direção longitudinal foi de 161,33J (Tabela 5). Esses

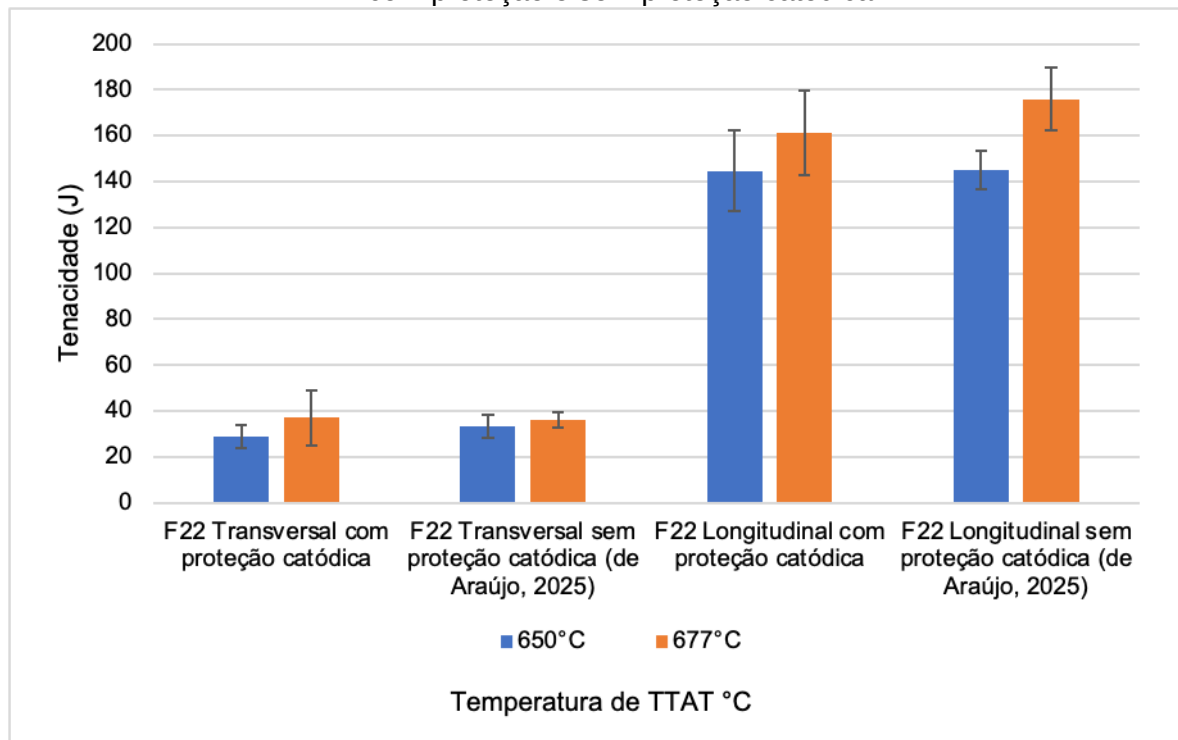
resultados indicam uma melhoria na tenacidade do material após o tratamento térmico, corroborando com a afirmação de Cavalcante (2017).

Outra possível razão para o TTAT não ter influenciado na tenacidade dos aços A36 e F22, conforme indicado pelos valores de desvio padrão, pode estar relacionada à confecção dos corpos de prova de impacto. Como discutido no tópico 4.4, as normas ASTM E23 (2018) e ISO 148-1 (2016) estabelecem que as dimensões dos corpos de prova no ensaio Charpy, incluindo largura, altura, comprimento e as características do entalhe, têm um impacto significativo nos valores de tenacidade. Assim, variações dimensionais podem ter influenciado os resultados, vale salientar que não foi possível avaliar, através de testes de projeção de perfil, a qualidade dos corpos de prova confeccionados neste estudo.

5.2.4 Comparativo de tenacidade do ASTM A182 F22 e ASTM A36 com e sem proteção catódica

No gráfico da Figura 27, tem-se o comparativo de tenacidade ao impacto entre o aço F22 (transversal e longitudinal) com proteção catódica e os valores de tenacidade do aço F22 (transversal e longitudinal) sem proteção catódica, a condição sem proteção catódica corresponde aos resultados de Araújo (2025).

Figura 27 - Comparativo de tenacidade para todas as temperaturas aplicadas de TTAT para F22 com proteção e sem proteção catódica.



Fonte: da Silva (2025) e Adaptado de Gonçalves (2025)

