

Avaliação da tenacidade de aço de ultra-alta dureza para aplicação balística por ensaio de impacto

Charles Hudson Martins de Vasconcelos^{1,3}, charles.vasconcellos@ime.eb.br, Orcid 0000-0002-3472-2998

Cristhian Ricardo Loayza Loayza², crislo@ufpa.br, Orcid 0000-0002-0662-715X

Ademir Ângelo Castro Filho², engangelo80@gmail.com, Orcid 0000-0003-4713-0817

Eduardo de Magalhães Braga², edbraga@ufpa.br, Orcid 0000-0003-0739-7592

Andersan dos Santos Paula¹, andersan@ime.eb.br, Orcid 0000-0002-0904-4240

Ricardo Pondé Weber¹, rpweber@ime.eb.br, Orcid 0000-0002-7431-8316

¹Instituto Militar de Engenharia - IME, ²Universidade Federal do Pará - UFPA,

³Centro de Instrução Almirante Braz de Aguiar - CIABA

RESUMO: Os aços de nível de blindagem de ultra-alta dureza são comumente utilizados nos setores de veículos de patrulha, veículos de transporte de valores, viaturas blindadas de transporte de pessoas, proteção de edificações, entre outros. O objetivo deste trabalho se constituiu na avaliação da tenacidade de um material dessa classe, determinando a temperatura de transição dúctil-frágil (TTDF) utilizando algumas das suas definições. Realizou-se ensaios de impacto Charpy e a avaliação combinada das faces de fratura dos corpos de prova por macroscopia e microscopia. Os testes foram realizados em temperaturas que variaram de -60°C a temperatura ambiente com corpos de prova retirados longitudinalmente à direção de laminação. As análises micrográficas ostentaram que a determinação da TTDF por critério de absorção de energia é adequada e confiável. Os resultados logrados são que, com base em 12,92 J de energia absorvida, a temperatura é -27,73°C.

PALAVRAS-CHAVE: Tenacidade, temperatura de transição dúctil-frágil, ensaio de impacto, aço de ultra-alta dureza.

ABSTRACT: Ultra-high hardness armor level steels are commonly used in the sectors of patrol vehicles, valuables transport vehicles, armored personnel carriers, protection of buildings, among others. The objective of this work was to evaluate the tenacity of a material of this class by determining the ductile-brittle transition temperature (DBTT) using some of its definitions. Charpy impact tests and the combined evaluation of the fracture faces of the specimens by macroscopy and microscopy were carried out. The tests were carried out at temperatures ranging from -60°C to room temperature with specimens taken longitudinally in the rolling direction. Micrographic analyzes showed that the determination of DBTT by energy absorption criterion is adequate and reliable. The achieved results are that based on 12.92 J of absorbed energy the temperature is -27.73°C.

KEYWORDS: Toughness, ductile-brittle transition temperature, impact testing, ultrahigh hardness steel.

1. Introdução

Nas últimas décadas, os estudos envolvendo a área de blindagem sempre estiveram engajados em esforços para fornecer tecnologias de blindagem leve que possam derrotar projéteis (AP, *Armor-Piercing*). Para atender a esses requisitos, a disponibilidade de aços de blindagem temperados e revenidos foi elevada, e o mais importante: a especificação MIL-DTL-46100E foi atualizada para aços de alta dureza de blindagem (HHA, *High Hardness Armor*) [1]. Embora essa especificação metálica tenha atendido às aplicações pretendidas, esforços consideráveis têm sido feitos para desenvolver aços de ultra-alta dureza – temperados e revenidos (UHH-Q&T, *Ultra High Hard Armor - Quenched and Tempered*) com dureza de 600 HB ou superior [2].

Os vários tipos de aço oferecidos por cada fornecedor são geralmente diferenciados de acordo com um valor de dureza específico e crescente. O menor valor de dureza corresponde ao aço de blindagem homogênea laminada (RHA, *Rolled Homogeneous Armor* - 380-430 HBW), em seguida o aço de média dureza de blindagem (MHA, *Medium Hard Armor* - 420-480 HBW), o aço HHA (480-540 HBW), e o maior nível de dureza é atingido com o aço UHA ou o UHH-Q&T (570-640 HBW) [3].

