# UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE-FURG ESCOLA DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

# ANÁLISE DA FRAGILIZAÇÃO POR BAIXA TEMPERATURA DO AÇO 45NiCrMo16 MODIFICADO APLICADO EM COMPONENTE AERONÁUTICO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Fernando Henrique Schild

RIO GRANDE, RS 2020

# FERNANDO HENRIQUE SCHILD

# ANÁLISE DA FRAGILIZAÇÃO POR BAIXA TEMPERATURA DO AÇO 45NiCrMo16 MODIFICADO APLICADO EM COMPONENTE AERONÁUTICO

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande-FURG como requisito para obtenção do título de "Mestre em Engenharia Mecânica" – Área de Concentração: Engenharia de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha

RIO GRANDE, RS 2020

# Ficha Catalográfica

S334a	Schild, Fernando Henrique. Análise da fragilização por baixa temperatura do aço 45NiCrMo16 modificado aplicado em componente aeronáutico / Fernando Henrique Schild. – 2020. 57 f.							
	Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Rio Grande/RS, 2020. Orientador: Dr. Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha.							
	<ol> <li>Aço Especial Aeronáutico 2. Parafuso 3. Tenacidade</li> <li>Transição Dúctil-Frágil 5. Charpy-U I. Cunha, Pedro Henrique Costa Pereira da II. Título.</li> </ol>							
	CDU 621							
Ostalaa	año no Fontos Diblioto cínio José Deulo dos Contos ODD 10/0211							

Catalogação na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344



#### UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG ESCOLA DE ENGENHARIA Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PPMec



Ata nº 11/2020 da Defesa de Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Aos vinte e cinco dias do mês de setembro de dois mil e vinte, foi instalada a Banca de Defesa de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, às quatorze horas, via Videoconferência, a que se submeteu o mestrando FERNANDO HENRIQUE SCHILD, nacionalidade brasileira, dissertação ligada a Linha de Pesquisa Engenharia de Soldagem e Materiais do PPMec, com o seguinte título: ANÁLISE DA FRAGILIZAÇÃO POR BAIXA TEMPERATURA DO AÇO 45NiCrMo16 MODIFICADO APLICADO EM COMPONENTE AERONÁUTICO.

Referendada pela Câmara Assessora do Curso, os seguintes Professores Doutores: Luciano Volcanoglo Biehl e Cleber Rodrigo de Lima Lessa e presidência do Professor Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha. Analisando o trabalho, os Professores da Banca Examinadora o consideraram:

1. Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha: APROVADO

2.	Luciano Volcanoglo Biehl:	APROVADO	
3.	Cleber Rodrigo de Lima Lessa:	APROVADO	3

Foi concedido um prazo de 30 dias, para o candidato efetuar as correções sugeridas pela Comissão Examinadora (anexo) e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob pena de não expedição do Diploma. A ata foi lavrada e vai assinada pelos membros da Comissão.

Assinaturas:

CPF: 985.887.370-00	1.4	
2	Jewine Volcane ge graft	
CPF: 575.195.100-00	11 11	
3	Chald Contain	
CPF: 808.299.450-91		
	$\rho$	
FERNANDO HENRIQUE SCH	HILD:	

Av. Itália km 08 - Campus Carreiros - Rio Grande/RS - Caixa Postal: 474 - CEP 96203-900 Fone: (053) 3293.5218 - (053) 3293.5119 - E-mail: ppmec@furg.br

#### AGRADECIMENTOs

Agradeço principalmente a minha família por todo o apoio prestado e por tornar possível a realização deste trabalho.

Agradeço ao colega do PPMec Maurício Pereira, por me ajudar direta e indiretamente na realização deste trabalho.

Agradeço aos colegas do IFRS – Campus Rio Grande Adão Skonieski e Ricardo Vergara pela ajuda fornecida na usinagem dos corpos de prova e na disponibilização dos equipamentos e instrumentos para realização do Ensaio Charpy.

Agradeço ao 1º Esquadrão de Helicópteros de Emprego Geral do Sul pela disponibilização dos componentes para serem analisados.

Agradeço ao Prof. Dr. Pedro Henrique Costa Pereira da Cunha pela orientação e por toda a disposição em ajudar com o propósito de evolução constante e por sempre demonstrar os objetivos claros a serem atingidos;

Agradeço ao Professor Doutor Jorge Braz e ao Professor Doutor Luciano Volgagnolo Biehl pela flexibilidade e espírito de cooperação na execução deste trabalho.

Ao graduando Alexandre Leal Pires Junior pela colaboração na execução de ensaios metalográficos.

#### RESUMO

Aços especiais utilizados em aeronaves tem alta significância no que se refere ao comprometimento mecânico e funcional, onde uma falha pode levar a catastróficas consequências. Em face do exposto, o estudo detalhado desses componentes juntamente com sua aplicação torna-se de extrema importância para a engenharia e o apontamento dos riscos envolvidos nas operações aéreas nos mais variados ambientes. O presente trabalho visa analisar a influência da baixa temperatura na resistência do material base de um parafuso utilizado em uma aeronave de asas rotativas. Para tanto foram realizados ensaios energia absorvida no impacto (Charpy-U) no metal base, nas temperaturas de 25°C, 0°C, -20°C, -40°C, com o objetivo de levantar a curva de transição dúctil-frágil. Adicionalmente foram realizados perfis de microdureza, análise guímica do metal de base. caracterização metalográfica (macrografia е micrografias) е espectroscopia de energia dispersiva com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura, e análises de fratura com a finalidade de complementar o estudo das características e comportamento mecânico do componente. Os resultados mostram uma queda em resistência ao impacto do componente em aplicações de baixa temperatura, o que pode restringir ou limitar determinadas aplicações, ou exigir proteções necessárias para a preservação da integridade do parafuso.

Palavras-chave: aço especial aeronáutico; parafuso; tenacidade; transição

dúctil- frágil; Charpy-U.

#### ABSTRACT

Specials steels used in aerospace industry, with high commitment for operation, due to any eventual failure can lead to a catastrophic event with enormous consequences. That issue with application of material become a significant to engineering and the appointment of risks for aerospace operation in different environments. This task aims to analysis of influence of low temperature on toughness of base material of a screw used in helicopters. For that were used assays of impact toughness (Charpy-U) using the material of screw, at temperatures of 25°C, 0°C, -20°C, -40°C with goal of raise and Project the steel graphic of transition brittle-to-ductile. Farther, were realized profile of microhardness, chemical analysis of steel, metallographic characterization (Macro and Micrography) and dispersive energy spectroscopy (EDS) to help the interpretation of cracking. Results of study shows a drop on resistance of impact on low temperature application, which can lead of a restrict use of component or limitation of range of operation, with some careful issues to protect the equipment to preserve his integrity.