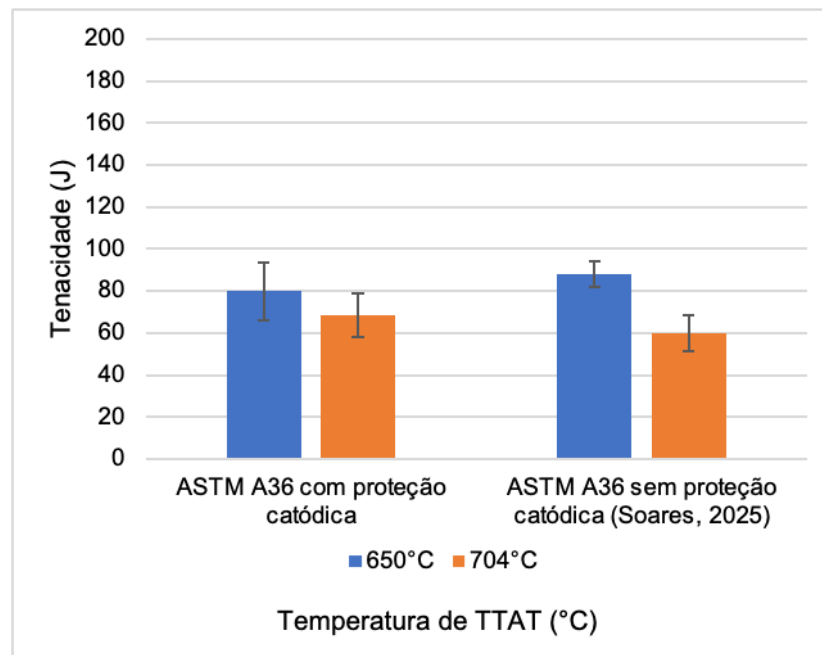
O F22 forjado na direção longitudinal apresentou maior tenacidade, pois, nessa orientação, os grãos do material estão alinhados com a direção do esforço mecânico. Esse alinhamento melhora a resistência ao impacto, tornando o material mais resistente a fraturas (ASM INTERNACIONAL, 2011).

Por outro lado, no F22 forjado na direção transversal, os grãos estão orientados perpendicularmente ao esforço mecânico, o que reduz a capacidade do material de absorver energia antes da fratura, resultando em menores valores de tenacidade (ASM INTERNACIONAL, 2011).

Ao analisar os valores médios e o desvio padrão da tenacidade do aço F22 nas direções longitudinal e transversal, com e sem proteção catódica, Figura 27, observa-se que não houve atuação do hidrogênio.

Na Figura 28, tem-se o comparativo entre o aço ASTM A36 com proteção catódica e sem proteção catódica, esta última condição corresponde aos resultados de Soares (2025).

Figura 28 - Comparativo de tenacidade para todas as temperaturas aplicadas de TTAT para A36 com proteção e sem proteção catódica.



Fonte: da Silva (2025) e adaptado de Soares (2025)

A análise do gráfico da Figura 28 indica que a presença de hidrogênio não afetou a tenacidade do material ao comparar o aço A36 com e sem proteção catódica, os valores médios de tenacidade permaneceram praticamente inalterados entre as duas condições, e a variação expressa pelo desvio padrão também não revelou diferenças significativas.

Por fim, de modo geral, o aço que se mostrou mais tenaz diante dos demais foi o F22 Longitudinal, comparando o gráfico da Figura 27 (valores médios) e o gráfico da Figura 28, como o aço F22 é um aço forjado, Silva (2018) destaca que o forjamento em aços gera uma microestrutura com grãos finos, o que pode proporcionar uma alta resistência e elevada tenacidade. Esse fator explica os maiores valores de tenacidade do F22 Longitudinal em comparação ao A36, que se encontra no estado laminado.

O aço A36 apresentou um comportamento intermediário em termos de tenacidade, com valores inferiores aos do aço F22 na direção longitudinal, porém superiores aos do F22 na direção transversal (apresentando os menores valores de tenacidade), pois o A36 laminado, quando o entalhe está na direção longitudinal

durante a laminação, os grãos se alongam na direção do processamento, proporcionando maior resistência ao impacto e melhor comportamento frente à fratura (DIETER, 1986).

5.3 Superfície de fratura

Nesse tópico tem-se os resultados referentes a superfície de fratura dos corpos de prova ensaiados, de modo a averiguar os mecanismos de fratura presentes, analisando se apresentou características de fratura dúctil, ou frágil.

5.3.1 Superfície de fratura para o aço ASTM A36

Na Figura 29, observa-se a superfície de fratura do aço A36 com proteção catódica e TTAT na temperatura de 677°C. No destaque em vermelho, percebe-se as regiões de expansão e contração nas faces laterais, como também não há aspecto cristalino na face de fratura. Segundo Garcia; Spim; Santos (2012) este aspecto de falha indica caracterização de fratura dúctil, como falado na seção 3.6.

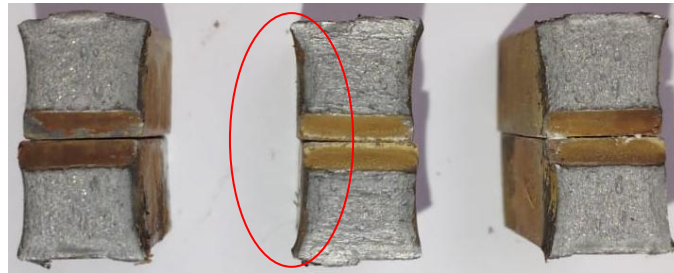
Figura 29 - Superfície de fratura dos corpos de prova do Aço A36 a 650 °C com Proteção Catódica



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 30, tem-se as superfícies de fratura também do aço A36, porém para a temperatura de 704°C e assim como a de 650° os corpos de prova apresentaram expansão e contração nas faces laterais e não apresentou superfície cristalina e como já foi mencionado, caracterização de fratura dúctil.