Dando foco à interação projétil-alvo, pode-se determinar que os mecanismos de penetração são consequentes da propriedade que representa o grau de deformação que um material suporta até o momento de sua fratura. No material dúctil, ocorre fratura devido à onda de tensão inicial, fratura radial,

estilhaçamento, batoque, pétala frontal, pétala dorsal, fragmentação e alargamento dúctil de furo. Porém, quando se adota um material frágil, pode-se resumir todo estudo às características de fragmentação [4].

Esses fenômenos trazem à tona a necessidade de determinar uma temperatura limite, abaixo da qual o comportamento à fratura do material se altera de dúctil para frágil, de maneira a prever ocorrências de fratura frágil. Essa temperatura é denominada Temperatura de Transição Dúctil-Frágil (TTDF) dos materiais e o ensaio de impacto Charpy é considerado um dos que mais se adequa às necessidades para o estudo desse assunto [5-7].

Recolhendo os dados de absorção de energia, por meio do ensaio de impacto Charpy, de materiais metálicos como o aço UHH-Q&T, em diversas temperaturas, pode-se determinar a TTDF desse material. Usualmente, vê-se que ocorrem dois patamares de energia absorvida, chamados de patamar inferior e patamar superior, e uma região entre eles, denominada de zona de transição [8-12].

Sabe-se, portanto, que em temperaturas equivalentes ao patamar inferior de absorção de energia, o material apresentará fratura, sobretudo frágil com predominância do micromecanismo de fratura por clivagem, enquanto em temperaturas correspondentes ao patamar superior de absorção de energia, o material apresentará fratura de modo majoritário dúctil por coalescimento de microcavidades. Tarefa laboriosa, entretanto, é determinar a TTDF, que será uma temperatura de referência para a mudança de comportamento à fratura do material, de dúctil para frágil, com a redução da temperatura [10, 13-15].

A verificação de como a face de fratura se apresenta é uma das metodologias para designar a TTDF, variando de uma fratura de aspecto 100% brilhante para 100% opaco, sendo esta uma caracterização feita exclusivamente pela observação visual da face de fratura, tornando possível estabelecer uma temperatura a partir da qual a mudança no micromecanismo de fratura ocorre. Entretanto, seria necessário um critério adequado para definir a TTDF, pois somente pela avaliação desses corpos de prova fraturados uma determinação adequada seria difícil na prática exper-

imental. Para isso, pode-se utilizar a metodologia indicada na norma ASTM E23 [16], que é a norma de execução do ensaio de impacto.

No entanto, o método comparativo visual descrito na norma é impreciso, pois as fotografias a serem utilizadas para comparação com as faces de fratura dos corpos de prova ensaiados deixam a desejar no preceito qualidade, ocasionando uma comparação com alta probabilidade de imprecisão [17-20]. Dessa forma, a aplicação de outras metodologias para determinação da TTDF se faz importante. No método mais simples e preciso, a TTDF é determinada a partir da curva de energia absorvida em função da temperatura, e um critério possível nesse cenário é considerar que a TTDF é a temperatura na qual se atinge a média de energia entre os patamares superior e inferior da curva, ilustrada na Fig. 1 [21-23].

Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar a determinação da TTDF utilizando algumas das suas definições combinadas com macroscopia e microscopia da superfície de fratura e fatores metalúrgicos. Diferentes temperaturas de ensaio foram utilizadas, visando abranger desde as temperaturas para as quais se espera que o material de interesse apresente fratura 100% frágil até as temperaturas para as quais ocorra fratura 100% dúctil.

2. Material e métodos

2.1 Material

O material em estudo é o aço UHH classe de 1500 MPa de limite de escoamento, espessura 5 mm, temperado e revenido (QT, *Quenched and Tempered*), classificado como nível de blindagem. Esse material atende aos requisitos de tolerâncias de formato de acordo com a norma EN 10029 [24], de tolerâncias de planicidade de acordo com a norma EN 10029 Classe N - Tipo de aço L [24] e de propriedades de superfície conforme a EN 10163-2 Classe B Subclasse 3 [25].

A aplicabilidade desse material é como uma chapa de proteção adicional, ou em casos nos quais o peso é crítico, proporcionando proteção tanto contra penetração quanto contra explosões. Esse mesmo material é aplica-

do aos setores de veículos de patrulha, veículos de transporte de valores (CIT, *Cash in Transit Vehicle*), viaturas blindadas de transporte de pessoas (VBTP), proteção

de edificações, entre outros. A composição química e as propriedades mecânicas do material, especificadas em norma, são exibidas nas **Tabelas 1 e 2**, respectivamente.

