



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO

PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA – CAMPUS CARAÚBAS

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

DANRLEY SENA E SILVA

**INFLUÊNCIA DA HIDROGENAÇÃO NA TENACIDADE AO IMPACTO DO AÇO 1045
PARA CONDIÇÕES VARIADAS DE PROCESSAMENTO TÉRMICO.**

CARAÚBAS

2021

DANLEY SENA E SILVA

**INFLUÊNCIA DA HIDROGENAÇÃO NA TENACIDADE AO IMPACTO DO AÇO 1045
PARA CONDIÇÕES VARIADAS DE PROCESSAMENTO TÉRMICO.**

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

Orientadora: Profa. Dra. Adiana Nascimento Silva.

Co-orientador: Prof. Dr. Marcelo Batista de Queiroz

CARAÚBAS

2021

© 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 tornar-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.

S586i Silva, Danrley Sena e.
INFLUÊNCIA DA HIDROGENAÇÃO NA TENACIDADE AO
IMPACTO DO AÇO 1045 PARA CONDIÇÕES VARIADAS DE
PROCESSAMENTO TÉRMICO / Danrley Sena e Silva. -
2021.

52 f. : il.

Orientadora: Adiana Nascimento Silva.
Coorientador: Marcelo Batista de Queiroz .
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-Árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2021.

1. Aço 1045. 2. Hidrogenação. 3. Proteção
catódica. 4. Fragilização. I. Silva, Adiana
Nascimento, orient. II. Queiroz, Marcelo Batista
de, co-orient. III. Título.

DANLEY SENA E SILVA

**INFLUÊNCIA DA HIDROGENAÇÃO NA TENACIDADE AO IMPACTO DO AÇO 1045
PARA CONDIÇÕES VARIADAS DE PROCESSAMENTO TÉRMICO.**

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

Defendida em: 01 / 06 / 2021.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Adiana Nascimento Silva. (UFERSA)

Presidente

Prof. Dr. Marcelo Batista de Queiroz (UFERSA)

Membro Examinador

Prof. Me. Victor de Andrade Dantas (UFERSA)

Membro Examinador

Prof. Dr. Wendel Albano (UFERSA)

Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que na sua infinita bondade me deu condições de chegar até aqui mesmo em maio um tempo de pandemia.

Agradeço também aos meus pais, que sempre fizeram de tudo para me tornar a pessoa que hoje sou, me incentivando e me apoiando incansavelmente todos os dias, fazendo o impossível para que eu continuasse crescendo.

A minha namorada Stefanny Ellen Costa Vieira, pelo companheirismo e pelo incentivo ao longo de todo curso e na realização deste trabalho, estando em todas as etapas deste.

Agradeço a minha orientadora, Dra. Adiana Nascimento Silva pela orientação, dedicação e por depositar em mim tamanha confiança.

Agradeço pelo apoio ao meu coorientador Dr. Marcelo Batista de Queiroz, por todo conhecimento repassado e paciência.

Aos meus amigos, que ao longo dessa jornada dividiram não apenas os dias, mas os sonhos, as aflições e as conquistas.

“Trabalhe duro e em silêncio. Deixe que seu sucesso faça barulho.” Dale Carnegie

RESUMO

A busca incessante do homem por novas reservas de petróleo e gás o tem levado a águas cada vez mais profundas, exigindo níveis de segurança e confiabilidade operacional ainda mais elevados, para assim atingir maior eficiência operacional e evitar o acontecimento de falhas catastróficas como as acontecidas no golfo do México em 2006 na plataforma Thunder Horse. Entre as principais causa de falhas estruturais, tem-se o processo de fabricação, as condições operacionais e a fragilização pelo hidrogênio. Sendo a última causa muito perigosa, pois pode levar a estrutura a falhar mesmo quando o carregamento aplicado é inferior ao limite de escoamento do material. Com o intuito de contribuir com pesquisas futuras na área de fragilização por hidrogênio em aços, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a influência da hidrogenação na tenacidade ao impacto do aço 1045, para duas condições de processamento térmico, temperado e revenido, e, recozido, assim como, analisar a resposta do material na condição como fornecido. Contribuindo assim na avaliação do sistema de proteção catódica em aço de baixo custo amplamente aplicado na construção de elementos mecânicos. A proteção catódica ocorreu a temperatura ambiente com potencial de -1100 mVerc, pelo período de 168h. A tenacidade ao impacto foi avaliada por meio do ensaio Charpy com martelo pendular de 300J. Os ensaios de impacto para os corpos de prova com e sem hidrogenação apresentaram as mesmas características, com valores médios de tenacidade de respectivamente, 13J e 12J para como fornecido, 28J e 20J para recozido e 62J e 46J para temperado e revenido. O material temperado e revenido se mostrou mais tenaz quando comparado com as condições recozido e como fornecido, esse resultado pode ter sido induzido pela precipitação de carbonetos na martensita revenida. De forma global os resultados do ensaio de impacto demonstram que o hidrogênio não gerou influências na absorção da energia de impacto em todas as condições analisadas.

Palavras-chave: Aço 1045. Hidrogenação. Proteção catódica. Fragilização.

ABSTRACT

The unceasing pursuit of man for new oil and gas reserves has led him to deeper and deeper waters, demanding even higher levels of safety and operational reliability, in order to achieve greater operational efficiency and avoid the occurrence of catastrophic failures such as those that occurred in the Gulf of Mexico in 2006 on the Thunder Horse platform. Among the main causes of structural failures, there is the manufacturing process, operating conditions and hydrogen embrittlement. The latter being a very dangerous cause, as it can cause the structure to fail even when the applied load is below the yield strength of the material. In order to contribute to future research in the area of hydrogen embrittlement in steels, the present work aims to evaluate the influence of hydrogenation on the tenacity to the impact of 1045 steel, for two conditions of thermal processing, tempered and tempered, and, annealed, as well as, analyze the response of the material in the condition as supplied. Thus contributing to the evaluation of the low cost steel cathodic protection system widely applied in the construction of mechanical elements. Cathodic protection occurred at room temperature with a potential of $-1100 \text{ mV}_{\text{SCE}}$, for a period of 168 hours. Impact toughness was assessed using the Charpy test with a 300J pendulum hammer. The impact tests for specimens with and without hydrogenation showed the same characteristics, with mean values of tenacity of respectively, 13J and 12J for as supplied, 28J and 20J for annealed and 62J and 46J for tempered and tempered. The tempered and tempered material proved to be more tenacious when compared to the annealed conditions and as provided, this result may have been induced by the precipitation of carbides in the tempered martensite. Overall, the results of the impact test show that hydrogen did not influence the absorption of impact energy in all conditions analyzed.

Keywords: 1045 steel. Hydrogenation. Cathodic protection. Embrittlement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo de têmpera e revenimento.....	18
Figura 2 – Diagrama ferro carbono (Fe-Fe ₃ C)	19
Figura 3 – Diagrama de transformação para recozimento.....	20
Figura 4 – Microestrutura do aço 1045 em condição comercial. 50x e 100x.....	21
Figura 5 – Martensita revenido do aço 1045, com 50x e 100x.....	21
Figura 6 – Microestrutura do aço 1045 recozido.....	22
Figura 7 – Proteção catódica galvânica	23
Figura 8 – Proteção catódica por corrente impressa.....	24
Figura 9 – Sítios aprisionadores de hidrogênio	25
Figura 10 – Layout do Ensaio de Impacto.....	27
Figura 11 – Trinca por clivagem	28
Figura 12 – Trinca por Dimples	28
Figura 13 – Superfície de fratura de ensaio de Impacto aço ABNT/SAE 1020.....	29
Figura 14 – Ensaio de dureza Rockwell	30
Figura 15 – Cronologia do trabalho.....	31
Figura 16 – Dimensões do Corpo de prova de Charpy	33
Figura 17 – Aparato de suporte dos corpos de prova e eletrodos.....	34
Figura 18 – Aparato com corpos de prova	34
Figura 19 – Sistema usado no processo de proteção catódica.	35
Figura 20 – Corpos de prova após imersão em solução de CuSO ₄	35
Figura 21 – Máquina de ensaio de impacto Charpy JB-W300A	36
Figura 22 – Durômetro Mitutoyo HR – 320MS.....	36
Figura 23 – Microscópio Olympus GX51	37
Figura 24 – Resultados do ensaio de impacto.	40
Figura 25 – Superfície de fratura CPs como fornecido. A) sem hidrogenação, B) Com hidrogenação.....	41
Figura 26 – Superfície de fratura Corpo do aço Recozido. A) sem hidrogenação, B) Com hidrogenação.....	42
Figura 27 – Superfície de fratura CPs do aço temperado e revenido. A) sem hidrogenação, B) Com hidrogenação	42
Figura 28 – Microestrutura do corpo de prova como fornecido (CF). Ataque Nital 2%.	43
Figura 29 – Microestrutura do corpo de prova recozido (RE). Ataque Nital 2%.....	44

Figura 30 – Microestrutura do corpo de prova temperado e revenido (RV). Ataque Nital	
2%.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Composição química do Aço ABNT 1045.....	17
Tabela 2	–	Propriedades mecânicas do aço ABNT 1045	17
Tabela 3	–	Propriedades Mecânicas do aço ABNT 1045 revenido	20
Tabela 4	–	Composição química do Aço ABNT 1045.....	31
Tabela 5	–	Propriedades mecânicas do aço ABNT 1045 com fornecido	32
Tabela 6	–	Tenacidade ao impacto do aço 1045 como fornecidos (CF)	38
Tabela 7	–	Tenacidade ao impacto do aço 1045 recozido (RE)	39
Tabela 8	–	Tenacidade ao impacto do aço 1045 temperado e revenido (TR)	39
Tabela 9	–	Ensaio de dureza para os corpos de prova com hidrogenação.	45
Tabela 10	–	Ensaio de dureza para os corpos de prova com hidrogenação.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
CF	Aço como fornecido
RC	Aço recozido
RV	Aço temperado e revenido
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
TTT	Transformação Tempo Temperatura
FEM	Força eletromotriz
ASTM	Sociedade americana de testes e materiais.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos.....	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos:.....	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Aço ABNT 1045	17
2.2	Processamento térmico	17
2.2.1	Têmpera	18
2.2.2	Revenimento.....	19
2.2.3	Recozimento	20
2.2.4	Microestrutura	21
2.3	Proteção catódica.....	22
2.4	Hidrogenação	24
2.5	Ensaio.....	26
2.5.1	Ensaio de impacto Charpy	26
2.5.2	Ensaio de dureza.....	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1	Descrição sobre o material utilizado	31
3.2	Tratamento.....	32
3.3	Confecção dos corpos de prova	32
3.4	Proteção catódica.....	33
3.5	Ensaio.....	35
3.5.1	Impacto Charpy.....	35
3.5.3	Dureza Rockwell:	36
3.5.4	Microscopia óptica	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
4.1	Processo de proteção catódica.	38
4.2	Ensaio de impacto Charpy.....	38
4.3	Superfície de fratura	41
4.4	Microestrutura.....	43
4.5	Ensaio de dureza Rockwell	45
5	CONCLUSÃO.....	46
6	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	47
	REFERÊNCIAS	48

APÊNDICES	51
Apêndice A.....	51

1 INTRODUÇÃO

A busca do homem por novas reservas de petróleo e gás natural o tem levado a explorar águas profundas chamadas *offshore*. O que segundo Almeida (2014) tem se tornado um desafio científico e tecnológico para o setor petrolífero. Ainda segundo esse autor a severidade do ambiente e as dificuldades do processo tem ocasionado falhas catastróficas, gerando prejuízos econômicos, ambientais e ainda ocasionando mortes. Como exemplo tem-se as falhas ocorridas no golfo do México em 2006 na plataforma Thunder Horse, de acordo com Burk e Ribardo (2010). Cavalcante (2014) destaca que o processo de exploração precisa de níveis de segurança e confiabilidade operacional ainda mais elevada, para assim atingir maior eficiência operacional.

De acordo com Almeida (2014) os principais fatores de falhas nas estruturas *offshore* estão associados aos materiais utilizados, ao processo de fabricação dos componentes, as condições operacionais e a fragilização dos aços pelo hidrogênio. Segundo Araujo (2013) a fragilização pode ocorrer devido a átomos de hidrogênio que são produzidos no processo de fundição e soldagem ou ainda é produzido eletroquimicamente nos sistemas de proteção catódica a que as estruturas são submetidas. Silva (2018) ainda destaca que as estruturas fragilizadas pelo hidrogênio podem apresentar falhas em serviço mesmo estando submetidas a carregamentos inferiores ao seu limite de escoamento.

Visando melhor o entendimento e buscando soluções para os problemas citados acima e relacionados com a fragilização por hidrogênio, vários estudos vêm sendo realizados. Em um deles, Cavalcante (2014) fala que, considerando a presença de trinca no material, é inevitável ou de difícil exclusão, o estudo do comportamento da fratura, de forma que se torna um parâmetro importante na seleção e aplicação dos materiais. Uma das formas de se estudar a fratura do material é através da tenacidade ao impacto.