Figura 30 - Superfície de fratura dos corpos de prova do Aço A36 a 704°C com Proteção Catódica

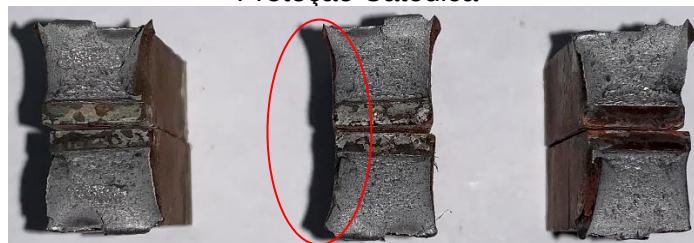


Fonte: Autoria Própria

5.3.2 Superfície de fratura para o Aço ASTM A182 F22 extraído longitudinalmente

Na Figura 31 tem-se as superfícies de fratura dos corpos de prova do aço F22 extraídos longitudinalmente com TTAT a temperatura de 650°C, a marcação em vermelho mostra a contração e a expansão nas faces laterais do corpo de prova, denotando a grande quantidade de energia absorvida pelos corpos de prova até ocorrer o rompimento, dessa forma, caracterizando como fratura dúctil.

Figura 31 - Superfície de fratura dos corpos de prova do Aço F22 longitudinal a 650°C com Proteção Catódica



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 32 tem-se as superfícies de fratura dos corpos de prova do aço F22 extraídos longitudinalmente com TTAT a temperatura de 677°C, a marcação em vermelho mostra a contração e a expansão nas faces laterais do corpo de prova, denotando a grande quantidade de energia absorvida até o rompimento, ao comparar a Figura 32 com as Figuras anteriores, nota-se expansão e contração mais aparentes, justificando a energia absorvida para esses corpos de prova demonstradas no tópico 5.2, dessa forma, semelhantemente como os corpos de prova na temperatura de 650°C com características de fratura dúctil, porém com uma maior deformação.

Figura 32 - Superfície de fratura dos corpos de prova do Aço F22 longitudinal a 677°C com Proteção Catódica



Fonte: Autoria Própria

5.3.3 Superfície de fratura para o Aço ASTM A182 F22 extraído transversalmente

Na Figura 33 tem-se as superfícies de fratura dos corpos de prova do aço F22 extraídos transversalmente com TTAT a temperatura de 650°C, a marcação em vermelho mostra que não houve contração e expansão aparente nas faces laterais dos corpos de prova, além de visualmente ter o aspecto cristalinos nas faces rompidas, dessa forma, como citado no tópico 3.6, caracterizando como fratura frágil.

Observando a Figura 33 e comparando com o valor médio de tenacidade para essa temperatura (28,33J) observa-se que o F22 transversal com TTAT a 650°C apresenta a pior condição de tenacidade em comparação com as demais condições, tanto para o F22 longitudinal, quanto para o A36.

Figura 33 - Superfície de fratura dos corpos de prova do Aço F22 TRANSVERSAL a 650°C com Proteção Catódica



Fonte: Autoria Própria

Na Figura 34 estão expostas as superfícies de fratura dos corpos de prova do aço F22 extraídos transversalmente com TTAT a temperatura de 677°C, a marcação em vermelho mostra que semelhantemente aos CPs na temperatura de 650°C, também não apresentou uma expansão e contração aparente e mostrando

também, na face rompida, o aspecto cristalino e fibroso, que são características de uma fratura Frágil.

Figura 34 - Superfície de fratura dos corpos de prova do Aço F22 TRANSVERSAL a 677°C com Proteção Catódica



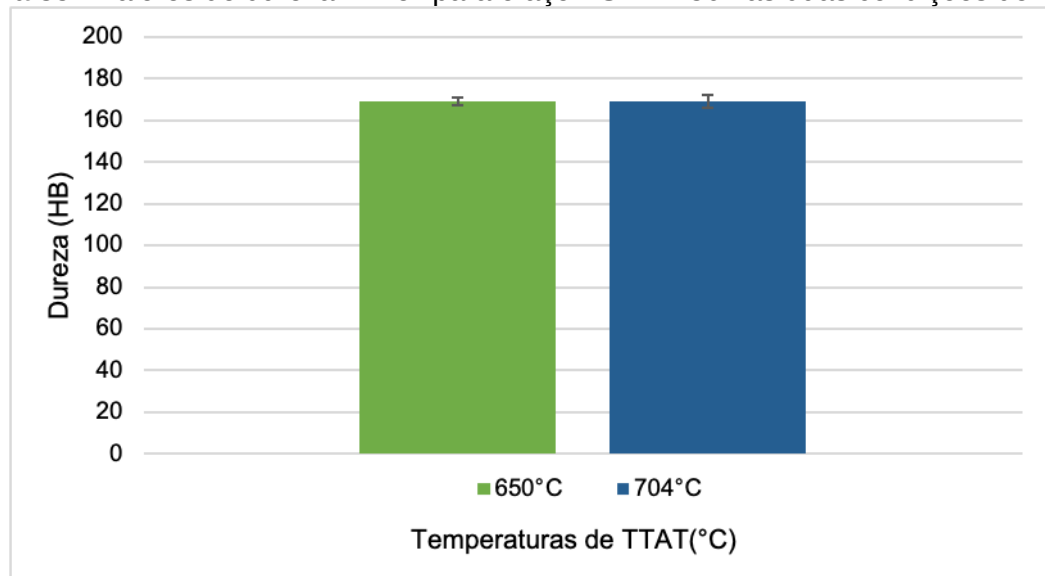
Fonte: Autoria Própria

5.4 Dureza

O ensaio de dureza Rockwell, foram realizadas 5 indentações por corpo de prova, e utilizando os valores em HBS (conversão realizada pelo próprio equipamento) foi calculado o valor médio e respectivo desvio padrão. Foram ensaiados um corpo de prova para cada temperatura de TTAT e para cada aço estudado, ou seja, tanto para o A36 quanto pro F22.