Tab. 1 - Composição química principal do material (% massa).

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	B	S	P
0,47	0,70	1,00	3,00	1,50	0,70	0,0005	0,003	0,01

Fonte: [26].

Tab. 2 - Principais propriedades mecânicas do material.

Dureza HBW	Limite de Escoamento Rp _{0,2} mín. MPa	Limite de Resistência R _m mín. MPa	Alongamento %
570-640	1500	2000	7

Fonte: [26].

2.2 Preparação de amostras

As amostras de teste foram retiradas de uma chapa do aço UHH-Q&T de dimensões 500 x 500 x 5 mm por meio do processo de usinagem eletroerosão. As dimensões da amostra seguem a classificação *sub-size* da norma ASTM E23 [16], ou seja, 10 x 5 x 55 mm com um entalhe em V de 2 mm de profundidade na espessura de 5 mm, ângulo 45°, com um raio de ponta de 0,25 mm no centro da amostra e verificação do mesmo com projetor de perfil e microscópio óptico (MO).

2.3 Ensaio de impacto Charpy

Os ensaios de impacto Charpy foram realizados em um equipamento de ensaios de impacto marca Panambra, modelo PW30/15R, com martelo de 30 J, conforme a norma ASTM E23 [16], utilizando três corpos de prova para cada temperatura. Os ensaios iniciaram a temperatura ambiente (20,8°C) e foram estendidos para temperaturas menores: 0°C, -20°C, -40°C e -60°C. Para atingir essas temperaturas abaixo da temperatura ambiente, os corpos de prova foram inseridos no nitrogênio líquido, obtendo, assim, a energia absorvida em função da temperatura.

Para a avaliação dos dados obtidos por meio do ensaio Charpy, é elaborada uma curva de energia

absorvida em função da temperatura, porém para uma melhor clareza nas análises, essa curva obtida deve ser ajustada, e o método utilizado foi fundamentado no proposto por Ericksonkirk, Shaikh e Ericksonkirk [27]. Por esse método, os dados de energia absorvida em função das temperaturas utilizadas no ensaio foram ajustados pela formulação baseada em tangente hiperbólica, a qual cumpre a Eq. 1.

$$Y = A + B * \tanh \frac{T - D}{C} \quad (1)$$

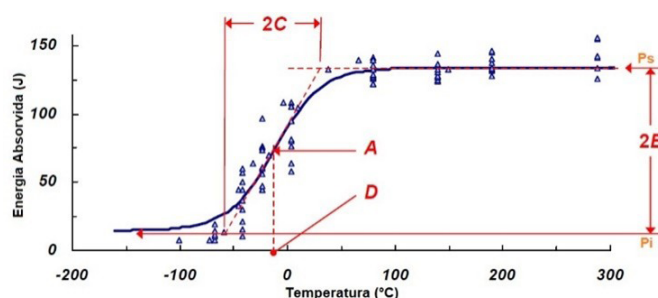
Na Eq. 1, Y é a variável a ser ajustada e T é a variável temperatura de teste. As variáveis de ajuste A, B, C e D são ilustradas na **Fig. 1** e são definidas deste modo: A: média das energias entre patamares superior e inferior; B: amplitude entre energias dos patamares superior e inferior; C: metade da faixa da temperatura de transição; e D: temperatura da média dos patamares inferior e superior.

O valor da TTDF foi estabelecido de acordo com as seguintes definições:

- TTDF_{EA}: Temperatura de Transição Dúctil-Frágil, na qual ocorre a média aritmética das energias absorvidas nos patamares superior e inferior.
- TTDF_{DN}: Temperatura de Transição Dúctil-Frágil, na qual ocorre transição de ductilidade nula, ou seja, fratura 100% frágil.

- $TTDF_{FN}$: Temperatura de Transição Dútil-Frágil, na qual ocorre transição de fragilidade nula, ou seja, fratura 100% dútil.

Fig. 1 - Ilustração das variáveis de ajuste da equação da tangente hiperbólica.



Fonte: [27].

2.4 Macroscopia versus microscopia da fratura

A análise da superfície da fratura foi realizada em corpos de prova fraturados em ensaios de impacto Charpy. As amostras foram previamente limpas em aparelho de ultrassom com uso de solução de acetona.