**Keywords**: Specific Aerospace Steel; Screw; Toughness; Brittle-to-ductile transition; Charpy-U.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Exemplo de Aeronave em operação no ambiente Antártico14
Figura 2: Navios da Segunda Guerrra mundial(Liberty Ships), que tiveram falha catastrófica
durante o inverno, entre os anos de 1943 e 194418
Figura 3: Corpo de prova para Ensaio de Impacto Charpy, conforme norma ASTM E2319
Figura 4: Representação esquemática de um equipamento utilizado para ensaio de impacto20
Figura 5: Dispositivo utilizado para medição da expansão lateral(a). Representação das
metades de um corpo de prova Charpy-U, ilustrando a medida de expansão lateral, dimensões
A1, A2, A3, A4 e a largura original, dimensão W(b)21
Figura 6: Gráfico típico dos materiais que apresentam transição dúctil-frágil significativa22
Figura 7: Comportamento de diferentes materiais submetidos ao ensaio de impacto23
Figura 8: Diferentes critérios estabelecidos para determinação da temperatura de transição26
Figura 9: Fatores da preparação das amostras que influenciam os resultados no ensaio de
impacto Charpy
Figura 10: Imagem apresentando as fraturas para análise comparativa da quantidade de fratura
dúctil e frágil. Onde 100% representam uma fratura totalmente dúctil e 0% representa uma
fratura totalmente frágil
Figura 11: Imagem representando o percentual da superfície de fratura
Figura 12: Medidas padrão da superfície de fratura para obtenção do grau de fragilidade29
Figura 13: Microestrutura de aço com cementita Fe3C. Ataque químico 4% 1000X31
Figura 15: Microestrutura de aço ao carbono SAE 1080 com colônia de perlita e suas
orientações. Ataque químico 4%- 200x32
Figura 16: Microestrutura de aço baixa liga tratado termicamente, apresentando bainita.
Ataque químico 4% - 500x
Figura 16: Microestrutura de metal de baixa liga apresentado martensita. Ataque químico 2% -
500x
Figura 17: Cabeça do Rotor Principal de Aeronave de Asas Rotativas
Figura 18: Parafuso Analisado (220mmX D12mm)
Figura 19: Fluxograma Metodológico
Figura 20: Amostra para o ensaio40
Figura 21: Equipamento utilizado para o resfriamento das amostras (IFRS – Rio Grande/RS)
41

Figura 22: Equipamento de leitura da temperatura no interior da cuba (IFRS - Rio
Grande/RS), com tubo de nitrogênio líquido ao lado (Raça Fertilização – Pelotas/RS)41
Figura 23: Imagem evidenciando tratamendo termoquímico superficial, com maior quantidade
de carbono na extremidade(a) e homogeneidade do núcleo(b)43
Figura 24: Pontos de medição utilizados no EDS44
Figura 25: Metal base 45NiCrMo16 modificado, com microestrutura apresentando martensita
revenida com austenita retida(1000x)45
Figura 26: Metal Base 45NiCRMo16 modificado, com microestrutura apresentando estrutura
martensitica e com austenita retida(5000x)46
Figura 27: Gráfico do Perfil de Microdureza do Parafuso(Dados da tabela 5)47
Figura 28: Gráfico de Energia Absorvida x Temperatura obtido com o ensaio Charpy-U49
Figura 30: Imagem com amostras fraturadas, sendo (a)25°C,(b)0°C,(c)-20°C e (d)-40°C50

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tabela de medidas referenciais para estabelecimento do percentual de fratura	ı frágil
no ensaio de impacto(ASTM E23,2012)	29
Tabela 2: Resultados da espectroscopia apresentando composição química do Metal Bas	e42
Tabela 3: Composição química do aço 45NiCrMo16 (EN4957-2000)	42
Tabela 4: Elementos encontrados com o EDS	45
Tabela 5: Ensaio de microdureza(avanço 0,15mm,300g,12s)	47
Tabela 6: Valores encontrados para energia absorvida de ruptura do Ensaio Charpy-U	48

# LISTA DE ABREVIATURAS

FATT – Fracture appearance transition (Temperatura de transição aparente de fratura)

DWTT – Drop Weight Tear Testing (Teste de queda de carga)

CTOD - Crack Tip Opening Displacement (Abertura da ponta da trinca)

MO - Microscópio óptico

MEV - Microscópio eletrônico de Varredura

EDS – Energy Dispersive Spectroscopy (Espectroscopia por energia dispersiva)

CP - Corpo de Prova

MFLE - Mecânica da Fratura Linear Elástica

MFEP - A Mecânica da Fratura Elasto-Plástica

FTP – Fracture Transition Plastic (Transição para fratura plástica)

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
Obje	etivos Gerais	15
Obje	etivos específicos	15
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	
2.1	Materiais utilizados na indústria Aeroespacial	16
2.2	Materiais para o ambiente Antártico	16
2.3	Influência da temperatura nos metais	17
2.4	Histórico da fratura frágil	17
2.5	Fratura Frágil	
2.6	Ensaio de Impacto (Ensaio Charpy)	18
2.7	Transição Dúctil-Frágil	21
2.8	Temperatura de transição	23
2.9	superficie de fratura	27
2.10	CAMADA SUPERFICIAL	29
2.11	Metalografia e microestrutura de metais de baixa liga	30
2.12	Ferrita e cementita	31
2.13	Perlita	31
2.14	Bainita	32
2.15	Martensita	
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	
3.1	Material Analisado	35
3.2	Fluxograma	
3.3	Análise química	
3.4	Preparação de amostras para metalografia	
3.5	Análise metalográfica	
3.6	Microdureza	
3.7	Preparação dos corpos de prova	40
3.8	Ensaio charpy-u	40
3.9	Imagens das amostras fraturadas	41
4.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	42
4.1	Definição do material analisado	42

4.2	Análise metalográfica	43
4.3	Camada superficial do componente	44
4.4	Dureza	46
4.5	Perfil de microdureza	46
4.6	Curva de transição dúctil-frágil	47
4.7	Temperatura crítica	49
4.8	Tipo de fratura	50
5.	CONCLUSÕES	
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	
7.	REFERÊNCIAS	
7.1	Referências por extrato:	54
7.2	Referências por data:	54
7.3	Referências por qualis:	55

### 1. INTRODUÇÃO

A operação de aeronaves no ambiente antártico deve ser planejada e executava com alto nível de detalhes, dada às condições meteorológicas, clima frio e dificuldade de apoio logístico e de suprimentos. Tal condição dificultosa acentua-se no inverno, onde a temperatura ambiente aproxima-se dos -40°C. Em situações normais, na Estação Antártica Comandante Ferraz, propriedade da Nação Brasileira e berço das pesquisas no ambiente antártico no País, o apoio quase na sua totalidade é provido no Verão, devido à temperatura mais amena, porém, em situações de emergência, que fogem do planejamento inicial, pode ser necessário o apoio no Inverno.

Alguns apoios previstos para a Estação Antártica Comandante Ferraz são através de Aeronaves de Asas Rotativas da Marinha do Brasil (Figura 1), as quais são úteis para transporte de suprimentos e apoio logístico, emergências médicas, evacuação aeromédica ou combate de incêndio. A aplicação de Aeronaves em ambientes de frio extreme é prevista, porém deve-se observar diversas particularidades de cada equipamento, e deve-se aumentar as margens de segurança na operação, com o fito de preservar vidas humanas.

O componente analisado nesse trabalho é um parafuso especial, e faz parte do conjunto dinâmico de uma aeronave de asas rotativas, sendo fundamental para a fixação das partes móveis do rotor principal em sua estrutura central, é construído de um material base constituído de Aço ligados, e assemelha-se ao aço 45NiCrMo16, portanto denominamos nesse estudo ao tratar-se do parafuso o material a seguir: 45NiCrMo16 modificado, com adição de Cromo, Níquel e Molibdênio.

Desde o início do século 19 sabe-se que temperaturas extremamente baixas podem causar a fragilização do material metálico, o que fomentou a pesquisa em lide, com o objetivo de determinar as características e comportamento do material que está inserido no conjunto dinâmico da aeronave, para entender quais necessidades e demandas devem ser apontadas para que a operação em ambientes de temperaturas baixas e extremamente baixas possa ser realizada cada vez com segurança, onde qualquer ação mitigadora de riscos neste quesito pode ser fundamental para evitar um acidente.



Figura 1: Exemplo de Aeronave em operação no ambiente Antártico

Fonte: Marinha do Brasil

Considera-se que a atual conjuntura de aumento de pesquisas no ambiente antártico corrobora a necessidade de pesquisas no sentido de aplicação de meios e soluções no ambiente de extremo frio, onde já se observa diversos resultados da comunidade científica, sendo a parceria ESANTAR-FURG exemplo de trabalho mútuo a ser realizado com a finalidade comum de alto desempenho das pesquisas científicas.