No presente trabalho realizou-se estudo da tenacidade ao impacto do aço 1045 para as condições como fornecido e com dois processamentos térmicos, sendo eles têmpera e revenido e, recozimento. A propriedade de tenacidade ao impacto foi levantada nas condições sem e com proteção catódica, na temperatura ambiente e, com potencial de $-1100 \text{ mV}_{\text{ERC}}$. Almeida (2014) menciona que esse potencial é comumente usado em sistemas *offshore*, e favorece a atuação do hidrogênio e conseqüentemente a fragilização da estrutura.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Estudar o efeito do processo de hidrogenação, decorrente da proteção catódica, na tenacidade ao impacto do aço 1045, estando o mesmo nas condições como fornecido e submetido a processamentos térmicos.

1.1.2 Objetivos específicos:

- Realizar tratamentos térmicos de têmpera, revenido e recozimento no aço 1045.
- Fabricar corpos de prova de tenacidade ao impacto para o material como fornecido e com tratamentos térmicos.
- Submeter os corpos de prova a proteção catódica.
- Analisar as propriedades por meio de ensaio de impacto.
- Analisar os mecanismos de fratura.
- Realizar análise microestrutural.
- Levantar as propriedades de dureza.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Aço ABNT 1045

Para a norma NBR 172/2000 o aço ABNT 1045 é classificado como aço carbono, aço para construção mecânica e ainda como aço especial. Segundo Azevedo (2002) o aço ABNT 1045 é amplamente aplicado em elementos mecânicos como engrenagens, porém entre as suas aplicações destaca-se o seu uso em eixos de bombas de torres de destilação e eixos de ventiladores das refinarias de petróleo e gás e nesse ambiente agressivo o material sofre um desgaste acentuado.

A norma NBR NM 87-2000 define as composições químicas dos aços para construção mecânica e, de acordo com esta, a composição química do aço ABNT 1045 deve apresentar os componentes e proporções conforme Tabela 1, vale destacar que este material está enquadrado na categoria de médio teor de carbono. Na Tabela 2, observa-se as principais propriedades mecânicas do aço sem processamento térmico.

Tabela 1: Composição química do Aço ABNT 1045

Carbono (C)	Manganês (Mn)	Fosforo (P)	Enxofre (S)
0,43% – 0,50%	0,60% – 0,90%	0,040%	0,050%

Fonte: NBR NM 87-2000

Tabela 2: Propriedades mecânicas do aço ABNT 1045

Limite de escoamento	Dureza	Modulo de elasticidade	Redução
450 MPa	86,8HRB – 95,2HRB	190GPa – 210GPa	40%

Fonte: Gelson Luz (2017)

2.2 Processamento térmico

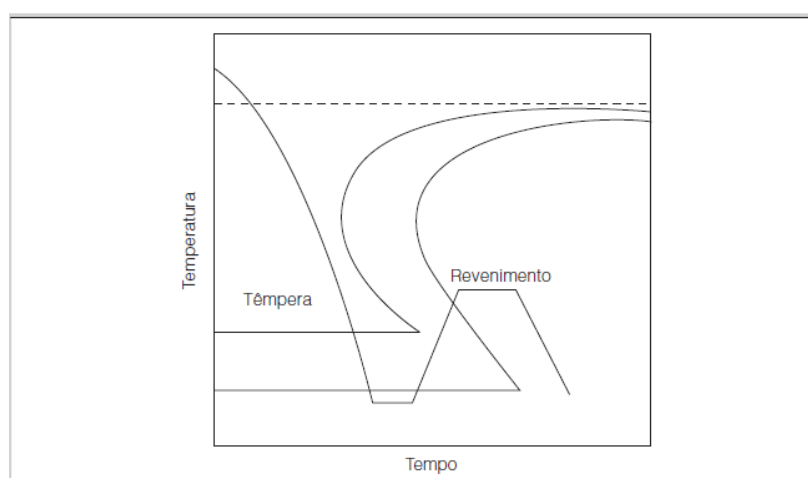
Processamentos térmicos ou tratamentos térmicos é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que maioria dos materiais metálicos são submetidos, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento com objetivo de alterar as suas propriedades mecânicas (CHIAVERINI, 2012). O autor também menciona que os tratamentos térmicos modificam a estrutura dos aços, variando o grau de modificação, por consequência irá alterar as suas propriedades.

Askeland e Phulé (2008) listam uma serie de objetivos que levam a realização dos tratamentos térmicos, e entre eles estão, eliminar os efeitos do trabalho a frio, controlar o endurecimento por dispersão ou ainda melhorar a usinabilidade. Segundo Silva e Mei (2010) os tratamentos térmicos mais usados são Tempera, Revenimento, Recozimento e Normalização.

2.2.1 Têmpera

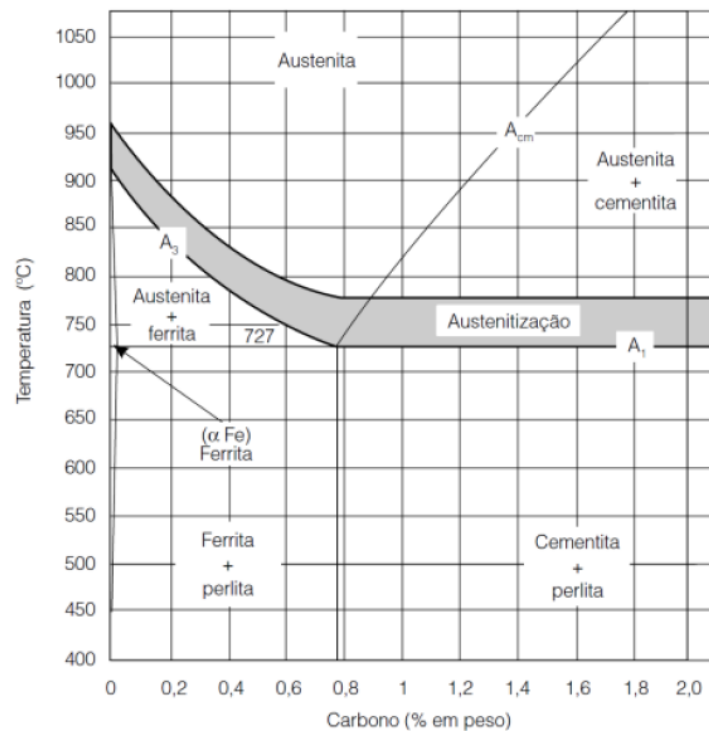
Segundo Silva e Mei (2010) o processo de têmpera consiste em elevar a temperatura do aço até a austenitização e em seguida resfriá-lo a uma velocidade suficientemente grande para evitar as transformações perlíticas e bainíticas, tendo como resultado estrutura martensítica, como visto no diagrama da Figura 1.

Figura 1: Ciclo de têmpera e revenimento



Fonte: Silva e Mei (2010)

Os autores chamam a atenção para o teor de carbono do aço a ser tratado pois quanto maior for a quantidade deste, menor será a temperatura para início de fim da formação da martensita, tendo ainda uma martensita mais dura. Usando o diagrama ferro carbono da Figura 2, e tendo em vista que o aço ABNT 1045 é hipoeutetóide, ou seja, é uma liga de aço com concentração de carbono entre 0,02 e 0,76% em peso, logo será aplicado uma temperatura de 830°C para esse processamento térmico, seguido de resfriamento em água.

Figura 2: Diagrama ferro carbono (Fe-Fe₃C)

Fonte: Silva e Mei (2010)

2.2.2 Revenimento

Segundo Silva e Mei (2010) o tratamento térmico de revenimento consiste em aquecer o material abaixo da temperatura de austenitização e mantê-lo a essa temperatura por um tempo suficiente para que a temperatura da peça esteja equalizada. Esse processo normalmente é feito logo após a tempera, seguindo o diagrama da Figura 1. De acordo com Chiaverini (2012) esse tratamento é feito com intuito de eliminar a maior parte dos problemas ligados a tempera, atuando no alívio das tensões internas, corrigindo o excesso de dureza e fragilização, o que melhora a ductilidade e a resistência ao choque do material. Silva e Mei (2010) recomenda temperaturas de revenimento variando desde 250°C até 700°C, essa variação de temperatura irá influenciar nas propriedades do material como visto na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades Mecânicas do aço ABNT 1045 revenido

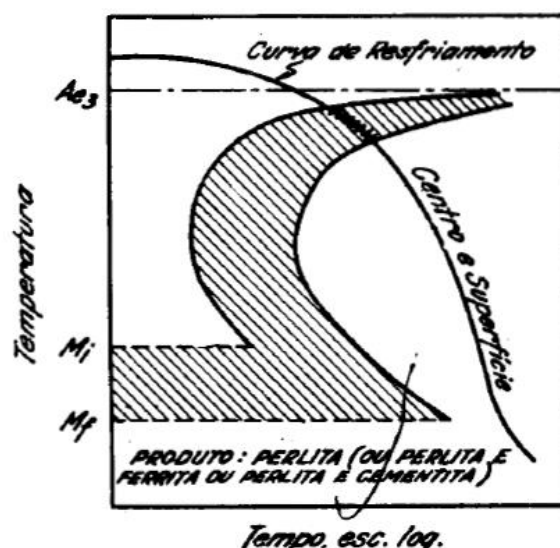
Temperatura de revenimento °C	Limite de resistência a tração (Mpa)	Alongamento em 50 mm (%)	Estricção (%)	Dureza Brinell (HB)
205	1132	09	33	363
260	1111	11	35	352
315	1070	09	39	341
370	1029	15	43	331
425	967	08	47	311
480	906	18	50	293
540	823	20	52	277
595	768	22	55	255
650	720	24	57	241

Fonte: Metals handbook (1991)

2.2.3 Recozimento

De acordo com Chiaverini (2012) o processo de recozimento consiste em aquecer o aço acima da zona crítica, ou temperatura de austenitização, e manter a essa temperatura o tempo necessário para garantir a dissolução do carbono, em seguida o aço deve ser resfriado lentamente com controle da velocidade de resfriamento ou deixando a peça tratada dentro do forno após este ser desligado, assim os dois irão resfriar juntos. Na Figura 3 observa-se a curva TTT para um aço eutetóide com formação de perlita grosseira. Esse tratamento térmico traz como resultado o alívio de tensões decorrente dos tratamentos térmicos, diminuição da dureza, dentre outros. Segundo Silva e Mei (2010) a faixa de temperatura aplicada ao recozimento do aço ABNT 1045 é de 790°C a 870°C.

Figura 3: Diagrama de transformação para recozimento

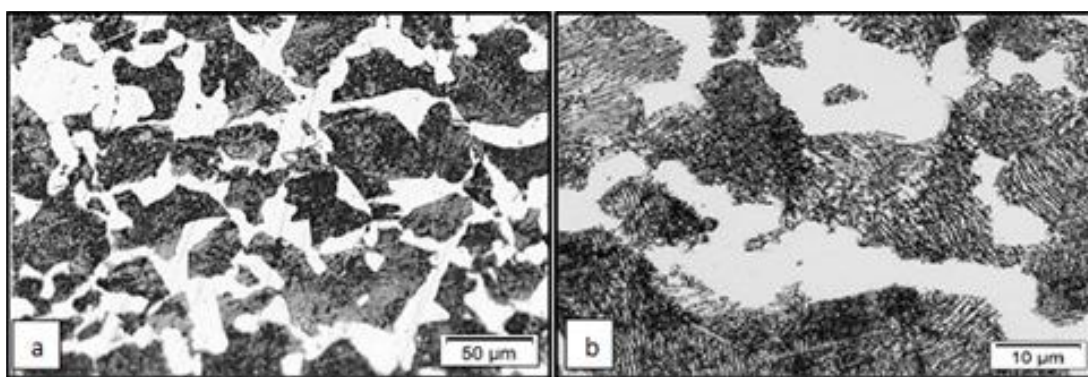


Fonte: Chiaverini (2012)

2.2.4 Microestrutura

No estudo dos materiais sabe-se que a relação entre microestrutura e propriedades mecânicas guarda correlação direta, sendo necessário em um estudo como o exposto neste trabalho, podendo chegar assim a resultados mais coesos. De acordo com Azevedo (2002) a microestrutura do aço ABNT 1045 é composta de perlita e ferrita, o que é corroborado por Ruiz e Negrín (2018) como pode ser observado na Figura 4.