5.4.1 Dureza no aço ASTM A36

Na Figura 35 tem-se os valores de dureza Brinell para o A36 com TTAT. Nesta, verifica-se que a dureza do material comportou-se de maneira similar para ambas as condições de TTAT, sendo obtido a 650°C um valor médio de $169,2 \pm 1,64$ HB e a 704°C também um valor médio de $169,2 \pm 3,03$ HB), como observado na tabela 6.

Figura 35 - Valores de dureza Brinell para o aço ASTM A36 nas duas condições de TTAT.**Fonte:** Autoria Própria**Tabela 6** - Valores de dureza Brinell para o aço ASTM A36 nas duas condições de TTAT.

A36	650°C	704°C
1	170 HB	172 HB
2	170 HB	171 HB
3	167 HB	171 HB
4	171 HB	165 HB
5	168 HB	167 HB
Média	169,2 HB	169,2 HB
Desvio Padrão	1,64	3,03

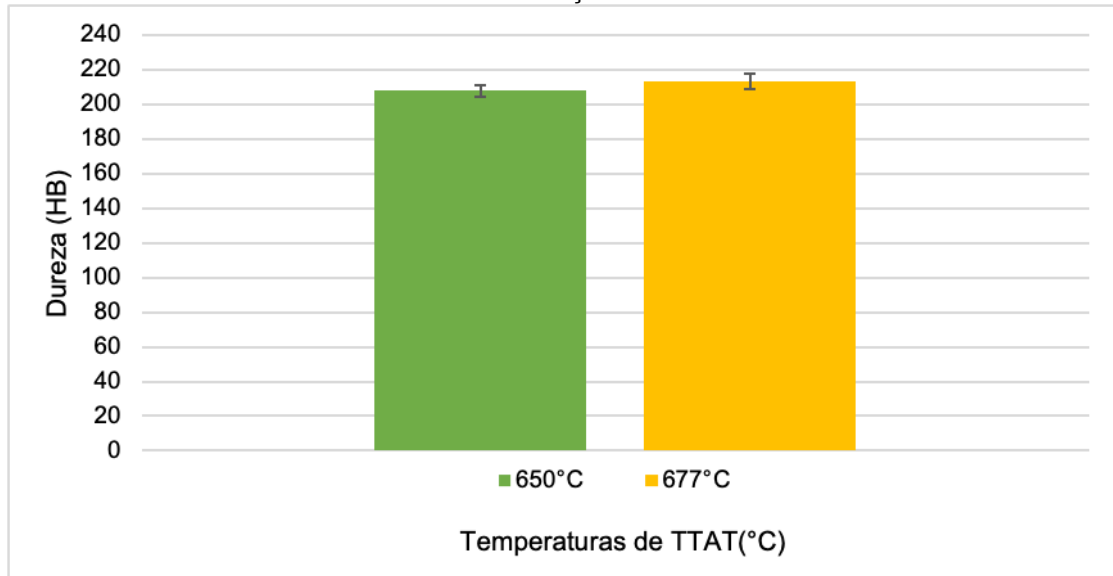
Fonte: Autoria Própria

5.4.2 Dureza no ASTM A182 F22 extraído longitudinalmente

Na Figura 36 tem-se os valores de dureza Brinell para o aço F22 cujo entalhe Charpy ficou localizado ao longo da seção longitudinal.

Ao comparar os valores médios de dureza para as temperaturas de 650°C e 677°C, que foram de $208 \pm 3,49$ HB e $213 \pm 4,5$ HB respectivamente (Figura 37 e Tabela 7), observa-se que o aumento da temperatura de TTAT não teve impacto significativo na dureza do material e ao analisar os valores de desvio padrão nota-se que não há nenhuma influência do TTAT na resposta de dureza do material.

Figura 36 - Valores de dureza Brinell para o aço ASTM A182 F22 cortado longitudinalmente nas duas condições de TTAT



Fonte: Autoria Própria

Tabela 7 - Valores de dureza Brinell para o aço ASTM A182 F22 cortado longitudinalmente nas duas condições de TTAT.

F22 L	650°C	677°C
1	207 HB	213 HB
2	210 HB	215 HB
3	210 HB	218 HB
4	202 HB	215 HB
5	210 HB	206 HB
Média	207,8 HB	213,4 HB
Desvio Padrão	3,49	4,5