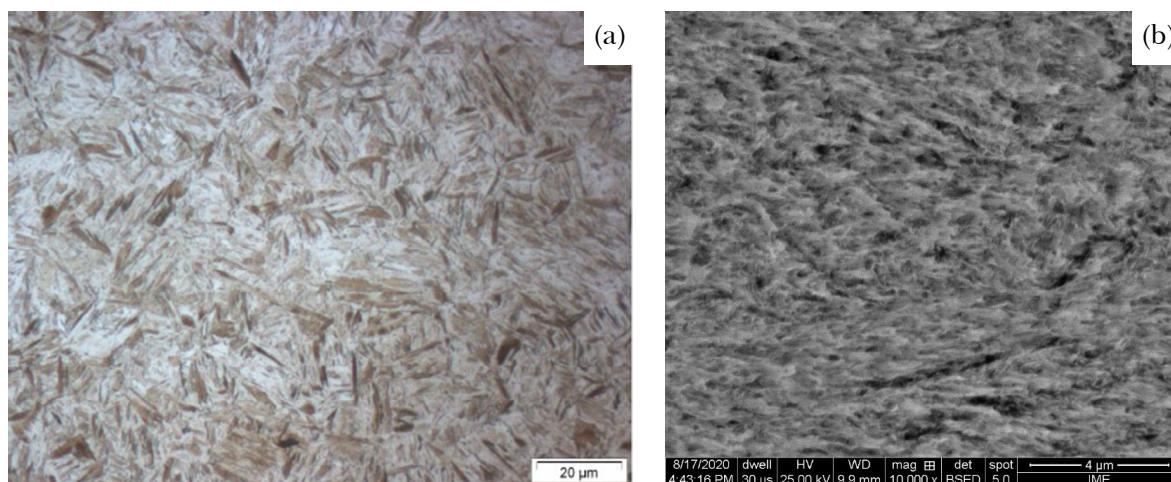
Para a geração de imagens, fez-se o uso de um Estereomicroscópio óptico ZEISS SteREO Discovery V12 e um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca FEI, modelo Quanta FEG 250, conforme a norma ASTM E2142 [28].

3. Resultados e discussão

O aspecto microestrutural do MB utilizando MO, presença de ripas colunares e blocos de ripas, após ataque com concentração de nital reativo 2%, pode ser observado na **Fig. 2(a)**, a qual certifica que consiste em aço martensítico temperado. Na **Fig. 2(b)**, é apresentada a imagem MEV, que indica que as ripas mostradas na imagem anterior são ripas de martensita em formato acicular.

Um dos principais propósitos consistiu em determinar se o material em estudo apresenta ou não uma transição dútil-frágil com o decréscimo da temperatura e, caso positivo, em que faixa de temperatura o fenômeno ocorre. A transição dútil-frágil é relacionada com a temperatura pela energia de impacto medida no ensaio.

Fig. 2 - Microestrutura do MB: (a) micrografia via MO; (b) micrografia via MEV.



Para alguns pesquisadores como Burdekin e Folch [29], a $TTDF$ é definida como a faixa de temperatura sobre a qual a mudança nos níveis de energia de baixo para alto ocorre. Porém, como na prática geralmente não ocorre uma variação brusca de energia, mas

ocorre uma zona de transição, torna-se difícil determinar com exatidão a $TTDF$. Assim, realizou-se uma série de ensaios a diferentes temperaturas combinados com análises macroscópicas, microscópicas e de composição química, o que permitiu a determinação

da TTDF, que é um parâmetro importante na seleção de um material do ponto de vista de tenacidade ou de tendência para a ocorrência de fratura frágil [29].

3.1 Energia absorvida

Na **Tabela 3**, encontram-se os valores obtidos nos ensaios Charpy fazendo uso dos corpos de prova confeccionados com o material em estudo. Convém mencionar que todos os corpos de prova separaram totalmente durante o ensaio.

Tab. 3 - Resultados do ensaio de impacto Charpy (valores em Joule).