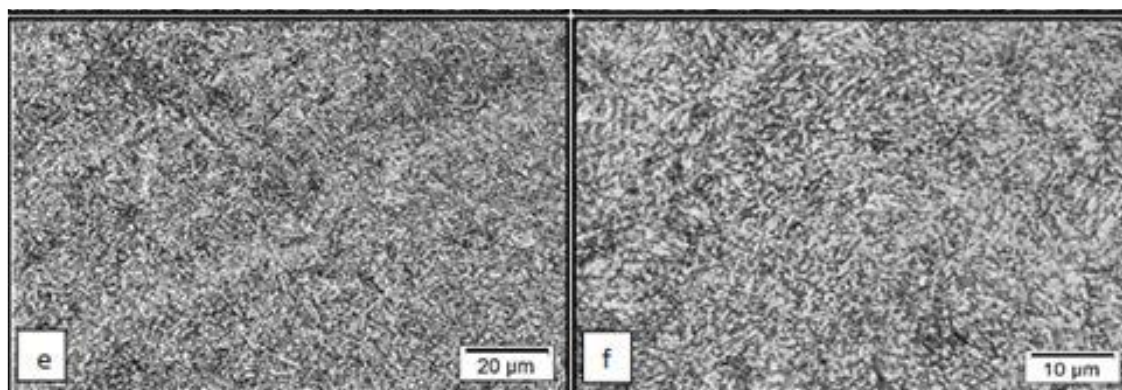
Figura 4: Microestrutura do aço 1045 em condição comercial. 50x e 100x



Fonte: Ruiz e Negrín (2018)

Com o processo de têmpera citado no item 2.2.1 deste trabalho, segundo Silva e Mei (2010) irá ocorrer formação da estrutura martensítica. Esta terá como principal característica uma dureza muito elevada, porém será muito quebradiça, o que não é desejável para componentes mecânicos, logo, para solucionar esse problema é aplicado o revenimento. Silva e Mei (2010) cita que a ferrita terá os mesmos contornos das antigas ripas martensíticas, já Askeland e Phulé (2008) nomeia essa microestrutura de martensita revenida, que pode ser observado na Figura 5. Tais estruturas garantem um bom equilíbrio entre resistência e dureza, garantindo uma boa tenacidade, chegando em parâmetros aplicáveis em projetos mecânicos.

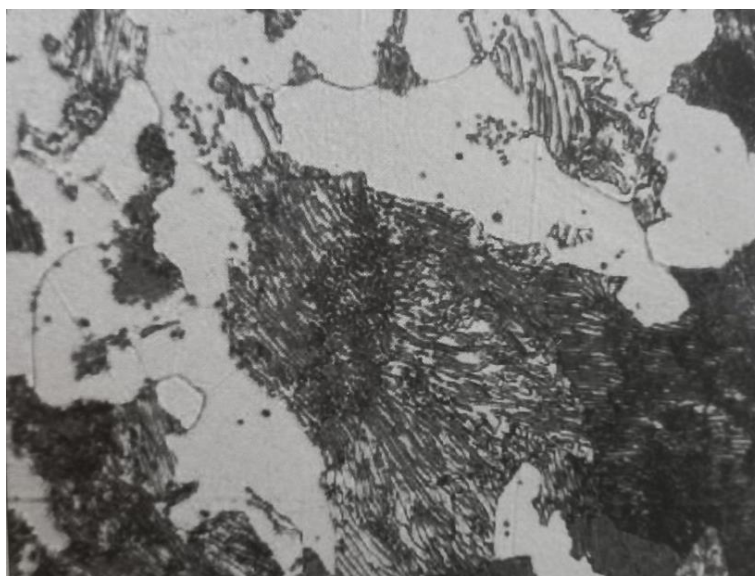
Figura 5: Martensita revenido do aço 1045, com 50x e 100x



Fonte: Ruiz e Negrín (2018)

Com relação ao recozimento, de acordo com Silva e Mei (2010) quanto mais alta a temperatura de austenitização maior o favorecimento da formação de estrutura perlítica enquanto que temperaturas menores irão favorecer a formação de estrutura esferoidizada. Segundo Askenland e Phulé (2008) essa microestrutura proporciona uma resistência mecânica relativamente baixa e boa ductilidade. Na Figura 6 pode ser vista a microestrutura para este tratamento para o aço 1045, na qual observa-se grão de ferrita (regiões claras) e perlita (regiões lamelar e escura).

Figura 6: Microestrutura do aço 1045 recozido



Fonte: Colpaert (2008)

2.3 Proteção catódica

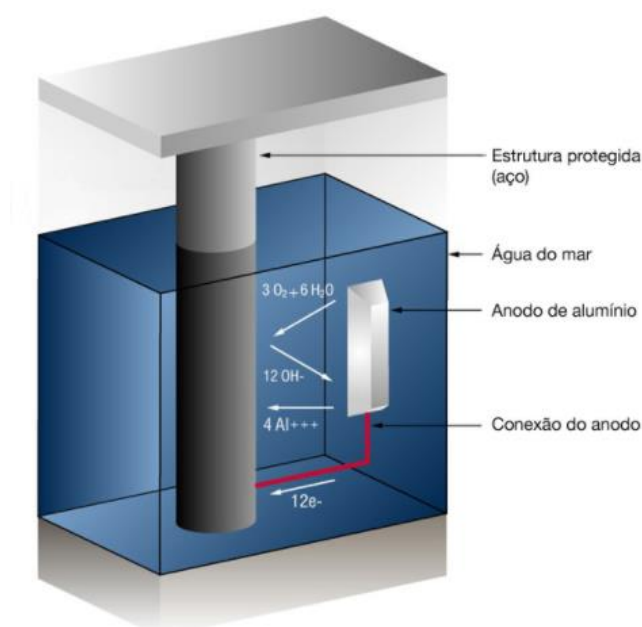
Diante da necessidade de se controlar e proteger uma estrutura metálica da corrosão que leva a sua deterioração de forma descontrolada, aplica-se uma pintura especial e até mesmo uma proteção catódica. Segundo Gentil (2017) a proteção catódica vem sendo aplicada para combater a corrosão das instalações metálicas enterradas, submersas e em contato com eletrólitos, o que de acordo com Gauto e Rosa (2013) é de suma importância por questões econômicas e ambientais.

De acordo com Cavalcante (2014) o processo de corrosão acontece devido a movimentação dos elétrons do ânodo para o cátodo, com esse fluxo irá ocorrer a diminuição de massa na região anódica e consequente ganho de massa da região catódica. Gentil (2017) destaca que proteger catodicamente uma estrutura é fazer por meios artificiais que ela toda obtenha comportamento catódico, dessa forma não existirá fluxo de elétrons do ânodo para o cátodo. Existem duas formas de se realizar a proteção catódica, sendo elas a proteção catódica

galvânica ou por ânodos galvânicos ou de sacrifício e proteção catódica por corrente impressa ou forçada.

Gentil (2017) menciona que na proteção catódica galvânica, o fluxo de elétrons se origina da diferença de potencial existente entre o metal a ser protegido e outro escolhido como ânodo, o qual tem potencial mais negativo. Todo esse processo ocorre de forma espontânea. O layout desse tipo de proteção pode ser observado na Figura 7.

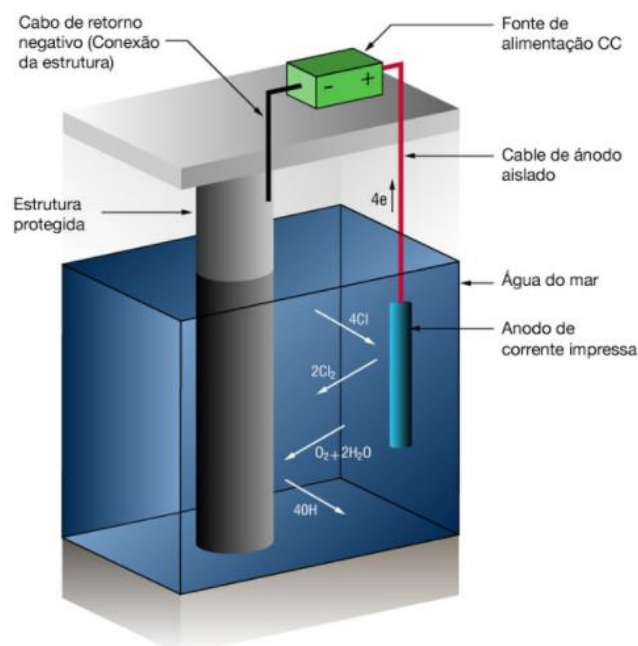
Figura 7: Proteção catódica galvânica



Fonte: Baxter e Britton (2011).

Com relação a proteção catódica por corrente impressa, a qual será aplicada neste trabalho, Gentil (2017) destaca que o fluxo de corrente fornecido vem da força eletromotriz (fem) de uma fonte geradora de corrente elétrica contínua, que fornece a corrente elétrica necessária à proteção da estrutura metálica. Nesse sistema, a dispersão da corrente elétrica no eletrólito é realizada através de ânodos especiais e inertes que serão forçados a doar seus elétrons para a estrutura a ser protegida, como visto na Figura 8. De acordo com Silva (2018) a proteção catódica por corrente impressa é amplamente aplicada em estruturas offshore para garantir um menor nível de degradação e uma maior vida útil a mesma, já que apenas os revestimentos sobre ela não seriam suficientes para garantir isso.

Figura 8: Proteção catódica por corrente impressa



Fonte: Baxter e Britton (2011).

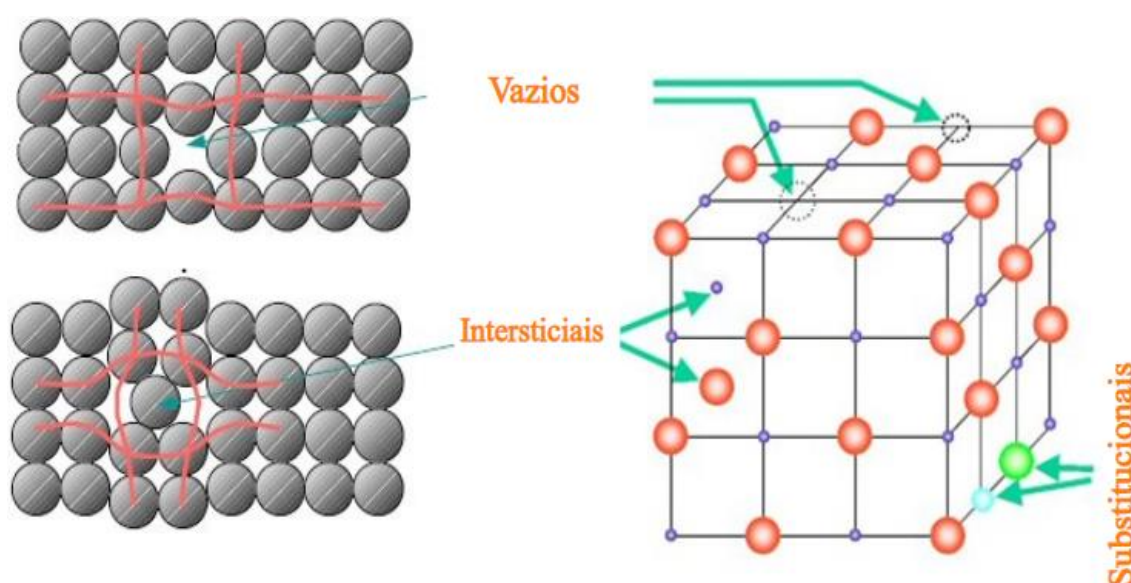
No entanto a proteção catódica pode influenciar diretamente no processo de fragilização por hidrogênio no metal. Gauto e Rosa (2013) chama atenção para o fato de que ao ser aplicada uma corrente muito elevada no sistema de proteção irá gerar a uma maior liberação de H_2 , levando ao aumento da fragilização da estrutura. Logo para se verificar a intensidade da corrente que está sendo aplicada no sistema de proteção é utilizado um eletrodo de referência, sendo aplicado neste trabalho o eletrodo de referência de calomelano (ERC). Segundo Cavalcante (2014) a fragilização acontece devido a geração e migração do hidrogênio em forma atômica, em regiões catódicas ou regiões protegidas contra corrosão. Logo após ser gerado, esse hidrogênio se aloja nos defeitos e interstícios do metal.

2.4 Hidrogenação

A fragilização por hidrogênio é uma forma de falha que é causada pela ação de hidrogênio em combinação com tensões residual ou aplicada, resultando na redução da capacidade de carga de um determinado componente (ARAÚJO, 2013). De acordo com Almeida (2014) esse hidrogênio é decorrente do processo de fabricação, ou das reações eletroquímicas a que o metal foi exposto, ou ainda o ambiente de uso. Segundo Silva (2018) é possível afirmar que a atuação do hidrogênio gera modificações nas propriedades mecânicas sendo responsável por fraturas frágeis e altamente perigosas.

Silva (2018) menciona ainda que quando existe a presença de hidrogênio atômico (H) na superfície do metal, pode ocorrer a difusão do mesmo para o interior do metal, e uma vez difundido pode se combinar e formar a molécula gasosa de hidrogênio (H_2), que ficará alojada preferencialmente em defeitos na rede cristalina, como vazios, discordâncias e contorno de grão. Ainda segundo a autora, a pressão interna causada pela saturação de moléculas de hidrogênio no metal pode causar o aparecimento de bolhas e microfissuras. Na Figura 9 pode ser observado uma representação de algumas falhas na rede cristalina que funcionam como sítios aprisionadores de hidrogênio.