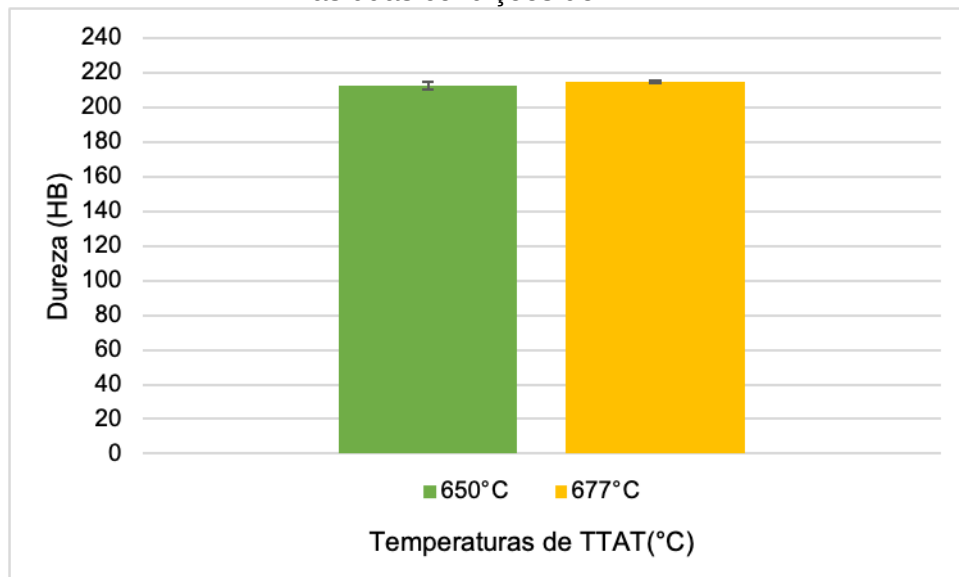
Fonte: Autoria Própria

5.4.3 Dureza no ASTM A182 F22 extraído transversalmente

Na Figura 37 tem-se os valores de dureza Brinell para o aço F22 extraído transversalmente.

Ao comparar os valores médios de dureza, $212,6 \pm 2,4$ HB e $214 \pm 0,83$ HB, para as temperaturas de 650°C e 677°C, respectivamente (Figura 38 e Tabela 8), observa-se que o aumento da temperatura de TTAT não afetou a dureza do F22 cortando transversalmente.

Figura 37 - Valores de dureza Brinell para o aço ASTM A182 F22 cortado transversalmente nas duas condições de TTAT.



Fonte: Autoria Própria

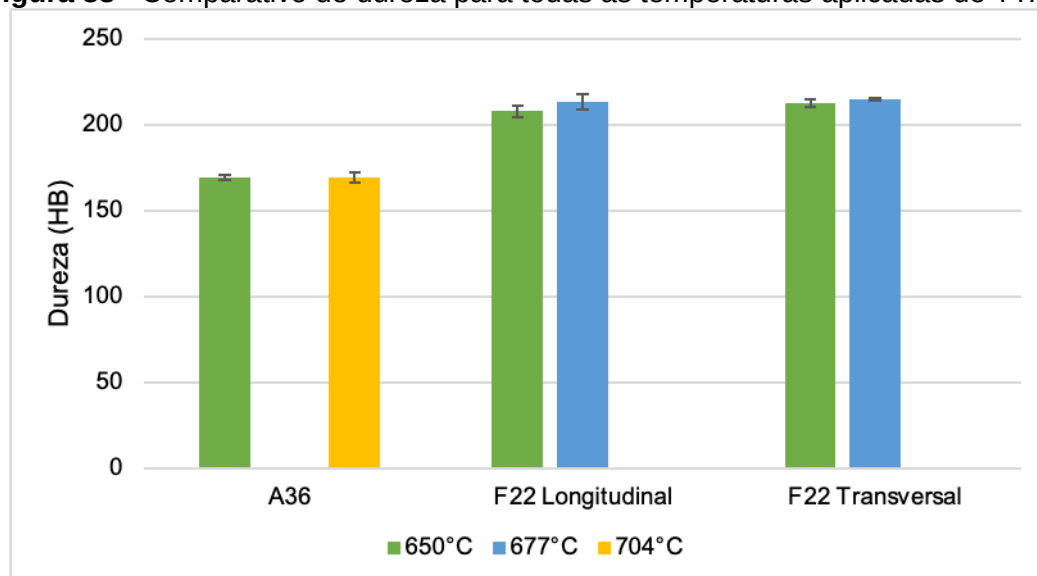
Tabela 8 - Valores de dureza brinell para o aço ASTM A182 F22 cortado transversalmente nas duas condições de TTAT.

F22 T	650°C	677°C
1	212 HB	215 HB
2	210 HB	216 HB
3	214 HB	214 HB
4	216 HB	214 HB
5	211 HB	215 HB
Média	212,6 HB	214 HB
Desvio Padrão	2,4	0,83

Fonte: Autoria Própria

No gráfico da Figura 38 tem-se os valores médios de dureza para todas as temperaturas de TTAT empregadas em cada aço.

Figura 38 - Comparativo de dureza para todas as temperaturas aplicadas de TTAT.



Fonte: Autoria Própria

Comparando ambos os materiais e condições nas quais o estudo foi realizado, Figura 38, observa-se que o aço A36 apresentou menor dureza. Quando se considera os valores de dureza do aço F22 nas direções transversal e longitudinal observa-se que não houveram alterações significativas da dureza com o aumento da temperatura de TTAT.

Para os valores de dureza, tomou-se como referência a norma NACE MR0175, que estabelece que, após o tratamento térmico de alívio de tensões (TTAT), a dureza do metal de base em juntas soldadas não deve exceder 22 HRC. Por limitações de indentador, neste trabalho só foi possível realizar os ensaios de dureza Rockwell na escala B. Se considerarmos a conversão do valor de dureza de 22HRC para HB, conforme tabela da Rijeza metalurgia (2020), obtém-se um valor equivalente de 237 HB. Diante disso, verificou-se que tanto o A36 quanto F22 não ultrapassaram o limite de dureza estabelecido pela norma.