#### **OBJETIVOS GERAIS**

 Estabelecer as informações da transição dúctil-frágil do Material Base 45NiCrMo16 de um parafuso utilizado em aeronaves, com a finalidade de contribuir para a elevação do nível de segurança operacional em ambientes de baixa temperatura.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar as características do componente aeronáutico, por meio da avaliação de sua composição química, características microestruturais e metalográficas, permeando por sua relação com a utilização prática, atendendo as normas vigentes para os ensaios realizados.
- Avaliar a totalidade das amostras disponíveis para obter informações relevantes sobre o comportamento do material base em ambiente de baixa temperatura.

#### 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 MATERIAIS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA AEROESPACIAL

Os materiais utilizados na indústria Aeronáutica primam pela resistência mecânica aliada ao baixo peso.

Os aços especiais têm como elementos químicos básicos o Fe, Cr e Ni, que trazem sua natureza inoxidável. Tais aços podem também conter elementos como Al,Nb,Ta,Cu,Ti e Mo, com a finalidade de fortalecimento ou endurecimento da matriz ferrosa.(FREITAS, 2009)

#### 2.2 MATERIAIS PARA O AMBIENTE ANTÁRTICO

Os materiais selecionados para uma operação de sucesso no ambiente antártico devem atendar algumas capacidades e características específicas, onde uma grande gama de critérios para condições de baixa temperatura deve ser atendida, incluindo (GORYNIN & MALYSHEVSKIY, 2006):

Resistência à baixa temperatura, referenciado a -60°C;

• Tensão de escoamento de 235–690 MPa (ou maior para diminuição do peso dos componentes);

· Isotropia das propriedades do material em qualquer dimensão;

Resistência à formação de fratura frágil;

Boa Soldabilidade sem necessidade de pré aquecimento ou pós aquecimento (ou com o mínimo de pré aquecimento possível);

Capacidade de suportar cargas estáticas e dinâmicas de vento;

• Aprovação em teste Charpy, Fracture Appearance Transition Temperature (FATT) test, Nil-Ductility Transition test (NDT), Drop Weight Tear test (DWTT), Crack Tip Opening Displacement test (CTOD).

#### 2.3 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NOS METAIS

A influência da temperatura num corpo de prova de um metal de baixa ou média resistência, acusada numa máquina de ensaios de impacto, varia sensivelmente com a temperatura de ensaios. O que se observa é que existe uma faixa de temperatura relativamente pequena, na qual a energia absorvida cai consideravelmente, sendo que o tamanho dessa faixa varia com o metal e, às vezes, há uma queda bastante brusca. De modo geral, pode-se definir a temperatura de transição, para o aço ou outro metal que a exiba, como aquela que gera uma mudança no caráter de ruptura do material, passando de dúctil a frágil, ou vice-versa (CHIAVERINI, 2004; COLPAERT, 2008).

#### 2.4 HISTÓRICO DA FRATURA FRÁGIL

O histórico de fratura frágil inclui 160 navios, que tiveram falhas catastróficas durante os meses de inverno entre 1943 e 1944 (Figura 2). Falhas de tanques de armazenamento também ocorreram em ocasiões distintas em 1919 e 1978. Em 1919, em um dia frio, apenas quatro anos após ser fabricado, um tanque abruptamente se abriu, liberando uma inundação de melaço na cidade de Boston. Práticas de fabricação ineficientes, aliadas a baixa resistência do material, assim como características da construção contribuíram para as referidas falhas. (BENAC,D.J. & WOOD, D. 2016)

Figura 2: Navios da Segunda Guerra mundial(Liberty Ships), que tiveram falha catastrófica durante o inverno, entre os anos de 1943 e 1944.



Fonte: BENAC, D.J. & WOOD, D. 2016

#### 2.5 FRATURA FRÁGIL

A Fratura Frágil na indústria aeroespacial, óleo e gás, indústria química e nuclear não é um fato comum de ser encontrado. Porém, quando este fato ocorre, pode resultar em uma repentina e inesperada falha catastrófica, seguida de severos danos potenciais, até mesmo com possibilidade de perda de vidas. Sabese que a fragilização está relacionada com o tipo de ligação atômica estabelecida, e que a temperatura baixa aproxima os átomos, criando essa tendência.

Aços ao carbono e aços de liga, diferentes das ligas de Alumínio e Aços Inoxidáveis austeníticos, podem ter sua ductilidade alterada, baseada na exposição a temperatura e quando submetidos alta carga estática ou dinâmica. Aços têm uma resistência determinada para uma dada temperatura. O Ensaio Charpy é um indicador e energia absorvida no impacto, sendo que conforme ocorre a queda da temperatura, a resistência diminui, necessitando menos energia para causar a fratura. (BENAC,D.J. & WOOD, D. 2016)

#### 2.6 ENSAIO DE IMPACTO (ENSAIO CHARPY)

Existem duas formas principais de ensaio de impacto, o Charpy e o Izod. Ambos os ensaios são padronizados pelas normas ASTM E23 e BS EN ISO 148-1:2010. Nos dois tipos de ensaio, o corpo de prova possui uma seção transversal quadrada ou retangular, onde é usinado o entalhe (Figura 3). Ressalta-se a importância do estrito cumprimento dimensional conforme a norma, assim como os critérios estabelecidos para acabamento.

O ensaio de impacto é um ensaio dinâmico utilizado para análise do comportamento de materiais. Esse ensaio fornece a energia necessária para fraturar uma amostra padronizada (GARCIA, et al., 2012).



Figura 3: Corpo de prova para Ensaio de Impacto Charpy, conforme norma ASTM E23.

A energia de impacto absorvida pelo corpo de prova está diretamente relacionada com a temperatura, sendo que seus resultados podem ser somente comparados entre si ou com um valor determinado em uma especificação. Essa limitação do ensaio está principalmente associada ao fato do entalhe usinado ser, de modo geral, um concentrador de tensões menos severo do que o encontrado na prática.

As condições padronizadas do CP Charpy poderão não alcançar as restrições impostas pelas equações da tenacidade à fratura, seja sob condições da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) ou Mecânica da Fratura Elasto-

Fonte: SOUZA,1982

Plástica (MFEP), quanto à restrição de zona plástica à frente da trinca/entalhe. Essas restrições estão associadas ao campo de tensões à frente do entalhe, requisito fundamental dos parâmetros de tenacidade à fratura para determinação de tamanho crítico de trinca para fratura. Logo, devido a essas limitações, o resultado obtido no ensaio de impacto não pode ser utilizado para quantificar a tenacidade à fratura do metal base de um componente, sendo assim, o resultado encontrado não se aplica na análise de adequação para o uso.

O funcionamento do equipamento de ensaio de impacto (Figura 4) consiste na liberação de um martelo pendular de uma posição conhecida (altura H). Após a liberação, o martelo irá descer e colidir com a amostra parando a uma altura h. Assumindo que o atrito do pêndulo durante o movimento é desprezível, a energia absorvida (EA), pela amostra após o impacto, será igual à diferença de altura (H-h) vezes o peso do martelo (W). O resultado da medição de energia de impacto é mostrado diretamente na escala de leitura do equipamento.

Figura 4: Representação esquemática de um equipamento utilizado para ensaio de impacto



Fonte: GARCIA, 2012

Além da energia necessária para fraturar uma amostra, outras informações podem ser obtidas através do ensaio de impacto. A quantidade de expansão lateral em cada lado do corpo de prova após a fratura é obtida com o auxílio de um dispositivo, que utiliza um relógio comparador (Figura 5a), para

medição da expansão lateral de modo comparativo em relação à medida inicial W do corpo de prova (Figura 5b)

Figura 5: Dispositivo utilizado para medição da expansão lateral(a). Representação das metades de um corpo de prova Charpy-U, ilustrando a medida de expansão lateral, dimensões A1, A2, A3, A4 e a largura original, dimensão W(b).