Figura 9: Sítios aprisionadores de hidrogênio



Fonte: Slideplayer (2014)

Com relação à influência da microestrutura do material no aprisionamento de hidrogênio, estudos demonstraram que a austenita retida pode representar uma armadilha para o hidrogênio difusível (PARK, MAROEF E OLSON, 2002). Os autores observaram que a mobilidade do hidrogênio na austenita é muito baixa quando comparada com a ferrita. Chakraborty (2016) afirma que estruturas martensíticas estão mais sujeitas a fragilização por hidrogênio, logo materiais que passam por tratamento de têmpera estão mais favoráveis a este tipo de fragilização.

De acordo com Cavalcante (2014) existem alguns estudos relacionados ao efeito do hidrogênio decorrente da proteção catódica sobre o aço. Para Silva (2018) na proteção catódica o hidrogênio atômico decorre da reação eletroquímica no catodo (metal protegido) onde os íons

de hidrogênio hidratados (H_3O^+) diluídos na solução, após contato com o metal protegido, sofrem uma redução como exposto na equação 1.



A partir deste ponto, o processo de hidrogenação do aço envolve ou passa pelas seguintes etapas: Adsorção do hidrogênio atômico na superfície; Difusão do hidrogênio atômico no metal; Absorção do hidrogênio atômico na microestrutura do metal (ALMEIDA, 2014).

Quanto maior for o potencial de proteção catódica, mais intensa será a geração do hidrogênio atômico e, conseqüentemente, maior será sua concentração em torno da superfície exposta do aço ou material metálico (GONÇALVES *apud* METALS HANDBOOK, 2014).

Segundo Cavalcante (2014) qualquer processo que produza hidrogênio na sua forma atômica na superfície do metal, pode levar a adsorção dos átomos deste elemento e assim resultar em um processo de fragilização do material.

2.5 Ensaios

2.5.1 Ensaio de impacto Charpy

Segundo Nova (2018) são vários os métodos de se quantificar a tenacidade dos materiais, as avaliações podem ser feitas em condições dinâmicas ou quase estáticas, o autor ainda cita que os resultados podem ou não ser aplicados diretamente em estudos de integridade do material. Um dos principais métodos de se avaliar a tenacidade é o ensaio de impacto Charpy, o qual de acordo com Callister (2013) já era usado como método de verificar a característica da fratura do material antes mesmo dos estudos da mecânica da fratura serem considerados método científico

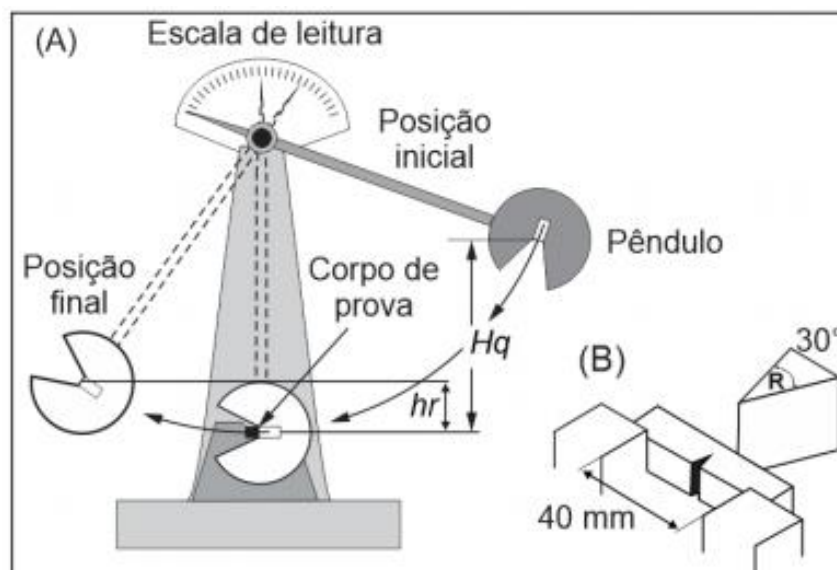
De acordo com Callister (2013) o ensaio de impacto foi projetado para medir a energia de impacto, que também pode ser chamada de tenacidade ao impacto. Ainda tem como uma das suas principais funções a capacidade de identificar um fenômeno que afeta diretamente a capacidade de absorção ao impacto, a transição dúctil-frágil do material.

Ainda de acordo com Callister (2013) tanto a tenacidade a fratura em deformação plana quanto os ensaios de impacto determinam as propriedades a fratura dos materiais. Porém com a diferença de o ensaio de impacto ter uma maior simplicidade, menor tempo de execução e um custo bem inferior. Nova (2018) cita que os resultados do ensaio de tenacidade ao impacto não

são totalmente equivalentes aos obtidos nos ensaios de tenacidade a fratura, porém com grande similaridade, inclusive no levantamento da temperatura de transição.

Na Figura 10 pode ser observado o layout do ensaio Charpy, no qual um corpo de prova é apoiado horizontalmente na base da máquina com seu entalhe centralizado, logo em seguida um pêndulo de aço endurecido em formato de martelo é liberado de uma altura H_q e colidirá com o corpo de prova na região do entalhe promovendo a ruptura deste. Após o choque o pêndulo continua o movimento atingindo a altura h_r . A diferença de altura H_q e h_r determina a absorção de energia de impacto. O ensaio de impacto Charpy mais utilizado é o tipo “V” devido a facilidade de fabricação do corpo de prova. O ensaio é completamente regido pela norma ASTM E23-18, sendo de suma importância o respeito a todos os parâmetros, como, a velocidade e massa do pêndulo, as dimensões do entalhe do corpo de prova, bem como todas as demais medidas. Segundo Garcia; Spin e Santos (2017) as informações que podem ser obtidas no ensaio de impacto são, a energia absorvida, contração lateral e a aparência da fratura. Com base nessas informações é possível definir se houve fratura frágil ou dúctil.

Figura 10: Layout do Ensaio de Impacto

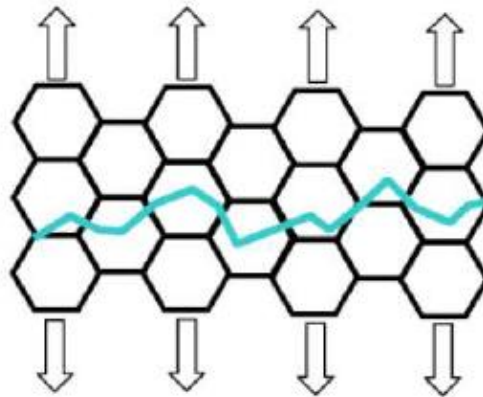


Fonte: GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012

De acordo com Garcia; Spin e Santos (2017) são possíveis dois modos de fratura: frágil e dúctil. A diferenciação entre eles está na possibilidade ou não do material se deformar na região de fratura. Quando a fratura ocorre de forma repentina, com rápida propagação e sem nem uma deformação visível, se dá o nome de fratura frágil. Ainda segundo Garcia, Spin e Santos (2017), está comumente associado a esse tipo de fratura a nucleação e propagação de

trincas por clivagem, envolvendo fratura transgranular ao longo de planos cristalográficos específicos, como visto na Figura 11. De acordo com Nova (2018) esse mecanismo de fratura resulta em uma superfície facetada, reluzente e relativamente lisa.

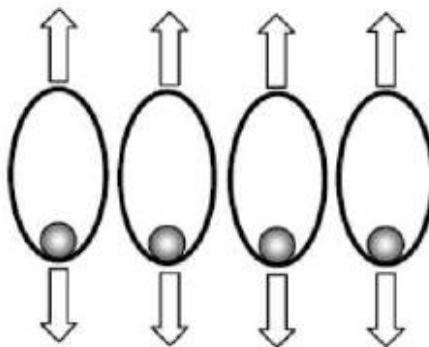
Figura 11: Trinca por clivagem



Fonte: Adaptado de Nova 2018

A fratura dúctil acontece de forma contrária a fratura frágil, nela pode ser observada deformação plástica antes do aparecimento de trincas, ocorre importante absorção de energia e dissipação antes da ruptura do material (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2017). O mecanismo envolvido na fratura dúctil é normalmente a nucleação e coalescimento de microvazios, com diminuição gradual da seção resistente efetiva. Estes vazios podem ser facilmente identificados na superfície de fratura através da microscopia e são usualmente chamados de *Dimples* (NOVA, 2018), estes podem ser visualizados na Figura 12. Garcia; Spin e Santos (2017) mencionam que esse tipo de fratura apresenta aspecto fibroso.

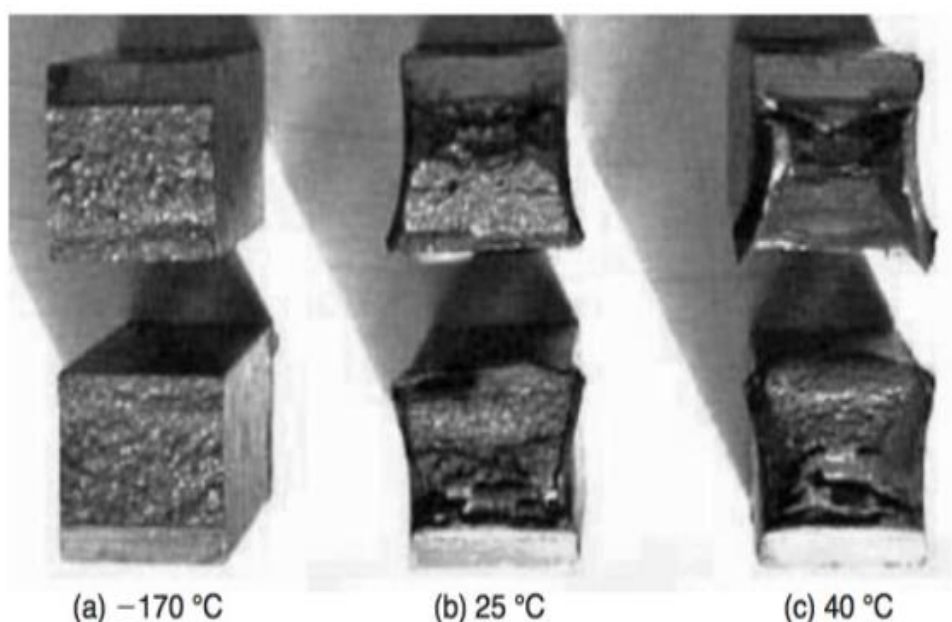
Figura 12: Trinca por Dimples



Fonte: Apartado de Nova 2013

Na Figura 13 de Garcia; Spin e Santos (2017), observar-se as superfícies de fratura dos corpos de prova de ensaios de impacto realizado com o aço ABNT/SAE 1020 submetido a temperaturas de $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$, $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, na qual percebe-se que no corpo de prova a $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ocorre fratura frágil, devido a não alteração das faces da seção transversal da fratura, diferentemente dos corpos ensaiados a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, que apresentam contração e expansão da seção transversal, que caracterizam a fratura dúctil.

Figura 13: Superfície de fratura de ensaio de Impacto aço ABNT/SAE 1020



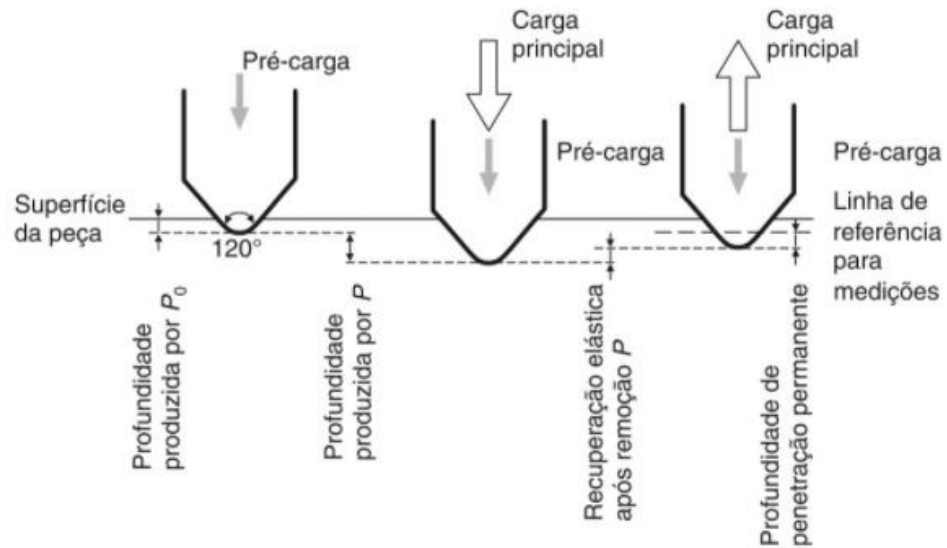
Referência: GARCIA; SPIM; SANTOS, 2017

2.5.2 Ensaio de dureza

A dureza é uma propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2017). Estes autores destacam a dureza tem uma ligação muito forte com o limite de escoamento do material.