De forma geral, observa-se que os valores de dureza de ambos os aços, quando comparados com estudos anteriores do grupo de pesquisa que analisaram amostras sem proteção catódica, indicam que a proteção catódica não teve impacto significativo na dureza. Além disso, não há registros na literatura que apontem alterações nas propriedades de dureza devido ao processo de fragilização por hidrogênio.

6 CONCLUSÃO

Considerando que a proteção catódica pode promover a fragilização pelo hidrogênio nos aços, este trabalho teve o intuito de analisar a influência da proteção catódica na tenacidade ao impacto do aço ASTM A182 F22 e ASTM A36 em condições variadas de processamento termomecânico. Tal análise foi realizada com base em ensaios de dureza e impacto, além da análise do aspecto da superfície de fratura. Com isso, concluiu-se que:

- Para as duas condições de TTAT aplicados aos aços F22 e A36 o aparato montado para proteção catódica se mostrou eficiente, visto que não houve corrosão dos corpos de prova no período de 14 dias, tempo no qual estavam inseridos na proteção.
- Não foi observada fragilização por hidrogênio no aço F22 para o período de proteção empregado, em ambas as direções analisadas (longitudinal e transversal). Os valores de tenacidade e dureza permaneceram inalterados na comparação entre os corpos de prova com e sem (aço F22 (GONALVES, 2025)) proteção catódica.
- Não foi observada uma fragilização por hidrogênio no aço A36 para o período de proteção empregado, uma vez que os valores de tenacidade e dureza permaneceram inalterados. Essa conclusão é baseada na comparação entre os corpos de prova com e sem proteção catódica, considerando os resultados obtidos pelo grupo de pesquisa que testaram os corpos de prova sem (aço A36 (SOARES, 2025)) proteção.
- Os valores médios indicam que o TTAT demonstrou eficiência, pois o aumento da temperatura do tratamento resultou em um aumento de tenacidade. Esse comportamento sugere que a temperatura de 677°C foi a mais adequada para o aço F22 Longitudinal e transversal, porém ao considerar os valores de desvio padrão, o tratamento aplicado não influenciou na tenacidade e na dureza dos aços.
- Os corpos de prova do aço F22 extraídos longitudinalmente apresentaram os maiores valores de tenacidade em comparação com os demais, demonstrando que essa orientação confere ao material uma maior tenacidade ao impacto.

- O modo de fratura observado no ensaio charpy para os aços A36 e F22 extraído longitudinalmente nas duas temperaturas de TTAT foi predominante dúctil, o F22 Longitudinal absorvendo mais energia que o aço A36.
- No ensaio Charpy, o aço F22 extraído transversalmente apresentou um modo de fratura predominantemente frágil nas duas temperaturas de TTAT, com indicativo de melhoria na tenacidade observada a 677°C (considerando os valores médios de tenacidade).
- O F22 extraído no sentido longitudinal mostrou-se o mais promissor, tanto em tenacidade quanto em dureza. E, considerando os valores médios, há um indicativo de que o TTAT a 677°C destacou-se como a condição ideal em comparação com as demais, porém ao considerar os valores de desvio padrão, pode-se chegar a conclusão de que o tratamento aplicado não influenciou na tenacidade nem na dureza do material.
- O F22 extraído transvesal se mostrou o menos promissor em tenacidade, sendo o pior cenário na condição com TTAT a 650°C.
- Levando em consideração os valores de desvio padrão para ambos os aços em todas as condições estudadas, demonstrou que o tratamento termico realizado não influenciou nos valores de tenacidade e dureza.

Em resumo, o F22 extraído longitudinalmente demonstrou a maior tenacidade em comparação com as demais condições estudadas. O sistema de proteção catódica mostrou-se eficiente, pois impediu a oxidação dos corpos de prova e não favoreceu a fragilização por hidrogênio. Considerando os valores médios de tenacidade para o F22 na longitudinal e com TTAT a 677°C teve-se a melhor resposta de tenacidade. Porém, considerando os valores de desvio padrão os TTATs aplicados em ambos os aços não influenciaram os valores de tenacidade e dureza dos materiais (tanto o A36, quanto para o F22). Com isso, para a aplicação em sistemas *Offshore*, o F22 com entalhe na longitudinal mostrou-se mais promissor.

7 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilização de retifica para garantir uma precisão nas dimensões dos corpos de prova;
- Utilização de uma ferramenta mais adequada e mais precisa para a realização do entalhe, garantindo que este esteja no centro do corpo de prova nas dimensões predefinidas;
- Realização de MEV (microscopia eletrônica de varredura) para analisar a superfície de fratura dos CPs.
- Realizar a proteção catódica por um período maior de dias;
- Confeccionar uma quantidade maior de corpos de prova de impacto;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKSELSEN, O.M., JOHNSEN, R., EGGEN, T. G., NYHUS, B. Welding and Corrosion/Corrosion Protection of 12%Cr steel – A State of the Art Review. SINTEF Report, 2005.