Fonte: COSTA,2014

# 2.7 TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL

O ensaio de impacto Charpy tem como uma das principais funções determinar se um material apresenta ou não uma transição dúctil-frágil com a variação da temperatura de ensaio e, caso isso ocorra, qual a faixa de temperatura que acontece este fenômeno. Para a aplicação do material, é importante conhecer o seu comportamento com a variação da temperatura, para assim, estabelecer a temperatura na qual a fratura do material irá ocorrer de forma frágil. A curva de transição dúctil-frágil está relacionada com a dependência da energia absorvida pelo corpo de prova Charpy em relação à temperatura estabelecida. Em termos gerais, a curva apresenta um patamar superior, em que a fratura ocorre de modo dúctil, um patamar inferior, caracterizado por uma fratura frágil e uma região de transição em que ocorre a concorrência dos modos de fratura dúctil e frágil (Figura 6). No entanto, nem

todos os materiais apresentam uma transição dúctil-frágil acentuada ou perceptível (GARCIA, 2012)



Figura 6: Gráfico típico dos materiais que apresentam transição dúctil-frágil significativa.

Fonte: CIMM,2020

De acordo com a maneira que ocorre essa transição, os materiais podem ser divididos em três grupos:

a)Materiais que possuem estrutura cristalina CFC (cúbica de face centrada) de baixa e média resistência. Estes materiais permanecem dúcteis mesmo a temperaturas extremamente baixas.

b)Materiais com estrutura CCC (cúbica de corpo centrado) apresentam a curva de transição dúctil-frágil bem definida.

c)Materiais de resistência elevada, tais como os aços de alta resistência e as ligas de alumínio e titânio, possuem baixa tenacidade ao entalhe. Nesses materiais, ocorre fratura frágil em baixas temperaturas e em altas temperaturas a fratura ocorre por ruptura de baixa energia.



Figura 7: Comportamento de diferentes materiais submetidos ao ensaio de impacto.

Fonte: CIMM, 2020.

O fato dessa diferença na transição entre materiais CCC e CFC está associado ao fenômeno de geração, movimentação e recuperação de discordâncias. No caso de materiais com estrutura CFC, os níveis de tensão em que ocorrem esses fenômenos, em geral, não são suficientemente elevados para romper as ligações atômicas e conduzir a ruptura por clivagem, ou seja, fratura frágil (GARCIA, 2012).

#### 2.8 TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO

Não há um padrão único estabelecido para a determinação da TTDF (Temperatura de Transição Dúctil-Frágil). Entende-se que a ocorrência de transição dúctil-frágil se dá em uma faixa de temperaturas. Por isso, a determinação da TTDF pode ocorrer de diversas formas, com diferentes abordagens, utilizando as diferentes informações obtidas no ensaio de impacto. (GARCIA, 2012) cita como maneira mais comum para determinação da TTDF àquela que estabelece um ponto no qual a energia de impacto atinge um

determinado valor. É também utilizado um ponto correspondente a um percentual de fratura dúctil. Uma decisão extremamente conservadora admitiria que a TTDF ocorra a uma temperatura onde não ocorre fratura frágil, ou seja, na qual haveria 100% de fratura dúctil.

Algumas das diversas maneiras possíveis para determinar a TTDF, são citadas como exemplos (DAVIM & MAGALHAES,2004):

 a) Temperatura correspondente ao ponto da curva de energia absorvida por temperatura onde se inicia a queda no valor da energia absorvida, também designada por temperatura de transição plástica de fratura;

b) temperatura correspondente ao ponto da curva anteriormente citada onde o valor de energia absorvida é igual à média dos dois patamares;

c) temperatura abaixo da qual o material apresenta energia absorvida inferior a um valor pré-estipulado;

d) temperatura acima da qual a fratura é 100% fibrosa;

e) temperatura que produz uma fratura 50% fibrosa e 50% brilhante;

f) temperatura abaixo da qual a fratura é 100% brilhante (temperatura de ductilidade nula).

Há vertentes que estabelecem uma única maneira para a definição da TTDF, e que normalmente assume-se que a temperatura de transição é aquela na qual o material absorve 20J de energia (CALLISTER,2005), também proposto pelo U.S. National Bureau of Standards e mencionado por (TOTH,2002). Outro autor por sua vez, cita três metodologias para determinação da TTDF (HERTZBERG,1996):

(a) a temperatura na qual o material absorve 20 J, assim como Callister e o
 U.S. National Bureau of Standards recomendou na época da investigação das ocorrências de fratura nos navios da classe Liberty (TOTH, 2002)

(b) critério da contração lateral, na qual se verifica a temperatura na qual o corpo de prova atinge contração lateral de 0,38mm e

(c) temperatura na qual se obtém 50% de fratura fibrosa, ou fratura dúctil.

Entretanto, Hertzberg comenta que o método de definição da temperatura de transição deve ser definido de acordo com o tipo de material que está sendo

avaliado, e sua aplicação. O autor cita que no caso do material dos navios da classe Liberty na Segunda Guerra, não existe histórico de falha com absorção de energia maior que 20 J, considerado um dos primeiros critérios adotados por ter sido este um dos primeiros episódios de falha que levou ao estudo sobre a existência e relevância de se conhecer a temperatura de transição dos materiais.

Entretanto, ele comenta que a dificuldade para a definição da TTDF é ainda maior se mais de um critério for considerado. (HERTZBERG, 1996)

Embora não exista um critério único para determinação da temperatura de transição (TT), a Figura 8 mostra as temperaturas de transição adotando-se diferentes critérios. O critério mais conservador é representado por T1, que representa a temperatura para a qual acima dela a fratura será 100% dúctil. Outro modo conservador de determinar TT é estabelecer a temperatura na qual observamos 50% de fratura dúctil e 50% de fratura frágil (T2). Também se pode definir TT como sendo a média de energia entre o patamar superior e inferior da curva (T3). Outra maneira é estabelecer, de forma arbitrária, um valor de energia absorvida para TT (T4). (COSTA, 2014)

Outro critério é a temperatura de transição de ductilidade **T4** associada com um valor arbitrário de energia absorvida CV (Figura 8), estabelecido com base na experiência de ensaios Charpy. Por exemplo, este valor de energia foi fixado em 2,1 kgf.m para aços de baixa resistência, com base em inúmeros testes realizados com chapas para navios durante a segunda guerra.(CIMM, 2020)

Por fim, outro modo de determinação de TT é estabelecer T5 como sendo a temperatura para qual abaixo dela, será observada somente fratura frágil (fratura por clivagem). Os critérios T1 e T5 recebem a seguinte nomenclatura, respectivamente: FTP (fracture transition plastic ou transição para fratura plástica em português) e NDT (nil ductility temperature ou temperatura de ductilidade nula em português).



Figura 8: Diferentes critérios estabelecidos para determinação da temperatura de transição

Fonte: CIMM, 2020.

Além do tipo de estrutura dos materiais metálicos (CCC ou CFC, por exemplo), a temperatura de transição dúctil-frágil é afetada por outros fatores como: tamanho de grão (quanto maior o grão menor será a energia absorvida no impacto), direção de retirada dos corpos de prova (considerando também o sentido de posicionamento do entalhe – Figura 9) devido à heterogeneidade microestrutural e composição química.





Fonte: GARCIA,2012.

#### 2.9 SUPERFÍCIE DE FRATURA

Outra informação obtida no ensaio de impacto está relacionada com a aparência da fratura, que pode apresentar-se de maneira frágil, dúctil ou uma mistura das duas. A fratura frágil apresenta uma textura granular (fratura por clivagem) caracterizada por uma superfície facetada brilhante e refletiva. Por outro lado, a fratura dúctil apresenta uma superfície fibrosa, sendo que a sua superfície se mostra mais escura por causa da reflexão da luz em várias direções, devido às pequenas cavidades presentes. A determinação da porcentagem de fratura frágil é realizada por métodos de medida direta em função do aspecto da superfície de fratura, por comparação da superfície fraturada com resultados de outros ensaios, por ensaios-padrão (Figura 10) ou através de fotografias da superfície total (Figura 11).