O ensaio de dureza Rockwell é o mais usual no mundo, isso devido a facilidade de realização deste ensaio, o curto tempo de execução, a pequena marcação de impressão deixada e ainda evitar falhas humanas (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2017). O ensaio Rockwell mede a dureza com relação a profundidade de penetração de um indentador de diamante esferocônico, ou uma esfera de aço endurecido ou carboneto de tungstênio, com aplicação de uma pré-carga seguida da carga efetiva, esta última sendo responsável pela resposta do ensaio. Na Figura 14 observa-se os estágios de realização do ensaio de dureza Rockwell.

Figura 14: Ensaio de dureza Rockwell



Referência: GARCIA; SPIM; SANTOS, 2017

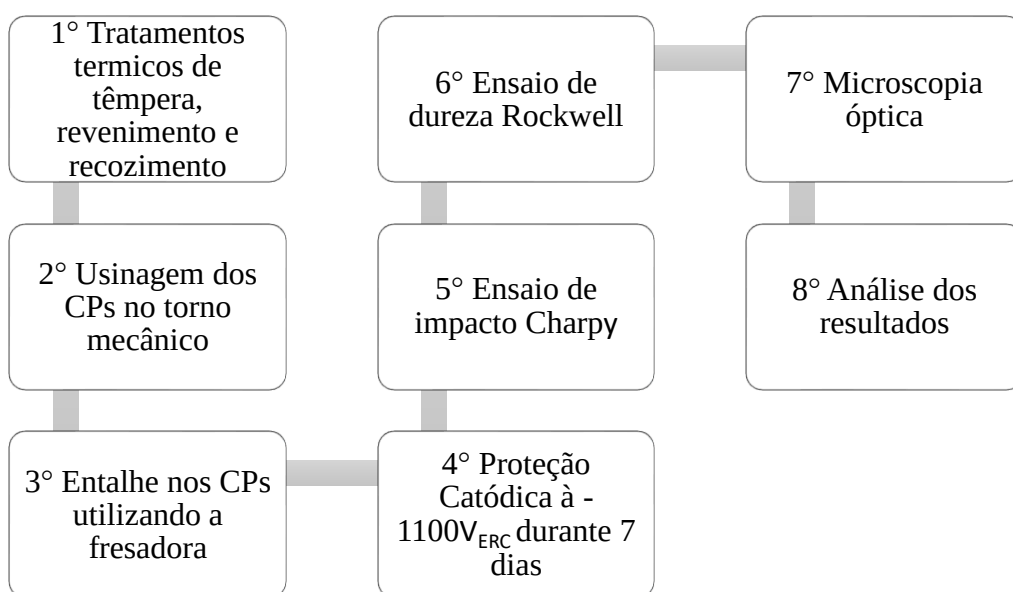
Ainda de acordo com Garcia, Spin e Santos (2017) a pré-carga é de extrema importância no ensaio para que sejam evitados erros devido a recuperação elástica, assim como evitar a influência devido a defeitos na superfície do material e ainda promover melhor fixação da peça a ser ensaiada. O ensaio será regido pela norma internacional mais usada no Brasil é a ASTM E18:2007.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste tópico será abordado a metodologia e materiais utilizados para o desenvolvimento e concepção deste trabalho de conclusão de curso. Para se avaliar qual a influência da hidrogenação na tenacidade ao impacto no aço ABNT 1045 foi realizado levantamento bibliográfico para se ter o embasamento teórico, e estudo de caso, juntamente com análise qualitativa para validação dos resultados.

Os corpos de prova foram fabricados usando a estrutura do laboratório de soldagem e usinagem UFERSA-Caraúbas. Os ensaios foram realizados nos laboratórios de ensaios mecânicos e metrologia UFERSA-Caraúbas e de ensaios mecânicos UFERSA-Mossoró. No fluxograma exposto na Figura 15 pode ser observado a cronologia de todo o processo.

Figura 15: Cronologia do trabalho



3.1 Descrição sobre o material utilizado

Foi utilizado tarugo de aço ABNT 1045 com 22 mm de diâmetro e 2000 mm de comprimento. Cujas composição química está presente na Tabela 4, e as propriedades mecânicas na Tabela 5.

Tabela 4: Composição química do Aço ABNT 1045

Carbono (C)	Manganês (Mn)	Fosforo (P)	Enxofre (S)
0,43% - 0,50%	0,60% - 0,90%	0,040%	0,050%

Fonte: NBR NM 87-2000

Tabela 5: Propriedades mecânicas do aço ABNT 1045 com fornecido

Limite de escoamento	Dureza	Modulo de elasticidade	Redução
450 MPa	84 HRB	190GPa – 210GPa	40%

Fonte: Luiz (2017)

3.2 Tratamento

Os tratamentos térmicos de têmpera, revenido e recozimento foram realizados no laboratório de soldagem e usinagem da UFERSA campus Caraúbas por meio de um forno do tipo mufla Lucadema modelo Luca-2000G/DI.

No tratamento térmico de têmpera empregou-se temperatura de 820°C durante 01h30min, seguido de resfriamento em água. O aquecimento do forno aconteceu a uma taxa de aproximadamente $10 \pm 5^\circ\text{C}/\text{min}$.

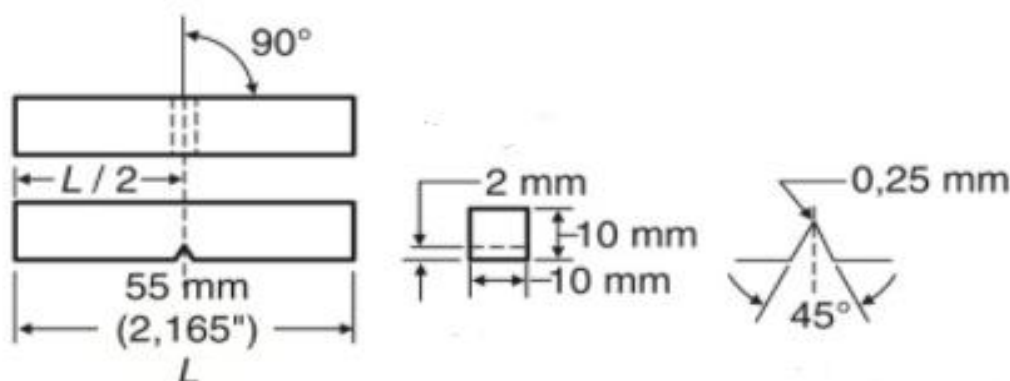
Após o resfriamento do forno mufla foi realizado o tratamento térmico de revenido, no material anteriormente temperado, a temperatura utilizada pra este processamento foi de 600°C com tempo de permanência de 2h, seguido de resfriamento ao ar calmo. A taxa de aquecimento do forno foi de aproximadamente $10 \pm 5^\circ\text{C}/\text{min}$.

Parte do material no estado como fornecido passou pelo processamento térmico de recozimento, que teve temperatura de austenitização de 820°C pelo tempo de 1h30min, seguido de resfriamento lento dentro do forno mufla. O gradiente de aquecimento foi de aproximadamente $10 \pm 5^\circ\text{C}/\text{min}$.

3.3 Confeção dos corpos de prova

Após realização dos tratamentos térmicos passou-se para a etapa de produção dos corpos de prova, se optou pela usinagem após os tratamentos térmicos para que não tivesse influencia da escoria gerada pelos processamentos térmicos no processo de proteção catódica e absorção do hidrogênio pelo aço. Utilizando o torno mecânico Manrod modelo MR-302 do laboratório de usinagem e soldagem da UFERSA-Caraúbas foi realizada parte da usinagem dos corpos de prova, com a finalidade de obter barra de seção transversal quadrada e comprimento nas dimensões vistas na Figura 16.

Figura 16: Dimensões do Corpo de prova de Charpy



Fonte: Adaptado de GARCIA; SPIM; SANTOS, 2012

No laboratório de usinagem e soldagem da UFERSA-Caraúbas com a utilização de uma fresadora Eurostec modelo FTV-H6 fez-se os entalhes em V dos corpos de prova. Estes ficaram com angulação de 45°, sendo o entalhe localizado no centro do CP e com profundidade de 2mm, conforme norma ASTM E23-18 e Figura 16.

A partir do tarugo de aço 1045 confeccionou-se 18 corpos de prova de impacto Charpy que ficaram assim distribuídos:

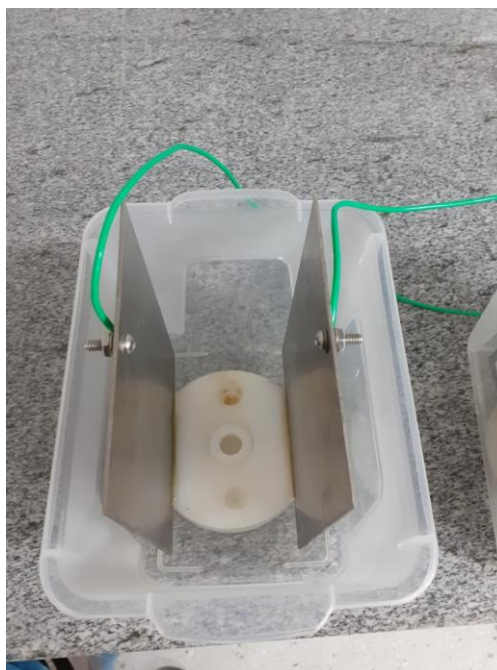
- 6 como fenecido (CF);
- 6 temperados e revenido (TR);
- 6 recozidos (RC).

Sendo que, para cada condição, CF, TR e RC, 3 corpos de prova foram ensaiados sem a realização do processo de proteção catódica, enquanto 3 corpos de prova restantes foram submetidos a este processo.

3.4 Proteção catódica

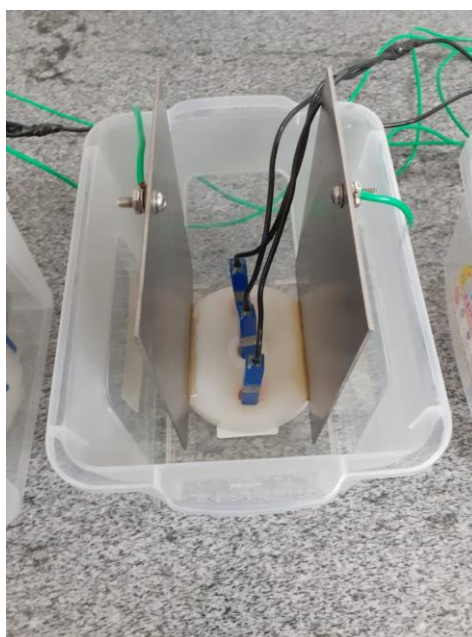
Para realização da proteção catódica que, conforme visto anteriormente, pode favorecer a hidrogenação, utilizou-se o aparato visto na Figura 17. Este é composto de duas placas de titânio (ânodo inerte) com dimensões de aproximadamente 160mm x 130mm x 2mm, sendo conectado a fonte de alimentação elétrica por meio de fios e parafusos. As placas recebem potencial positivo vindo da fonte de tensão, já o polo negativo foi fixado no corpo de prova. Com a intenção de manter as placas de titânio paralelas, elas foram fixadas com o auxílio de um cilindro de nylon. Este cilindro tem três furos para apoio e alinhamento dos corpos de prova. Na Figura 18, observa-se os corpos de prova posicionados no aparato de proteção catódica.

Figura 17: Aparato de suporte dos corpos de prova e eletrodos



Fonte: Autoria própria (2021)

Figura 18: Aparato com corpos de prova

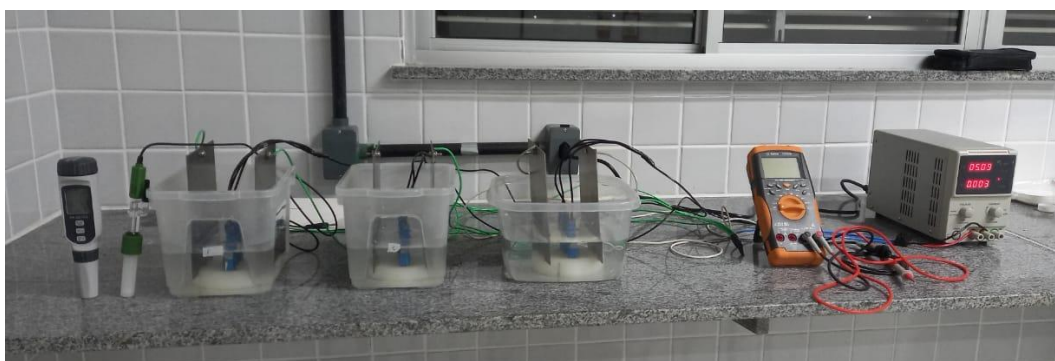


Fonte: Autoria própria (2021)

A proteção catódica por corrente impressa ocorreu a temperatura ambiente com potencial de proteção de $-1100 \text{ mV}_{\text{ERC}}$, o eletrodo de referência utilizado foi o de calomelano. Como eletrólito empregou-se solução aquosa de NaCl com concentração de 3,5% e pH 8,2,

com relação ao tempo de hidrogenação, empregou-se processo contínuo com 168h ou 7 dias. O pH e o potencial de proteção foi monitorado e ajustados durante todos os dias do experimento, no período da manhã e também a noite, para que os valores especificados acima não variassem tanto. Todo o aparato e componentes usados no processo podem ser observados na Figura 19.