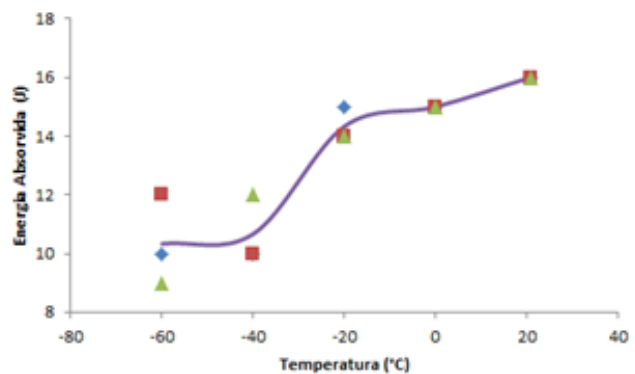
Temperatura (°C)	CP01	CP02	CP03	Média
20,8	16,0	16,0	16,0	16,0
0,0	15,0	15,0	15,0	15,0
-20,0	15,0	14,0	14,0	14,3
-40,0	10,0	10,0	12,0	10,7
-60,0	10,0	9,0	12,0	10,3

A **Fig. 3** mostra a curva da energia absorvida em função da temperatura do aço UHH-Q&T em estudo. O comportamento da curva obtida é característico de aços de alta resistência, uma variação relativamente reduzida da energia absorvida em um interstício da temperatura de -80 a 100°C [5]. É plausível a percepção na curva de que em temperaturas mais elevadas, a energia de impacto é maior e é compatível com um modo dúctil de fratura. À medida que a temperatura diminui, a energia de impacto reduz ao longo de um entreto de temperatura relativamente pequeno (cerca de 20°C), a partir do qual a energia de impacto apresenta um valor baixo e essencialmente constante; nesse intervalo, o modo de fratura é frágil.

O valor de energia absorvida é obtido pela leitura direta do valor na escala do equipamento de ensaio. Sendo plotados esses valores em função da temperatura utilizada no ensaio, é possível verificar a mudança de comportamento do material de acordo com a mudança na temperatura. As regiões dos patamares

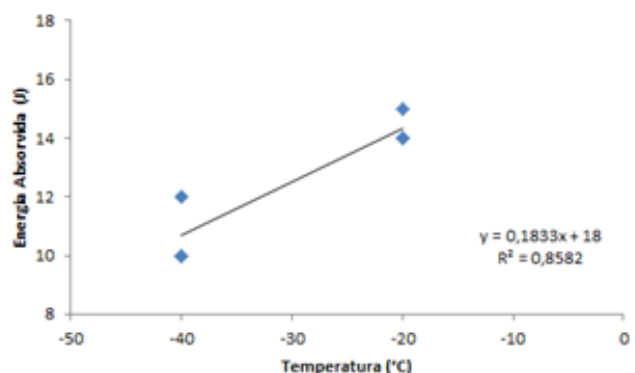
foram identificadas por exame visual dos pontos plotados no gráfico. Assim, foi constatado que o patamar inferior advém à temperatura de -60°C, enquanto o superior no intervalo de 0°C a 20,8°C.

Fig. 3 - Curva da energia absorvida em função da temperatura no ensaio de impacto Charpy.



Após a definição dos patamares de energia, procedeu-se ao ajuste por regressão linear da região de transição (-40 a -20°C). Os resultados estão apresentados na **Fig. 4**. Em seguida, o ajuste pela tangente hiperbólica foi realizado por meio da aplicação do programa MS – Excel Função Solver. Na **Fig. 5**, são apresentados os resultados obtidos: a forma gráfica; a equação da hipérbole ajustada; e o valor do coeficiente de correlação (R^2) referente ao ajuste dos pontos experimentais com a curva da tangente hiperbólica.

Fig. 4 - Regressão linear da região de transição.



Com a elaboração dos gráficos apresentados, foi possível determinar os seguintes parâmetros, os quais estão ilustrados na **Fig. 6**: temperaturas $TTDF_{EA}$, $TTDF_{DN}$ e $TTDF_{FN}$; e energia do parâmetro superior

(EPS) e do parâmetro inferior (EPI). Na **Tabela 4**, encontram-se os valores desses parâmetros e das temperaturas do parâmetro superior (TPS) e do parâmetro inferior (TPI) por critério de energia absorvida.

Fig. 5 - Curva da energia absorvida em função da temperatura ajustada pelo método da tangente hiperbólica.