Figura 10: Imagem apresentando as fraturas para análise comparativa da quantidade de fratura dúctil e frágil. Onde 100% representam uma fratura totalmente dúctil e 0% representa uma fratura totalmente frágil



Fonte: ASTM E23, 2012.

Figura 11: Imagem representando o percentual da superfície de fratura



A análise qualitativa caracteriza o modo de fratura da zona instável e estabelece a descrição de como a fratura ocorreu. O percentual de fragilidade considerado pode ser obtido através da comparação das medidas com tabelas referências (ASTM E23, 2012).

As medidas A e B da Figura 12 são os valores que podem ser comparados com a tabela 1 para a obtenção do percentual de fragilidade.

Figura 12: Medidas padrão da superfície de fratura para obtenção do grau de fragilidade



Fonte:ASTM E23,2012.

Tabela 1: Tabela de medidas referenciais para estabelecimento do percentual de fratura frágil no

Dimensão	2	Dimensão A, mm																	
B, mm	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0
1,0	99	98	98	97	96	96	95	94	94	93	92	92	91	91	90	89	89	88	88
1,5	98	97	96	95	94	93	92	92	91	90	89	88	87	86	85	84	83	82	81
2,0	98	96	95	94	92	91	90	89	88	86	85	84	82	81	80	79	77	76	75
2,5	97	95	94	92	91	89	88	86	84	83	81	80	78	77	75	73	72	70	69
3,0	96	94	92	91	89	87	85	83	81	79	77	76	74	72	70	68	66	64	62
3,5	96	93	91	89	87	85	82	80	78	76	74	72	69	67	65	63	61	58	56
4,0	95	92	90	88	85	82	80	77	75	72	70	67	65	62	60	57	55	52	50
4,5	94	92	89	86	83	80	77	75	72	69	66	63	61	58	55	52	49	46	44
5,0	94	91	88	85	81	78	75	72	69	66	62	59	56	53	50	47	44	41	37
5,5	93	90	86	83	79	76	72	69	66	62	59	55	52	48	45	42	38	35	31
6,0	92	89	85	81	77	74	70	66	62	59	55	51	47	44	40	36	33	29	25
6,5	92	88	84	80	76	72	67	63	59	55	51	47	43	39	35	31	27	23	19
7,0	91	87	82	78	74	69	65	61	56	52	47	43	39	34	30	26	21	17	12
7,5	91	86	81	77	72	67	62	58	53	48	44	39	34	30	25	20	16	11	6
8.0	90	85	80	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	0

ensaio de impacto.

Fonte: ASTM E23,2012.

#### 2.10 CAMADA SUPERFICIAL

Um grande problema inerente à metalurgia é a degradação de componentes de engenharia que podem fraturar em serviço de forma catastrófica. Problemas relacionados a fenômenos tais como corrosão, desgaste por abrasão e fadiga, são comumente causadores de acidentes e desastres. A barreira para a utilização de materiais ferrosos em aplicações onde o componente começa a degradar a partir de sua superfície resultou no

desenvolvimento da Engenharia de Superfícies no início da década de 80 (TROTTA, 2000).

As camadas formadas devem ser contínuas e uniformes na superfície, não são geradas distorções dimensionais ou geométricas na peça, pode ser aplicado em qualquer aço e preserva os tratamentos térmicos prévios no material e a dureza do núcleo. (HAN, 2013).

A carbonitretação é um tratamento eficiente na melhoria das propriedades superficiais de metais ferrosos. Para esse processo, é utilizada uma mistura de gases geralmente composta por nitrogênio e hidrogênio, com atmosfera enriquecida em Carbono, em proporções específicas (ALVES JÚNIOR, 2001).

#### 2.11 METALOGRAFIA E MICROESTRUTURA DE METAIS DE BAIXA LIGA

O aço de baixa liga, com teor de elementos de liga menor do que 5% é amplamente utilizado e possui uma combinação de alta resistência mecânica, ductilidade e tenacidade e as aplicações envolvem projetos de engenharia nas áreas industrial e militar, como aeronáutica e marinha, onde elevadas propriedades mecânicas são requeridas (HAZAN, 2013) Para atingir altos níveis de desempenho, como aqueles requeridos para aplicação na indústria aeroespacial, são necessários elevados índices de resistência e de dureza, além de uma satisfatória tenacidade dos aços utilizados, sendo que uma variedade de tratamentos térmicos deve ser levada em consideração para se alcançar essa combinação de propriedades, podendo incluir, inclusive, técnicas de endurecimento superficial (GHARGHOURI & MEDRAJ, 2013). Dessa forma, é bastante útil um conhecimento prévio sobre o comportamento metalúrgico desse e de outros aços em resposta a um procedimento que envolva transformação de fases a partir de processos térmicos.

#### 2.12 FERRITA E CEMENTITA

A ferrita (Figura 13) é a estrutura mais comum em aços de baixa liga e é constituída de pouca quantidade de carbono (menos de 0,005% a baixa temperatura), e tem aspecto de baixa dureza, comparando com os outros constituintes possíveis. Cementita (FE3C), está presente, nos aços de baixa liga, na matriz ferrítica(G.KRAUSS,1990).

Figura 13: Microestrutura de aço com cementita Fe3C. Ataque químico 4% 1000X



Fonte: B.L. BRAMFITT AND S.J. LAWRENCE,2004.

#### 2.13 PERLITA

Dada como um constituinte comum em aços de baixa liga e médio carbono, a perlita é constituída de microconstituíntes, ferrita e cementita. Essa fase é caracterizada por formação de estrutura lamelar. Evidenciada em estruturas de coloração, devido ao ataque químico na ferrita. As colônias de perlita com diferentes orientações podem ser observadas na Figura 14. Figura 14: Microestrutura de aço ao carbono SAE 1080 com colônia de perlita e suas orientações. Ataque químico 4%- 200x



Fonte: G.KRAUSS,1990

#### 2.14 BAINITA

Bainita (Figura 15) é um constituinte formado também por ferrita e cementita. Porém, a bainita se forma em taxas de resfriamento mais rápidas do que a perlita, sendo totalmente diferente. Possuindo diversas morfologias diferentes, as clássicas morfologias de bainita são chamadas de bainita superior ou bainita inferior. A formação depende da temperatura durante a transformação da Austenita no resfriamento do aço, sendo quanto menor, mais refinado o grão.



Figura 15: Microestrutura de aço baixa liga tratado termicamente, apresentando bainita. Ataque químico 4% - 500x.

Fonte: B.L. BRAMFITT and A.O. BENCOSTER,2002.

#### 2.15 MARTENSITA

A martensita é um constituinte formado por rápido resfriamento. Na sua essência, é ferrita supersaturada com carbono. Isso significa que se torna um componente de alta dureza. A Martensita possui uma estrutura tetragonal de corpo centrado, que é uma forma distorcida da ferrita com estrutura cúbica de corpo centrado. Há dificuldades, por vezes, para diferenciar martensita temperada de bainita. (BHADESHIA, HONEYCOMBE,2006)



Figura 16: Microestrutura de metal de baixa liga apresentado martensita. Ataque químico 2% - 500x

Fonte: B.L BRAMFITT,1991

# 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAL ANALISADO

O rotor principal de uma aeronave de asas rotativas (Figura 17) tem em sua parte de fixação das pás o parafuso em análise (Figura 18). Os dados de fabricação do componente, tais como: material, processos de fabricação, testes realizados, não foram disponibilizados pelo fabricante conforme política intrínseca à indústria aeronáutica.

Figura 17: Cabeça do Rotor Principal de Aeronave de Asas Rotativas



Fonte: O Autor

A completa análise do componente faz-se necessária para o entendimento do estudo em questão, onde os dados coletados são de fundamental importância para a interpretação dos resultados.

Figura 18: Parafuso Analisado (220mmX D12mm)



Fonte: O Autor

#### 3.2 FLUXOGRAMA

O Componente foi submetido aos ensaios metalográficos para o auxílio na identificação de sua microestrutura e disposição de componentes químicos e a ensaio destrutivo do tipo Charpy para a verificação das propriedades mecânicas.