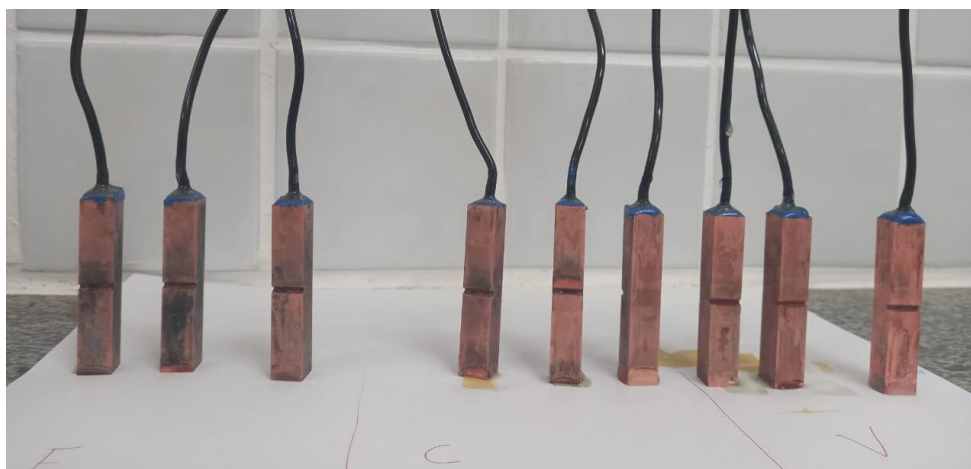
Figura 19: Sistema usado no processo de proteção catódica.



Fonte: Autoria própria (2021)

A fim de evitar a liberação do hidrogênio nos copos de prova após o processo de hidrogenação, eles foram imersos em solução de CuSO_4 . Na Figura 20 pode ser observado os corpos de prova após hidrogenação e com camada de cobre passivada.

Figura 20: Corpos de prova após imersão em solução de CuSO_4



Fonte: Autoria própria (2021)

3.5 Ensaios

3.5.1 Impacto Charpy

Para realização deste ensaio foi utilizada a máquina do Laboratório de Ensaios do curso de Engenharia Mecânica da UFERSA campus Mossoró, sendo esta da marca Time e modelo JB-W300A que pode ser vista na Figura 21, que fornece o resultado do ensaio diretamente na

escala da máquina, de forma analógica. Os ensaios foram realizados de acordo com as informações presentes no tópico 2.6.1 deste trabalho. Sendo feito a temperatura ambiente, para as condições com e sem hidrogenação. Utilizando um martelo pendular de 300J

Figura 21: Máquina de ensaio de impacto Charpey JB-W300A



Fonte: Time Group Inc. (2019)

3.5.3 Dureza Rockwell:

O ensaio de dureza foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos e metalografia da UFERSA campus Caraúbas com um Durômetro Mitutoyo HR – 320MS, visto da Figura 22. Todo o ensaio foi transcorrido de acordo com a norma ASTM E18:2007 (ASTM).

Figura 22: Durômetro Mitutoyo HR – 320MS



Fonte: Mitutoyo (2021)

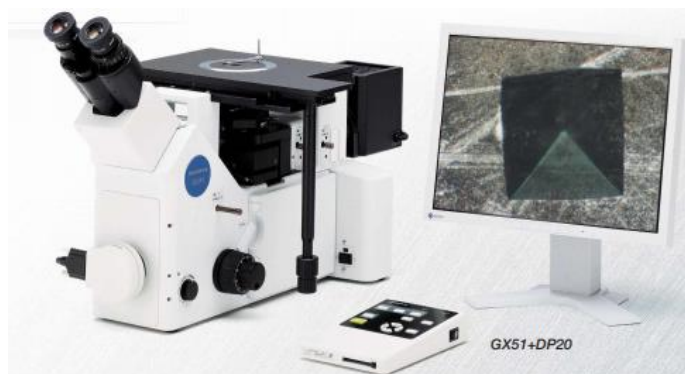
O indentador escolhido para o ensaio foi a esfera de carbeto de tungstênio com 1,59mm de diâmetro, empregou-se carga de 100 kgf ou 981 N, tais parâmetros correspondem a escala

HRB. Foram realizadas três indentações em um dos corpos de prova para cada situação de processamento térmico, resultando em 18 marcações.

3.5.4 Microscopia óptica

A análise da microscopia óptica foi feita no laboratório de ensaios mecânicos da UFERSA – Campus Mossoró, utilizando o microscópio Olympus GX51, como visto na Figura 23, no processamento das imagens empregou-se o software analySIS getIT. A preparação das amostras para microscopia ocorreu no laboratório de ensaios mecânicos e metalografia da UFERSA -Campus Caraúbas, para tal foi feito o embutimento das amostras em resina, seguido dos processos de lixamento, com lixas de SiC com granulação variando de 80 a 1200, e polimento, este último foi realizado com pasta de diamante de 3 e 1/4 μ . Após o polimento as amostras passaram por ataque químico por imersão em Nital 2%, para ser revelada sua microestrutura.

Figura 23: Microscópio Olympus GX51



Fonte: <https://www.olympus-ims.com/pt/>

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção tem-se a apresentação, a análise e a discussão dos resultados obtidos nos experimentos realizados para o aço 1045 com três condições diferentes, que são, como fornecido, recozido e temperado e revenido.

4.1 Processo de proteção catódica.

Os corpos de prova de impacto foram submetidos a proteção catódica contínua por 7 dias, e, durante esse período fez-se levantamentos e ajustes dos valores de pH e tensão, duas vezes ao dia. Na tabela 1 do apêndice deste trabalho podem ser observados os resultados desses levantamentos, antes e após o ajuste de tais parâmetros. na qual CF representa os corpos de prova com o aço como fornecido, RE são os recozidos e TR os temperados e revenidos. Com base nesses dados pode ser percebido que, em praticamente todas as medições, o pH e a tensão atingiram valores próximos ao desejado, 8,2 e -1100 mVerc, respectivamente. Outro fato importante observado ao fim dos 7 dias foi a eficiência do sistema de proteção, na qual constatou-se que não houve oxidação de nenhum dos corpos de prova.

4.2 Ensaio de impacto Charpy

Na Tabela 6 tem-se os resultados dos ensaios de impacto para os corpos de prova (CPs) sem e com hidrogenação do aço 1045 na condição como fornecido. Através dos valores da tabela, observa-se que o aço 1045 nas duas condições ensaiadas apresentou baixa tenacidade ao impacto, com valores médios de 12J e 13J, respectivamente, para as condições sem e com hidrogenação. A proximidade entre os valores médios de tenacidade ao impacto, sugere que o hidrogênio não induziu fragilização ao aço no estado com fornecido.

Tabela 6: Tenacidade ao impacto do aço 1045 como fornecidos (CF)

Com hidrogenação		Sem hidrogenação	
Corpo de prova	Energia (J)	Corpo de prova	Energia (J)
1	13	1	10
2	11	2	12
3	15	3	12
Média	13	Média	12
Desvio Padrão	2	Desvio Padrão	1,2

Fonte: Autoria própria (2021)

Os resultados de tenacidade ao impacto do aço 1045 recozido são apresentados na Tabela 7, e, similar ao aço como fornecido este também foi analisado sem e com hidrogenação. Os resultados médios de tenacidade ao impacto do aço, sem hidrogenação, como fornecido e recozido são, respectivamente, 12J e 20J, demonstrando que o recozimento conferiu tenacidade ao aço 1045 em torno de 40%. Este resultado juntamente com os valores de dureza, item 4.5, corroboram com o fato de o tratamento térmico de recozimento melhorar a ductilidade dos materiais, como decorrência do aumento do grão.

Tabela 7: Tenacidade ao impacto do aço 1045 recozido (RE)

Com hidrogenação		Sem hidrogenação	
Corpo de prova	Energia (J)	Corpo de prova	Energia (J)
1	30	1	22
2	26	2	20
3	28	3	20
Média	28	Média	20
Desvio Padrão	2	Desvio Padrão	1,2

Fonte: Autoria própria (2021)

Considerando os resultados médios de tenacidade do aço 1045, recozido, sem e com hidrogenação tem-se os valores de 20J e 28J, respectivamente. Assim, de forma similar ao material como fornecido, com o recozimento o material também não se mostrou sensível ao hidrogênio.

Por fim, analisando os valores médios de tenacidade ao impacto do aço 1045 temperado e revenido, Tabela 8, observa-se valores superiores quando comparado as duas condições anteriormente consideradas. Para as condições sem e com hidrogenação os valores médios foram, respectivamente, 46J e 62J. Comparando-se os resultados, sem hidrogenação, para o aço recozido com o aço temperado e revenido, tem-se um aumento na tenacidade ao impacto de 47%. Esse resultado, juntamente com a análise microestrutural do item 4.4, demonstra que a dispersão de carbonetos na martensita revenida favoreceu o aumento de tenacidade do aço 1045.

Tabela 8: Tenacidade ao impacto do aço 1045 temperado e revenido (TR)

Com hidrogenação		Sem hidrogenação	
Corpo de prova	Energia (J)	Corpo de prova	Energia (J)
1	62	1	46
2	62	2	42
3	63	3	58
Média	62	Média	46
Desvio Padrão	0,6	Desvio Padrão	8,3

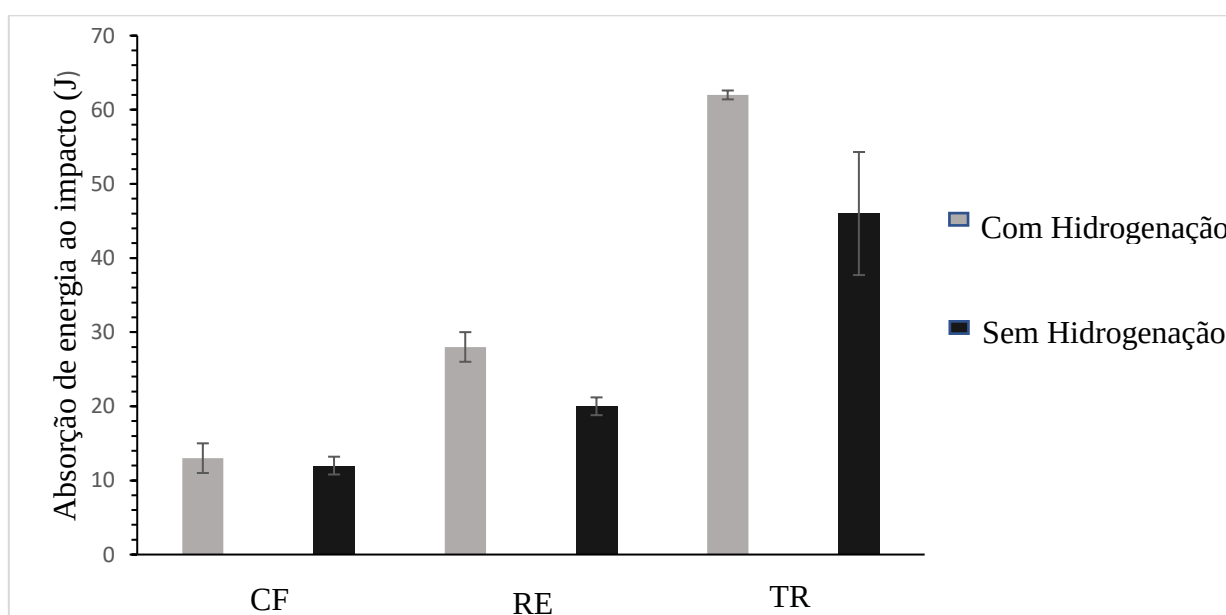
Fonte: Autoria própria (2021)

Quanto ao processo de fragilização induzida pelo hidrogênio, na condição temperado e revenido o aço 1045 não se mostrou sensível, já que os resultados médios de tenacidade ao impacto foram maiores para o material com hidrogenação.

Considerando os resultados de desvio padrão de todas as condições ensaiadas, observa-se que o aço sem hidrogenação apresentou valor bem superior as demais, esse resultado possivelmente esteja associado a qualidade do entalhe dos corpos de prova, que se apresentou de inferior nos corpos de prova sem hidrogenação.