ALMEIDA, José Gonçalves de. **Análise da influência do Hidrogênio na tenacidade quase estática de juntas soldadas de aços ARBL**. 2014. 230 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - Pb, 2014.

ALMEIDA, MONICA SANTOS. **ANÁLISE COMPARATIVA DA MICROESTRUTURA E DA DUREZA DO AÇO ASTM A182 F22**. Orientador: Dr. José Hilton Ferreira da Silva. 2018. Trabalho de conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA, [S. l.], 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23-18**: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. - ed. U.s: -, 2018. 10 p. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/101485/d54d0ee89c274e08bf95ec29b7172b69/ASTM-E23-18.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2024.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE ENGENHEIROS DE CORROSÃO. **NACE MR0175/ISO 15156-1**: Petroleum and natural gas industries— Materials for use in H₂S-containing Environments in oil and gas production. 1 ed. Nova York: -, 2001. 149 p. Disponível em: <https://www.octalsteel.com/wp-content/uploads/2017/10/NACE-MR0175-ISO15156-specification.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2024.

ASSOCIATION FOR MATERIALS, ASM. *ASM Handbook*. Volume 19: Fatigue and Fracture. Materials Park, OH: ASM International, 2011.

BRITO, Francisco Felipe Gomes. **Avaliação da Técnica de Dupla Camada na Soldagem TIG Considerando a Tenacidade e Características Metalúrgicas de Juntas de Aço AISI 8630M e ASTM A182 F22**. 2014. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - Ce, 2014.

CASTRO, Edmilson José de; AGUIAR, Luciano Marinato. **COMISSIONAMENTO E CONDICIONAMENTO DE SISTEMAS DE PROTEÇÃO CATÓDICA EM DUTOS SUBMARINOS**. 2010. 67 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Comissionamento e Condicionamento, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – Es, 2010.

CAVALCANTE, FABRÍCIO JOSÉ NÓBREGA. **AVALIAÇÃO DO HIDROGÊNIO NA TENACIDADE QUASE ESTÁTICA DE UMA JUNTA SOLDADA DISSIMILAR CONSTITUÍDA DE AÇO AISI 8630M AMANTEIGADO COM ER80S-D2**. Orientador: DR. SEVERINO JACKSON GUEDES DE LIMA. 2014. TESE DE DOUTORADO (DOUTORADO EM ENGENHARIA MECÂNICA) - UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA, [S. l.], 2014.

CHIAVERINI, VICENTE. **TECNOLOGIA MECÂNICA: PROCESSOS DE FABRICAÇÃO E TRATAMENTO**. 2. ed. [S. l.: s. n.], 1986. v. II.

CHIAVERINI, Vicente. Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. ABM: São Paulo, 2002.

DIETER, George E. *Mechanical Metallurgy*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1986.

COSTA, Léo Roberto de Oliveira. **SUSCEPTIBILIDADE À FRAGILIZAÇÃO PELO HIDROGÊNIO DA JUNTA SOLDADA DO AÇO 2,25Cr-1Mo**. 2011. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

COZZA, Leandro Macedo; JUNIOR, Marcos Fernando Da Silva; MEDEIROS, Jorge Luis; BIEHL, Luciano Volcanoglo; MARTINS, Carlos Otávio Dama; DE SOUZA, José. Efeito do tratamento térmico de alívio de tensões na microestrutura e tamanho de grão de um aço microligado. **Revista Liberato** , [s. l.], Junho 2018

DANTAS, V. A.; SILVA JUNIOR, M. Q.; GOMES, A. V. R. **ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS PARA DIVERSOS TRATAMENTOS TÉRMICOS DO AÇO ASTM A182 F22**. Artigo (Engenharia Mecânica) - UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO, [S. l.], 2016.

DAI, Lippold. Tempering Behavior of the Fusion Boundary Region of an F22/625 Weld Overlay. *Welding Journal*, vol. 96, p. 467- 480-s, Dez., 2017

DE ARAÚJO, Gean Gonçalves. **Comportamento Mecânico do Aço ASTM A182 F22 Submetido a Tratamento Térmico**. 2025. Monografia (Bacharel em Ciência e Tecnologia) - UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO, Caraúbas - RN, 2025.

DIAS, Gabriel Pieta. **Avaliação da tenacidade à fratura de um aço inoxidável supermartensítico submetido à proteção catódica em água do mar**. 2009. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Poto Alegre, 2009.

DODGE, M. F. *The Effect of Heat Treatment on the Embrittlement of Dissimilar Welded Joints*. Tese (doutorado), University of Leicester, Leicester, 2014.

FERREIRA, Daniel Correia Freire. **ENSAIOS E METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE INTEGRIDADE PARA EQUIPAMENTOS EM AÇO BAIXA LIGA SUJEITOS À FRAGILIZAÇÃO POR HIDROGÊNIO**. 2017. Dissertação de mestrado (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais.) - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, [S. l.], 2017.

FONSECA, Eduardo da Silva; DA SILVA, Krishna Alcantara; SANTANA, Ana Isabel de Carvalho; PINTO, Wilma Clemente Lima. ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO AÇO A-36 EM MEIOS CONTENDO ÍONS CLORETO E ÍONS SULFATOS. **Revista Univap** , São José dos Campos-SP-Brasil, v. 26, n. 5, 2020.

GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime A.; SANTOS, Carlos Alexandre dos. Ensaaios dos Materiais, 2ª edição . 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: 16 fev. 2024.