A totalidade das etapas visa estabelecer importantes informações da identificação e do comportamento do material base. A metodologia utilizada segue o fluxograma da Figura 19.



Fonte: O Autor

# 3.3 ANÁLISE QUÍMICA

Foi preparada uma secção transversal do parafuso, e submetida a espectroscopia ótica no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) - UFRGS. O processo de identificação envolve a análise de uma região da amostra, a qual libera fótons lidos pelo espectrômetro com seus comprimentos de onda. Essa leitura apresenta a concentração de cada elemento químico da tabela periódica dos elementos presentes na amostra.

#### 3.4 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS PARA METALOGRAFIA

O componente foi submetido às análises metalográficas. A amostra utilizada foi uma seção do parafuso estudado. Foi utilizada, majoritariamente, uma amostra embutida em baquelite com formato de "meia-lua" para que fosse possível uma boa observação da superfície do parafuso.

A preparação da amostra iniciou-se com o corte de um disco separado do parafuso em si, e posteriormente o corte desse disco para o formato de "meialua" para que fosse possível o embutimento. Foi utilizada uma policorte com fluído refrigerante e disco cerâmico para esta operação.

Após o corte a amostra foi embutida em baquelite para que fosse possível realizar a operação de lixamento. Para tanto, foi utilizada uma embutidora metalográfica, na qual a superfície inferior foi preparada com um antiaderente, onde a amostra repousara. Após esse passo, o cilindro foi preenchido com baquelite até uma determinada altura arbitrária, e depois fechado. O cilindro então foi aquecido até 120° C durante o tempo de 12 minutos enquanto mantinha-se uma pressão no cilindro de 6 Bar. O cilindro é resfriado de volta à temperatura ambiente, para ser manuseado, e é feita a remoção da amostra embutida.

O lixamento foi feito manualmente utilizando lixas de granulometrias desde o valor de #80 até #1200, sempre mudando a orientação da amostra em 90° a cada troca de lixa. O procedimento de lixamento foi a execução de movimentos retilíneos na vertical de ida e volta com o uso, também, de uma leve camada de água corrente para manter a temperatura superficial da amostra próxima da temperatura ambiente. Esse processo fora repetido até que toda a superfície da peça se encontrasse com riscos paralelos. Então a amostra era lavada em água corrente, seca com um jato de ar comprimido, inspecionada visualmente, por fim feita a troca da lixa.

Ao fim do lixamento foi realizado o polimento, onde a peça devidamente lixada pela última lixa de granulometria #1200 foi levada à politriz. Na politriz um disco de feltro fora encaixado e posto a girar, onde no feltro foi despejada uma solução de alumina (5%, 0,3 micras) e água, e então a superfície lixada da amostra era pressionada contra o feltro girante e contra o giro em si. Sempre aplicando água e alumina quando necessário.

Na amostra com superfície espelhada, foi feito um ataque químico com o reagente Nital 3% (3% de ácido nítrico e 97% de álcool). O reagente foi cuidadosamente despejado em um béquer e, utilizando uma tenaz, foi submergida a superfície polida da amostra no Nital por 12 segundos. A amostra foi removida e devidamente limpa, para ser observada no microscópio óptico.

#### 3.5 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Duas etapas de microscopia foram realizadas: a microscopia óptica e a microscopia eletrônica de varredura.

A amostra, devidamente preparada, foi levada ao microscópio óptico Olympus GX 51S, onde foi feita uma investigação visual do núcleo e da superfície do parafuso. Foram empregadas lentes com as resoluções de 50x, 100x, 250x, 500x e 1000x para ambas as investigações. Além do microscópio óptico também foi utilizado o MEV JSM - 6610LV, para que fossem geradas imagens de resolução ainda maior, com o complemento do EDS para mapear elementos químicos. Adicionalmente, foi utilizado o software ImageJ para obtenção da espessura de camada por comparação.

#### 3.6 MICRODUREZA

Foi realizado um ensaio de microdureza na amostra, para a definição do perfil de dureza do material. Foi dado um avanço padrão de 0,15 mm, com carga de 300 g e tempo de aplicação de 12 s, obtendo-se um perfil de 9 indentações partindo da superfície ao núcleo, com a primeira impressão estando aproximadamente 0,4 mm afastada da borda limite do material como requer a norma do ensaio de dureza.

#### 3.7 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

A preparação dos corpos de prova (Figura 20) foi realizada a partir da operação de fresamento do parafuso, com a finalização em retífica, devido ao acabamento exigido para adequação do metal base com as medidas da norma ASTM E23. Foram utilizadas ferramentas para usinagem de Alta dureza, devido à resistência ao desgaste do material ser elevada (55HRC). Para a preparação das 12 (doze) amostras foram utilizadas 4 (quatro) unidades do parafuso.

Figura 20: Amostra para o ensaio



Fonte: O Autor

#### 3.8 ENSAIO CHARPY-U

O Ensaio Charpy-U foi realizado de acordo com a norma ASTM E23. Foram preparados 12 corpos de prova, com o entalhe do tipo C (Charpy-U). As 12 amostras foram ensaiadas em quatro temperaturas diferentes, sendo três amostras para cada temperatura (-40°C, -20°C, 0°C, 25°C). Para o resfriamento foi utilizado Nitrogênio Líquido. A cuba hermética utilizada para estabilização da temperatura (Figura 21) possui um termopar tipo K conectado a uma unidade digital de leitura de temperatura em °C(Figura 22).



Figura 21: Equipamento utilizado para o resfriamento das amostras (IFRS - Rio Grande/RS)

Fonte: O Autor

Figura 22: Equipamento de leitura da temperatura no interior da cuba (IFRS – Rio Grande/RS), com tubo de nitrogênio líquido ao lado (Raça Fertilização – Pelotas/RS).



Fonte: O Autor

#### 3.9 IMAGENS DAS AMOSTRAS FRATURADAS

A partir do ensaio Charpy, seguiu-se com a coleta das superfícies de fratura, com a finalidade de analisar e estabelecer os critérios de ductilidade nas variadas temperaturas, auxiliando a determinar a curva de transição do material.

### 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

#### DEFINIÇÃO DO MATERIAL ANALISADO 4.1

A definição do material base, devido à ausência de informações do fabricante do componente, foi realizada com base na sua composição química (Tabela 2) e análise de microestrutura, bem como utilizando o auxílio do microscópio eletrônico de varredura, com a finalidade de determinar os microconstituintes e a distribuição dos elementos presentes no ensaio espectrométrico. De acordo com a (Tabela 3), pode-se determinar um enquadramento de acordo com a norma europeia EN 4957-2000, como sendo o aço 45NiCrMo16, modificado, com adição de Cromo, Níquel e Molibdênio.

Tabela 2: Resultados da espectroscopia apresentando composição química do Metal Base

	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Мо	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb	Sn
%	0,403	0,358	0,149	0,004	<0,00 1	1,99	0,526	4,60	0,011	<0,01	0,019	0,001 70	0,002	<0,00 1	<0,01	<0,00 02	0,002

Fonte: LAMEF – UFRGS

T 1 1 2	a · ~	/ · 1	4 63 1	0 16 16
I abela 4	1 Omnocicao	duumico d	0 900 /13N	11 rN/016
	COMDOSICAO	uunnica u	0 a c 0 + J n	ICHWI010
		-1		

	С	Mn	Si	Cr	Мо	Ni				
%	0,40	0,20	0,10	1,20	0,15	3,80				
	а	а	а	а	а	а				
	0,50	0,50	0,40	1,50	0,35	4,30				
Eonte: EN4957-2000										

onte: EN495/-2000

A espectroscopia de emissão ótica feita no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS revelou que a composição química do aço do parafuso é similar ao aço 45NiCrMo16. Destaca-se uma notável quantidade de níquel, aproximadamente 4,6%, presente. Este material é adequado para a aplicação em questão, pois oferece balanço entre resistência e tenacidade, bem como quimicamente apropriado para um tratamento de nitretação. (KRAUSS, 1994).