No gráfico da Figura 24 observa-se os resultados médios de tenacidade ao impacto com seus respectivos desvios-padrão. Nesse verifica-se que, nas três condições analisadas, a tenacidade ao impacto apresentou valores médios para o material com hidrogenação. Esse comportamento pode estar relacionado a pequena variação na qualidade dos corpos de prova, já que aqueles com melhor acabamento foram submetidos a hidrogenação. No entanto é importante destacar que de acordo com Nova *apud* Wang (2018) a susceptibilidade a fragilização por hidrogênio de um aço depende de sua inerente tenacidade, quanto mais tenaz maior será o teor crítico de H necessário para a ocorrência de trinca a frio.

Figura 24: Resultados do ensaio de impacto.



Fonte: Autoria própria (2021)

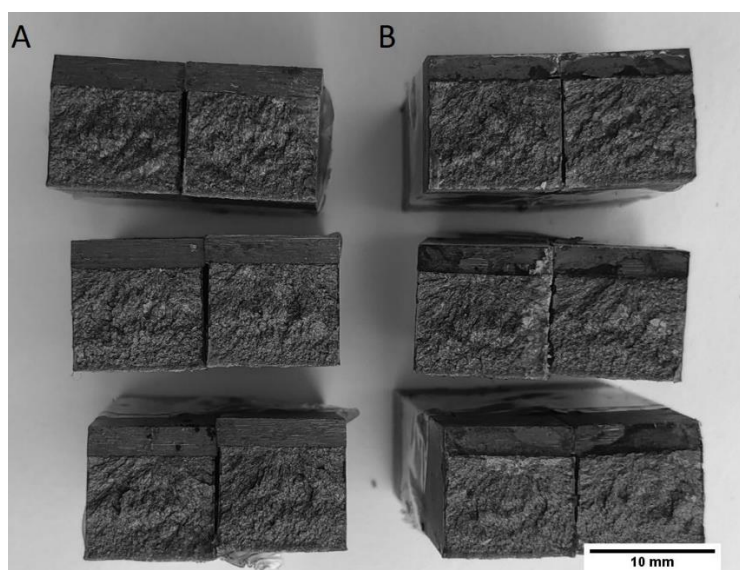
Vale salientar que, quando comparado ao ensaio de tenacidade a fratura, o ensaio de impacto tem a vantagem de ter um melhor custo benefício, devido a maior facilidade e rapidez de execução, no entanto sua sensibilidade no levantamento da fragilização por hidrogênio é menor, pois o ensaio de mecânica da fratura é quase estático, enquanto que o ensaio de impacto

é dinâmico. Dessa forma não se pode afirmar que o hidrogênio não tenha induzido qualquer fragilização ao aço 1045.

4.3 Superfície de fratura

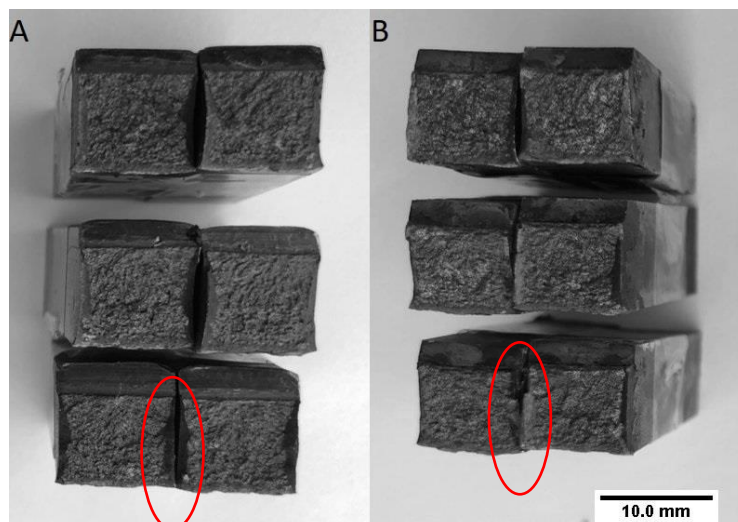
Neste tópico serão abordadas as características das superfícies de fratura dos corpos de prova de impacto para averiguação do mecanismo de fratura presente no aço como fornecido (Figura 25), recozido (Figura 26) e temperado e revenido (Figura 27). Nas Figuras 25(a) e (b) pode ser observada a fratura do aço 1045 sem e com hidrogenação, cujas faces da seção transversal não apresentam distorções, sendo condizente com o mecanismo de fratura frágil; conforme Garcia, Spin e Santos (2017). Esse comportamento já era esperado devido ao baixo valor de tenacidade ao impacto do material na condição como fornecido. O mecanismo de fratura frágil também foi predominante para os CPs recozidos Figuras 26 (a) e (b), sendo observada uma leve distorção nas laterais dos CPs, sendo as maiores destacadas pelos círculos vermelhos.

Figura 25: Superfície de fratura CPs como fornecido. A) sem hidrogenação, B) Com hidrogenação



Fonte: Autoria própria (2021)

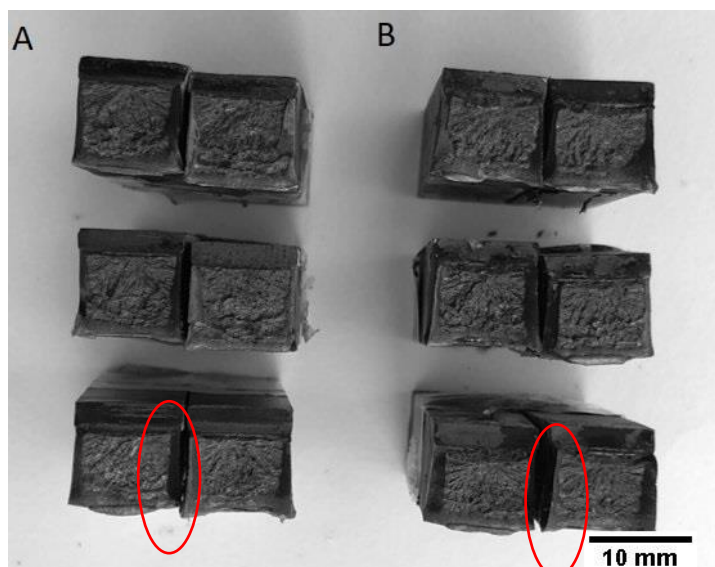
Figura 26: Superfície de fratura Corpo do aço Recozido. A) sem hidrogenação, B) Com hidrogenação



Fonte: Autoria própria (2021)

Para as três condições analisadas, os CPs temperados e revenidos (Figura 27) apresentaram mecanismos de fratura com características dúcteis. Pois de acordo com Garcia; Spin e Santos (2017) a superfície de fratura dúctil, apresenta contração e expansão da seção transversal, então no destaque vermelho da Figura 28 observa-se essas características, sendo a presença dessas contrações e expansões mais pronunciadas quando comparamos com as superfícies de fratura das Figuras 25 e 26. Por fim, esse resultado corrobora com o aumento de ductilidade mencionado anteriormente.

Figura 27: Superfície de fratura CPs do aço temperado e revenido. A) sem hidrogenação, B) Com hidrogenação

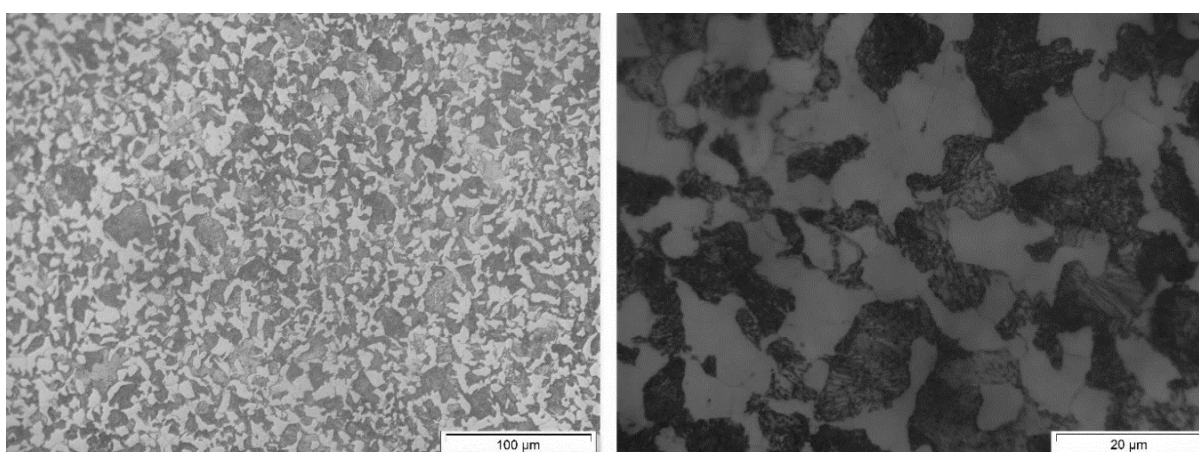


Fonte: Autoria própria (2021)

4.4 Microestrutura

Neste tópico tem-se a análise microestrutural para cada uma das condições de tratamento térmico executada neste trabalho, pois se sabe da forte ligação entre microestrutura e propriedades mecânicas. Após realização de análise e comparação das microestruturas com as do tópico 2.2.4 deste trabalho, pode ser afirmado que os tratamentos térmicos obtiveram êxito. Onde na Figura 28 que representa o aço 1045 como fornecido pode-se observar a presença de perlita em cor mais escura e ferrita em cor mais clara com contornos bem definidos.

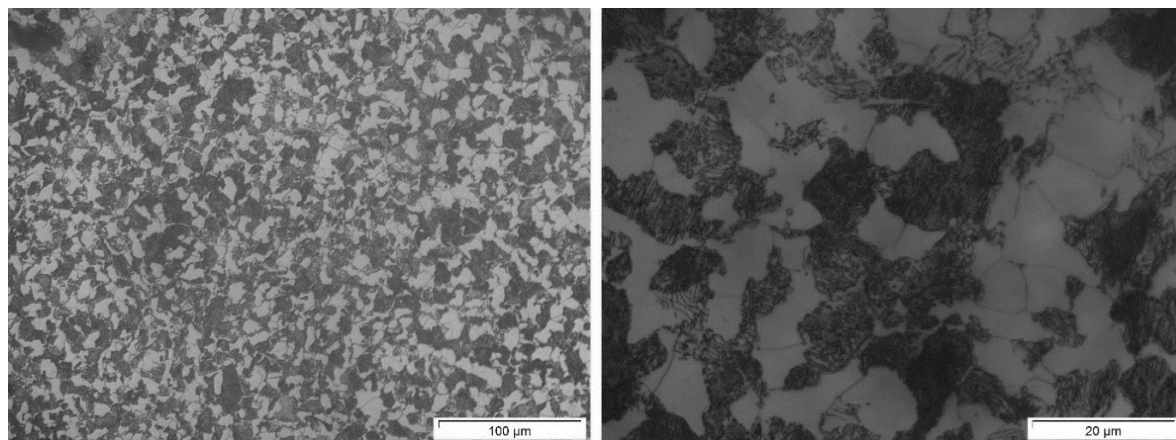
Figura 28: Microestrutura do corpo de prova como fornecido (CF). Ataque Nital 2%.



Fonte: Autoria própria (2021)

Na Figura 29 pode ser observado a microestrutura do aço 1045 recozido, sendo possível perceber também a presença de ferrita e perlita, com forma e distribuição bem similar a do material como fornecido (Figura 28), e, quando se analisa as propriedades mecânicas levantadas para estas duas condições, tem-se resultados também similares o que sugere que o material como fornecido também passou por processo de recozimento. Vale destacar que nas duas condições os resultados estão condizentes com a literatura e, segundo Askeland e Phulé (2008) o recozimento promove melhorias na ductilidade do material.

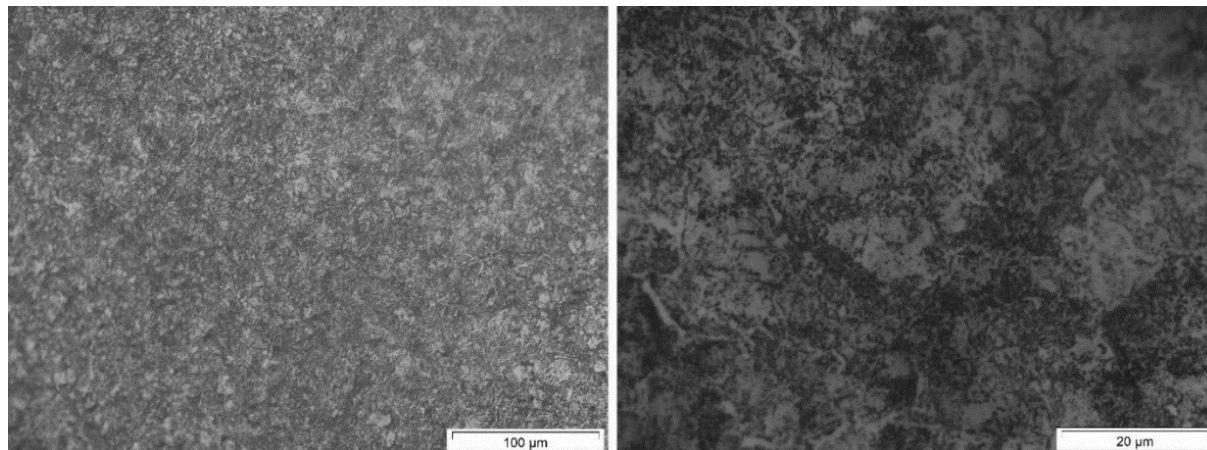
Figura 29: Microestrutura do corpo de prova recozido (RE). Ataque Nital 2%.