GENTIL, V. Corrosão. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2007.

GENTIL, V. Corrosão. 6.ed. - Rio de Janeiro : LTC, 2017. ISBN 978-85- 216-1804-1.

GONÇALVES, Thiago Carvalho. **EFEITOS DO HIDROGÊNIO NA TENACIDADE À FRATURA DO AÇO 2,25Cr-1Mo-0,25V**. 2013. 74 f. TCC (Doutorado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Hassel,T.A., Effect of heat Tratamento on microstructure, strength and hardness of F22 steel. Dissertação (mestrado), Norwegian University of Scienci and Technology, Norwegian,2013.

HORTA, Renato de Mello Brandão; DE MEDEIROS, Edson Góis; DA SILVA, Álvaro Antônio Terra Martins; QUARESMA, Rodrigo Leite. Revitalização de Sistemas de Proteção Catódica Instalados em Plataformas Marítimas Fixas de Produção de Óleo & Gás. **INTERCORR 2014**, Fortaleza, 2014.

IEC Engenharia. O que é proteção catódica? *IEC Engenharia*. Disponível em: <https://iecengenharia.com.br/noticia/o-que-e-protecao-catodica/>. Acesso em: 28 nov. 2024.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 148-1:2016 – Metallic materials – Charpy pendulum impact test – Part 1: Test method. Geneva: ISO, 2016.

LIMA, Marcelo Tadeu Tomazela. **AÇÃO DO HIDROGÊNIO NA PERDA DE DUCTILIDADE DO AÇO INOXIDÁVEL FERRÍTICO AISI 409***. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 72., 2017, São Paulo. **Anais do Congresso Anual da ABM**. São Paulo: Abm, 2017. p. 183-190.

LIMA, Flávia Barros. Microestrutura de aços baixa liga tipo 41xx – Uma abordagem quantitativa. PGEM: UFRJ, 2006.

OLIVEIRA, G. L. G. **Soldagem dissimilar dos aços AISI 8630M e ASTM A182 F22 para aplicações subaquáticas**: 2013. 205p. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. OLIVEIRA, Mauro. Engenharia de Forjamento. 14. ed. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2017.

PEDDLE, B. E.; PICKLES, C. A. **Carbide and Hardness Development in the Heat Affected Zone of Tempered and Postweld Heat-Treated 2.25Cr-1Mo Steel Weldments**. *Journal of Materials Engineering and Performance*. USA, v.9, n.5, p. 477-488, oct. 2000.

RIJEZA METALURGIA (Rio Grande do Sul). **TABELA DE CONVERSÃO DE DUREZAS**. Disponível em: https://rijeza.com.br/wp-content/uploads/2020/10/1533757415dureza_brinell_rockwell_vickers.pdf. Acesso em: 16 fev.2024

ROSADO, D.B. **Comparação do efeito da fragilização por hidrogênio e aços com resistência à tração acima de 1000 MPa**. 2011. 92f., Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

R1 ASSET INTEGRITY. **A Ameaça Silenciosa da Corrosão no Setor Offshore**. Vitória - ES, 23 ago. 2024. Disponível em: https://r1eng.tech/corrosao/a-ameaca-silenciosa-da-corrosao-no-setor-offshore/?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 24 jan. 2025.

SILVA, Adiana Nascimento. **ANÁLISE DO EFEITO DO HIDROGÊNIO NA RESPOSTA DE TENACIDADE À FRATURA EM JUNTA SOLDADA DISSIMILAR**. 2018. 181 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

SOARES, Fernanda Marinho. **AVALIAÇÃO DA TENACIDADE AO IMPACTO E DUREZA DO AÇO ASTM A36 SUBMETIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS DE PROCESSAMENTO TÉRMICO**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso - Bacharelado em Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas, 2025.

Stroe, M.E. Hydrogen Embrittlement of Ferrous Materials. Tese de Doutorado. Faculty of Applied Sciences – Université Libre de Bruxelles, 2006.
TENAX AÇOS ESPECIAIS (Rio de Janeiro). **Aços para construção mecânica: composição química do aço astm a36**. Composição química do aço ASTM A36. Disponível em: https://www.tenax.com.br/tenax/wp-content/themes/rocco/pdfs/acos-para-construcao-mecanica/Catalogo_Construcao_Mecanica.pdf. Acesso em: 16 jan. 2024.

LEMUS TORRES, L.F., **Influência da microestrutura na interação do hidrogênio com o aço 2,25Cr-1Mo Envelhecido**., Tese de D.Sc., Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, COOPE/UFRJ, 2011.

THOMSON, R. C.; MILLER, M. K. **Carbide Precipitation in Martensite During the Early Stages of Tempering Cr- and Mo-Containing Low Alloy Steels**. Acta Mater. v. 46, n. 6, p. 2203-2213. 1998.

VIANA, DÁVILA DE OLIVEIRA. **TRATAMENTO TÉRMICO EM AÇO CARBONO ASTM A36 E SUA INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA À CORROSÃO**. 2019. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade Federal do Ceará, [S. l.], 2019.

VITIELLO, Rodrigo Pommerehn. **Trincamento sob tensão induzido pelo hidrogênio em aços superdúplex submetidos à proteção catódica**. 2009. 97 f.

Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalurgica e de Materiais,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.