#### 4.2 ANÁLISE METALOGRÁFICA

Através dos resultados do microscópio óptico (MO) foi possível observar uma diferença visível entre as microestruturas da superfície e do núcleo, indicando a presença de uma camada proveniente de um tratamento termoquímico conforme Figura 23, onde é evidenciada uma camada superficial com maior quantidade de carbono(Figura 23a) e o núcleo com menor quantidade de carbono e homogêneo (Figura 23b).

Utilizando o software de análise de imagens ImageJ foi medida a camada de tratamento e o valor obtido foi de 0,352 mm.

Figura 23: Imagem evidenciando tratamendo termoquímico superficial, com maior quantidade de carbono na extremidade(a) e homogeneidade do núcleo(b).



Fonte: O Autor

O tratamento superficial confere ao parafuso maior resistência à corrosão e ao desgaste, dada à utilização em ambientes por vezes agressivos que possam trazer degradação prematura caso não houvesse um tratamento superficial adequado. Com a formação da camada de carbonitretação obtém se uma melhoria nas propriedades mecânicas superficiais dos materiais ferrosos. (ALVES JÚNIOR, 2001).

#### 4.3 CAMADA SUPERFICIAL DO COMPONENTE

A camada superficial, com os 0,352mm iniciais de diferente composição química, com maior quantidade de carbono, necessitou de análise em Microscopia eletrônica para maior detalhe dos constituintes. Sendo assim foi submetida ao EDS (Figura 24) para caracterização dos elementos presentes (Tabela 4) e melhor determinação do tipo de tratamento superficial a que foi submetido.

As camadas formadas devem ser contínuas e uniformes na superfície, não são geradas distorções dimensionais ou geométricas na peça. (HAN, 2013).

Observa-se uma maior quantidade de Nitrogênio e carbono na extremidade, caracterizando possivelmente um tratamento de carbonitretação. A concentração do elemento decresce conforme se aproxima do núcleo. Adicionalmente, o ensaio ratifica a composição química e as quantidades de Níquel, Cromo e Molibdênio.



Figura 24: Pontos de medição utilizados no EDS

Fonte: O Autor

EDS	C-K	N-K	Si-K	Cr-K	Fe-K	Ni-K	Mo-L
Ponto 1	1.21	1.78	0.56	2.11	90.13	3.77	0.43
Ponto 2	1.06	1.94	0.63	1.90	89.78	4.00	0.69
Ponto 3	1.30	1.99	0.56	2.21	90.17	3.77	0.65
Ponto 4	1.04	1.72	0.38	2.19	90.78	3.52	0.37
Ponto 5	1.00	1.64	0.55	2.31	90.10	3.69	0.71
Fonte: O Autor							

Tabela 4: Elementos encontrados com o EDS(em porcentagem)

A estrutura do material base evidenciada na microscopia denota presença de martensita revenida (Figura 25), com estrutura direcionada, com formação característica de um tratamento térmico com rápido resfriamento, sendo o processo subsequente de revenimento responsável pelo alívio de tensões e melhoria na ductilidade e fragilidade do material. Na Figura 26 pode-se observar em maior magnitude.

Figura 25: Metal base 45NiCrMo16 modificado, com microestrutura apresentando martensita revenida com austenita retida(1000x).



Fonte: O Autor

Figura 26: Metal Base 45NiCRMo16 modificado, com microestrutura apresentando estrutura

 St. 15K2
 WD10mm
 St37
 \$5,00
 \$µm

martensitica e com austenita retida(5000x)

Fonte: O Autor

#### 4.4 DUREZA

Dada à constatação da camada superficial, a medição da dureza na superfície do parafuso foi de 790 HV, condizente com uma camada carbonitretada de um aço de baixa liga com microestrutura martensítica, o que confere alta resistência ao desgaste e resistência à corrosão, garantindo que o componente não sofra deformações superficiais que trariam a situação de concentradores de tensão, suscetibilizando o início do desencadeamento de uma trinca.

#### 4.5 PERFIL DE MICRODUREZA

Adicionalmente, a análise da camada tratada termoquimicamente fez-se importante para o entendimento do tipo de tratamento que o material sofreu e sua aplicabilidade na função mecânica. A camada apresentada possivelmente tratase de carbonitretação devido à composição química e característica microestrutural. De acordo com o gráfico apresentado na Figura 27, a profundidade atingida pelo tratamento superficial é de aproximadamente 0,40 mm, o que confirma o citado na imagem da Figura 23a. A aplicabilidade sofre um aumento de resistência à corrosão e melhoria das propriedades mecânicas (ALVES JÚNIOR, 2001).

MICRODUREZA (HV)								
0,4mm	0,55mm	0,70mm	0,85mm	1,00mm	1,15mm	1,30mm	1,45mm	1,60mm
799	614	519	484	448	462	453	441	450
Fonte: O Autor								

Tabela 5: Ensaio de microdureza(avanço 0,15mm,300g,12s)

Figura 27: Gráfico do Perfil de Microdureza do Parafuso(Dados da tabela 5)



A camada superficial não foi considerada para o ensaio Charpy, dada a necessidade de usinagem das amostras para atingir as especificações da norma ASTM E23.

### 4.6 CURVA DE TRANSIÇÃO DÚCTIL-FRÁGIL

Garcia et al. (2008) relacionam as informações que podem ser obtidas de um ensaio de impacto:

a) Energia absorvida: obtida pela leitura da máquina;

 b) Contração ou expansão lateral: obtida pela medida das dimensões finais do corpo de prova na região da fratura, comparando-se com as medidas originais do mesmo;

c) Aparência da fratura: determinação da porcentagem de fratura frágil ocorrida na fratura do corpo de prova, obtida pela avaliação da face de fratura do corpo de prova.

O estabelecimento da curva de transição dúctil-frágil para o material base é de fundamental importância para o entendimento do comportamento em baixa temperatura, onde a operação do parafuso pode apresentar diminuição de sua resistência mecânica. A determinação da energia absorvida durante o ensaio de impacto Charpy é utilizada para a construção da curva.

O Ensaio Charpy é um indicador da resistência à fratura, sendo que conforme ocorre a queda da temperatura, a resistência diminui, necessitando menos energia para causar a fratura. (BENAC, D.J. & WOOD, D. 2016).

Utilizando os dados da tabela 6, foi formado o gráfico abaixo (Figura 28) com os resultados dos ensaios de impacto. Foi verificado um importante decréscimo na energia absorvida pelo material com a diminuição da temperatura.

TEMPERATURA (ºC)	-40	-20	0	25
AMOSTRA 1(J)	40	72	64	64
AMOSTRA 2(J)	48	76	64	68
AMOSTRA 3(J)	48	68	76	70
MÉDIA (J)	45,3	72,0	68,0	67,3
DESVIO PADRÃO	4,6	4,0	6,9	3,1

Tabela 6: Valores encontrados para energia absorvida de ruptura do Ensaio Charpy-U

Fonte: O Autor

O Gráfico da Figura 28 estabelece um patamar constante para a temperatura de até -20°C, que se mostraram com energia absorvida equivalente, dado o desvio padrão para 3 amostras ensaiadas.

 Energia Absorvida(J) 80 75 70 Energia Absorvida(J) 65 60 55 50 45 40 -40 -30 -20 -10 Ó 10 20 30 -50 Temperatura(:C)

Figura 28: Gráfico de Energia Absorvida x Temperatura obtido com o ensaio Charpy-U

Fonte: O Autor

#### 4.7 TEMPERATURA CRÍTICA

Considerando-se abordagem citada como energia absorvida а (GARCIA,2012) considera-se que houve uma redução na Energia de 67,3 J na temperatura ambiente para 45,3 J na temperatura de -40 °C. Embora não seja estabelecida uma temperatura crítica referenciando a energia absorvida, a queda de 32,6% foi considerável e configura um comportamento de início de caracterização de fratura frágil. Utilizando o parâmetro previsto por Callister, 2005 e também proposto pelo U.S National Bureau of Standards, em que a temperatura de transição é aquela na qual o material absorve 20 J, considera-se que no ensaio, em temperaturas de até -40 °C o material não atingiu o patamar de fragilidade.