Fonte: Autoria própria (2021)

Para o aço na condição temperado e revenido, Figura 30, observa-se que toda a ferrita e perlita existente no aço foi transformada em martensita revenida, se apresentando na forma de finas agulhas, o que segundo Gallo *apud* Nicoletti (2006) é uma característica de aços com teor de carbono acima de 0,25%.

Figura 30: Microestrutura do corpo de prova temperado e revenido (RV). Ataque Nital 2%.



Fonte: Autoria própria (2021)

Por fim pode ser observado que os resultados expostos para as microestruturas corroboram com os ensaios de impacto, o qual tem valores de tenacidade consideravelmente diferentes para cada situação, como pode ser observado no tópico 4.2 deste trabalho.

4.5 Ensaio de dureza Rockwell

Nas Tabelas 9 e 10, respectivamente, podem ser observados os resultados da dureza Rockwell, na escala B, para os corpos de prova com e sem hidrogenação. Quando comparamos os resultados das Tabelas 9 e 10, verifica-se que o processo de proteção catódica não gerou nenhuma influência na dureza do aço como fornecido, recozido e temperado e revenido. Este resultado já era esperado pois na literatura não há registro do processo de fragilização por hidrogênio promover alteração nas propriedades de dureza.

Tabela 9: Ensaio de dureza para os corpos de prova com hidrogenação.

	Com hidrogenação		
Indentação	CF (HRB)	RE (HRB)	TR (HRB)
1	96,4	80,8	97,4
2	96,6	82,9	96,5
3	96,5	82	97
Média	96,5	82	97
Desvio padrão	0,1	1,1	0,5

Fonte: Autoria própria (2021)

Tabela 10: Ensaio de dureza para os corpos de prova com hidrogenação.

	Sem hidrogenação		
Indentação	CF (HRB)	RE (HRB)	TR (HRB)
1	96,4	82	96
2	96	82,2	94,1
3	96,6	82,3	94,8
Média	96,4	82,17	94,9
Desvio padrão	0,3	0,9	0,1

Fonte: Autoria própria (2021)

Com relação aos resultados de dureza apresentados na Tabela 10 para as condições como fornecido e temperado e revenido, observa-se valores próximos a 96HRB e maiores que do material no estado recozido, cuja dureza média foi de, aproximadamente, 82HRB. Estes resultados já eram esperados, pois a microestrutura recozida (perlítica e ferrítica) caracteriza-se por dureza inferior a da microestrutura martensítica revenida. Quando correlacionamos esses resultados com os de tenacidade ao impacto verifica-se que o material temperado e revenido manteve a propriedade dureza e ganhou em propriedade de tenacidade. Por fim com o ensaio de dureza pode ser

5 CONCLUSÃO

O intuito deste trabalho foi verificar a influência da proteção catódica e consequente hidrogenação, na tenacidade ao impacto do aço 1045. Tal análise foi feita através do comportamento das propriedades mecânicas do aço. Logo com os resultados já expostos é possível afirmar que:

- O sistema e parâmetros de proteção catódica empregados se mostraram eficientes, evitando que os corpos de provas, nas três condições analisadas, não sofressem oxidação.
- Através da microestrutura, do ensaio de dureza, e da tenacidade dos corpos de prova pode ser observado que os tratamentos térmicos foram bem-sucedidos, principalmente os tratamentos térmicos de têmpera e revenido, já que nestas condições observou-se aumento significativo em torno de 40% quando comparado ao material recozido.
- A energia absorvida nos corpos de prova com hidrogenação de modo geral foi maior que a dos corpos sem hidrogenação. Com isso é possível chegar à conclusão que o hidrogênio não atuou significativamente na fragilização do material para o período de proteção empregado.
- O modo de fratura observado no ensaio Charpy apresentou para as condições como fornecido e recozido, características predominantemente frágeis, enquanto nos CPs temperado e revenido foi observado características de ductilidade. Assim como a energia absorvida os mecanismos de fratura, se mantiveram similares para o aço 1045 com fornecido, temperado e revenido e recozido, nas condições sem e com hidrogenação.

Em síntese pode-se afirmar que, para os parâmetros de proteção catódica aplicados neste trabalho e ensaios mecânicos realizados, o sistema de proteção se mostrou eficiente, evitando a oxidação sem gerar influências negativas na fragilização do aço 1045, independentemente do processamento térmico deste material.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Utilização de uma ferramenta adequada na fresadora, ou uma plaina limadora para realização da usinagem dos entalhes, garantido maior qualidade e precisão.
- Realização da Microscopia eletrônica de varredura (MEV) para analisar a superfície de fratura dos corpos de prova.
- Realizar a proteção catódica por um período maior de dias para verificar a influência da variável tempo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, José Gonçalves. **Influência do Hidrogênio na Tenacidade Quase Estática de uma Junta Soldada Dissimilar Constituída de Aços ARBL e Metal de Adição BS NA 21 (INCONEL 625)**. 2014. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

ARAÚJO, Bruno Allison. **Avaliação Do Nível De Tensão Residual e Susceptibilidade à Fragilização Por Hidrogênio Em Juntas Soldadas De Aços Api 5l X80 Utilizados Para Transporte De Petróleo E Gás**. 2013. 210 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23-18, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials**. West Conshohocken, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E18:2007**: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials. West Conshohocken, 2007. 36 p.

ARAUJO, Paula Rafaella Simão. **INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE HIDROGENAÇÃO NA TENACIDADE AO IMPACTO DO AÇO ASTM A182 F22**. 2019. 39 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia - Campus Caraúbas, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Caraúbas (Rn), 2019.

ASKELAND, Donald; PHULÉ, Pradeep P.. **Ciência e engenharia das matérias**. 5. ed. São Paulo: Cengage, 2008. 594 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Critério de Classificação dos Aços**, NBR NM 172/2000. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Aços Carbono e Ligados para Construção Mecânica - Designação e Composição Química**, NBR NM 87/2000. Rio de Janeiro, 2000.

AZEVEDO, Alessandra Gois Luciano de. **Aplicação da técnica da dupla camada na soldagem do aço ABNT 1045**. 2002. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciências de Materiais, Departamento de Engenharia Mecânica e Produção, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2002.

BAXTER, Richard; BRITTON, Jim. **Proteção Catódica Offshore: o que é e como funciona?**. Disponível em: <https://www.cathodicprotection101.com/protecao-catodica.htm>. Acesso em: 14 jan. 2021.

BURK, J. D.; RIBARDO, C. L. **Thunder Horse: Materials, Welding and Corrosion Challenges and Solutions**. Offshore Technology Conference, 2010.

CALLISTER, William D. Jr.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 8ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. 612 p.

CAVALCANTE, Fabrício José Nóbrega. **Influência do hidrogênio na tenacidade quase estática de uma junta soldada dissimilar constituída de aço AISI 8630m amantegado com er80s-d2**. 2014. 127 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

CHAKRABORTY, Gopa; REJEESH, R.; ALBERT, S.K. **Study on hydrogen assisted cracking susceptibility of HSLA steel by implant test**. *Sciencedirect*, [s. l], v. 1, n. 1, p. 490-495, 30 jul. 2016.

CHIAVERINI, Vicente. **Aços e ferros fundidos: características gerais tratamentos térmicos principais tipos**. 7. ed. São Paulo: Abm, 2012.

COLPAERT, Hubertus. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2008. 652 p.

GALLO, Giulliano Batelochi. **INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO SOBRE A TENACIDADE DE UM AÇO AISI SAE 1045 COM MÉDIO TEOR DE CARBONO, AVALIADA POR ENSAIOS DE IMPACTO**. 2006. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Projetos e Materiais., Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2006.

GAUTO, Marcelo; ROSA, Gilberto. **Química industrial**. Rio Grande do Sul: Bookman, 2013. 283 p. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788565837613/cfi/279!/4/4@0.00:50.1>. Acesso em: 20 maio 2021.

GARCIA, Amari; SPIM, Jaime Alvares; SANTOS, Carlos Alexandre. **Ensaio de Materiais**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 365 p.

GENTIL, Vicente, 1928-2008 **Corrosão** / Vicente Gentil. - 6.ed. - [Reimpr.]. - Rio de Janeiro : LTC, 2017.il.

LUIZ, Gelson. Aço SAE 1045 **Propriedade Mecanicas e composição química**. Blog Materiais [s. l] 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1045-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em: 20 de fevereiro de 2021

METALS HANDBOOK. **Heat Treating of Steels**. 10ed. Ohio: American Society for Metals, v.4, 1991.

NOVA, Antônio Marcos Vila. **Influência da Corrente de Soldagem e da Composição do Metal de Adição Sobre o Comportamento Mecânico de Juntas Soldadas Dissimilares**. 26 de janeiro 2018. 116 f. Dissertação. Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba.

PARK, Y.D.; MAROEF, I.S.; OLSON, D.L. **Retained austenite as a hydrogen trap in steel welds**. *Welding Journal*, vol. 81, p. 27S-35S, 2002.

RUIZ, Eduardo Alberto Perez; NEGRÍN, Luis Iván. **Effect of machining fluid like quenching media on the friction and wear behavior of AISI 1045 steel**. Researchgate, [s. l], v. 9, n. 1, p. 146-154, jul. 2018.

SILVA, Aiana Nascimento. **Análise do Efeito do Hidrogênio na Resposta de Tenacidade à Fratura em Junta Soldada Dissimilar**. 2018. 180 f. Tese (Doutorado) - Engenharia de Materiais da Universidade Federal da Paraíba.

SILVA, André Luiz V. da Costa e; MEI, Paulo Roberto e. **Aços e ligas especiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010. 664 p.

APÊNDICES

Apêndice A

Tabela1: Resultados do monitoramento da proteção catódica

Data	Hora	CP	PH antes do ajuste	PH depois do ajuste	Tensão (mV) antes do ajuste	Tensão (mV) depois do ajuste
30/04/2021	07h40	CF	8,15	-	1116	-
		RE	8,15	-	1089	-
		TR	8,15	-	1100	-
30/04/2021	20h01	CF	6,73	8,24	680	1096
		RE	6,49	8,28	800	1119
		TR	6,81	8,28	850	1214
01/05/2021	08h00	CF	6,68	8,23	964	1102
		RE	6,57	8,27	983	1122
		TR	6,90	8,26	1007	1118
01/05/2021	17h52	CF	7,07	8,21	1055	1116
		RE	6,83	8,25	1058	1125
		TR	6,98	8,22	1053	1104
02/05/2021	08h20	CF	6,56	8,24	1035	1137
		RE	4,46	8,22	1046	1140
		TR	6,71	8,24	1022	1002
02/05/2021	18h15	CF	6,95	8,22	1064	1113
		RE	6,80	8,24	1074	1123
		TR	7,00	8,23	1063	1103
03/05/2021	06h00	CF	6,88	8,22	1064	1163
		RE	6,68	8,27	1027	1133
		TR	6,96	8,26	1028	1103
03/05/2021	18h08	CF	6,97	8,24	1085	1125
		RE	6,91	8,25	1062	1103
		TR	7,20	8,24	1086	1121
04/05/2021	05h45	CF	7,09	8,24	1058	1170
		RE	6,93	8,28	995	1101
		TR	7,19	8,23	1038	1127
04/05/2021	18h37	CF	7,02	8,22	1087	1143
		RE	7,00	8,25	1032	1102
		TR	7,07	8,24	1059	1113
05/05/2021	07h50	CF	7,16	8,25	1061	1148
		RE	7,10	8,22	995	1104
		TR	7,19	8,23	1058	1136

05/05/2021	18h43	CF	7,43	8,24	1103	1149
		RE	7,34	8,22	1047	1103
		TR	7,48	8,24	1088	1130
06/05/2021	08h03	CF	7,75	8,25	1071	1152
		RE	7,58	8,24	1007	1102
		TR	7,76	8,24	1065	1040
06/05/2021	18h10	CF	7,44	8,22	1108	1130
		RE	7,30	8,26	1075	1100
		TR	7,37	8,23	1113	1137
07/05/2021	08h09	CF	7,48	8,24	1072	1159
		RE	7,80	8,27	1005	1100
		TR	7,49	8,23	1061	1141

Fonte: Autoria própria (2021)