Já em associação das considerações de Garcia, 2012, pode-se inferir que a contração da amostra, juntamente com a aparência de fratura, pode estabelecer parâmetros comparativos em relação ao tipo de fratura.

#### 4.8 TIPO DE FRATURA

Para determinação da porcentagem de fratura frágil foi observada análise de medida direta em função do aspecto da superfície de fratura, por comparação da superfície fraturada com resultados de outros ensaios, através de fotografias da superfície e interpretação adequada (GARCIA, 2012). A comparação com padrão estabelecido e as observações de textura de fratura dúctil ou frágil.



Figura 29: Imagem com amostras fraturadas, sendo (a)25°C,(b)0°C,(c)-20°C e (d)-40°C

Fonte: O Autor

Foi observado o aumento da superfície de fratura frágil conforme o decréscimo de temperatura, onde a Figura 23a apresenta uma maior superfície de fratura frágil e a Figura 23d a menor superfície de fratura frágil, de acordo com a tabela A.

Na terceira metodologia proposta por Hertzberg e também citada por Davim & Magalhaes, que estabelece a temperatura crítica como sendo aquela na qual se obtém 50% de fratura fibrosa, pode se considerar que, em comparação da Figura 23 com a Figura 11, configura-se uma aproximação considerável para o nível de 50%, o que configura uma fratura frágil.

### 5. CONCLUSÕES

- O comportamento do material nos ensaios estabelece condições de redução de energia absorvida e de superfície de fratura modificada para as temperaturas submetidas. Devido à ausência de critério único estabelecido para determinação de temperatura crítica de fragilização, considera-se que em uma situação conservadora, considerando a energia absorvida, o material não se comporta de uma maneira frágil para a temperatura de -40°C. Por outro lado, em uma avaliação menos conservadora, e no ponto de vista de outros autores, a amostra em comparação com os padrões visuais de comparação, configura uma fragilidade de 50% da superfície de fratura, estabelecendo, segundo essa abordagem, um comportamento frágil.
- A utilização prática do parafuso está limitada ao uso do meio aéreo em até -40°C – Temperatura que pode apresentar-se em uma situação extrema na Estação Comandante Ferraz -, o que corrobora um comportamento de tendência de fragilização, configurando a partir desse limítrofe, uma tendência de comportamento frágil segundo a abordagem comparativa de imagem da superfície de fratura. Outra situação de importância a ser considerada na utilização prática, trata-se da diminuição da temperatura da faixa de -2°C a cada 1000ft.
- De acordo com a avaliação da totalidade das amostras, estimula-se a verificação de trincas e possíveis concentradores de tensão nas amostras dos parafusos e verificação periódica com a finalidade de diminuir a probabilidade de utilização de parafusos com riscos ou desgastes superficiais concentradores de tensão.

# 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estabelecer relação entre esforços de utilização e possíveis fatores de impacto mecânico na utilização do componente
- Estudo de material com custo equivalente e propriedades mecânicas que estabeleçam melhor relação de desgaste, corrosão e resistência mecânica, possivelmente sem o fator de fragilização.
- Avaliação da tenacidade do componente para caracterização da resistência à tração do componente, comparando com o esforço exigido na utilização.

# 7. REFERÊNCIAS

# 7.1 REFERÊNCIAS POR EXTRATO:



# 7.2 REFERÊNCIAS POR DATA:



### 7.3 REFERÊNCIAS POR QUALIS:



ALVES JUNIOR, C. Nitretação a plasma: Fundamentos e aplicações, UFRN, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E23:Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. 2007.

BENAC, D.J., Failure Analysis and Life Assessment of Structural Components,"Failure Analysis and Prevention, vol. 11. ASM Handbook, (ASM International, Materials Park, 2002)

BENAC, D.J., Cherolis, N. & WOOD, D. Managing Cold Temperature and Brittle Fracture Hazards in Pressure Vessels. J Fail. Anal. and Preven. 16 55–66 (2016)

BHADESIA, HK, D H; HONEYCOMBE, RW.K. Steels microstructure and Properties Third Edition, ELSEVIER,2006

BRAMFITT B.L. and S.J. LAWRENCE, Metallography and Microstructures of Carbon and Low-Alloy Steels, Metallography and Microstructures, Vol 9, ASM Handbook, ASM International, 2004, p. 608–626

CALLISTER, William D. Fundamentals of materials science and engineering: an introduction. 2nd. ed. New Jersey: John Wiley, 2005.

CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA – CIMM. Temperatura de transição. Disponível em <a href="http://www.cimm.com.br/portal/material\_didatico">http://www.cimm.com.br/portal/material\_didatico</a>. Acesso em 02 Jul, 2020.

CHIAVERINI, V., Aços e Ferros Fundidos, Editora ABM, 2004

COLPAERT, H. – Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns, 4 ed., Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 2008.

COSTA, W. M., Análise da tenacidade de uma junta soldade de um aço resistente à abrasão da série 450HB, Dissertação de Mestrado, UFRGS, 2014.

DAVIM, J. Paulo; MAGALHÃES, A. G. Ensaios mecânicos e tecnológicos: inclui exercícios resolvidos e propostos. 2. ed. Porto, Portugal: Publindústria, 2004.

FREITAS, Amilton Joaquim, Comportamento de desgaste de pares metalcompósito de grau aeronáutico, Dissertação, USP, 2009.

GARCIA A.; SPIM J. A.; SANTOS C. A. Ensaio dos Materiais. v.2. Rio de Janeiro : LTC, 2012.

GORYNIN, I. V., & MALYSHEVSKIY, V. A. Creating and introducing of new materials (in Russian). Morskoy Vestnik, 3(6), 74–77. (2007).

GOUVEIA, K. C., Investigação dos métodos de determinação da temperatura de transição dúctil-frágil utilizando ensaio de impacto charpy, Dissertação de Mestrado, FEI, 2013.

HAN, L.; DAI, J. T.; HUANG, X. R.; ZHAO, C. Study on the fast nitriding process of active screen plasma nitriding. Physics Procedia, 2013; 50: 94–102.

HAZAN, E.; SADIA, Y.; GELBSTEIN, Y. Characterization of AISI 4340 corrosion products using Raman Spectroscopy. Corrosion Science, v. 74, p. 414–418, 2013.

HERTZBERG, Richard W. Deformation and fracture mechanics of engineering materials. 4th ed. New York ; Chichester: John Wiley, 1996.

KRAUSS, G. Steeks: heat treatment and processing principles. Ohio: ASM International, 1994.

PEREZ IPIÑA, J. E. Transición Dúctil-Frágil de Aceros Ferríticos. Algunos Aspectos Todavía Abiertos. Revista Asociación Argentina de Materiales - SAM, v. 3, 2007.

SOUZA, Sérgio Augusto de. Ensaios de materiais metálicos: fundamentos teóricos e práticos, Ed. Edgard Blucher, 1982

TÓTH, L.; ROSSMANITH, H. P.; SIEWERT, T. A.; Historical background and development of the charpy test. Elsevier Science Ltda. and ESIS, 2002.

TROTTA, B. P. Barreiras de Difusão para o Hidrogênio em Aço API 5L X-65 Criadas por Nitretação lônica por Plasma Pulsado, Tese de Mestrado, Coppe -Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

YI, J.; GHARGHOURI, M.; BOCHERC, P.; MEDRAJ, M. Distortion and residual stress measurements of induction hardened AISI 4340 discs. Materials Chemistry and Physics, v. 142, p. 248-258, 2013.