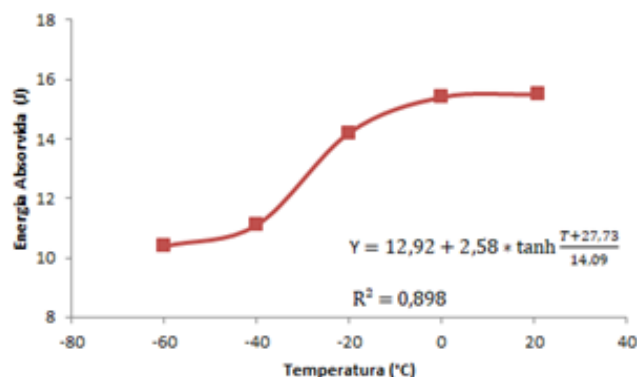
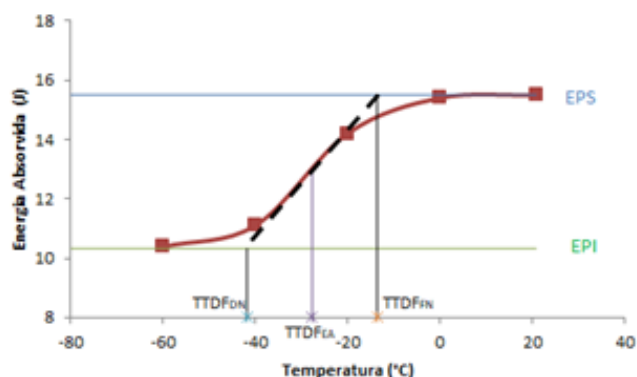


Fig. 6 - Parâmetros $TTDF_{EA}$, $TTDF_{DN}$, $TTDF_{FN}$, EPS e EPI.



Tab. 4 - Resultados obtidos por critério de energia absorvida com a utilização do método da tangente hiperbólica.

Parâmetro	Valor
$TTDF_{EA}$ (°C)	-27,73
$TTDF_{DN}$ (°C)	-41,83
$TTDF_{FN}$ (°C)	-13,64
EPS (J)	15,50

Parâmetro	Valor
TPS (°C)	-13,64
EPI (J)	10,33
TPI (°C)	-41,83

3.2 Análise macroscópica e microscópica

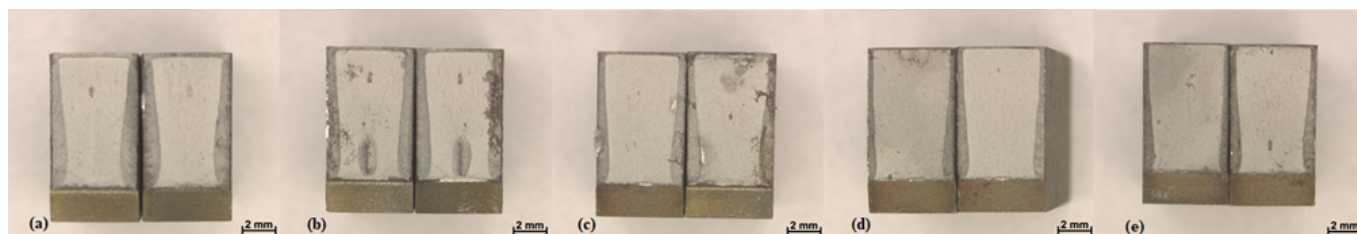
As macrografias das superfícies de fratura dos corpos de prova estão apresentadas na **Fig. 7**. É perceptível visualmente que, embora haja probabilidade da ocorrência de discrepância, conforme a temperatura de ensaio reduz, ocorre o decréscimo de fratura por cisalhamento, ou seja, o percentual de área de fratura dúctil reduz, dando lugar à fratura frágil. Já no que se refere ao tópico expansões laterais, não foi evidenciada a ocorrência, mesmo nos corpos de prova a 0°C e temperatura ambiente, classificados a princípio como principalmente dúcteis.

É possível realizar a classificação e quantificação dessas fraturas por meio de análises qualitativa e quantitativa da porcentagem de fratura dúctil, respectivamente, utilizando como referência a norma ASTM E23 [16]. Entretanto, verifica-se em outros estudos [30-31] que os valores obtidos, quando se adota cada uma das diferentes definições para determinação da TTDF, são diferentes entre si. Como efeito, mensurando os valores de TTDF fundamentado nos critérios de

porcentagem de fratura dúctil qualitativo e quantitativo, apesar de também serem resultados da avaliação das faces de fratura dos corpos de prova, certamente são suscetíveis à incredulidade.

Na **Tabela 5**, são exibidas as porcentagens obtidas por ambos os critérios (qualitativo e quantitativo) e são confirmadas as significativas dissimilaridades entre eles. Bem como, quando os valores de percentual de fratura dúctil das superfícies são confrontados com os valores obtidos pelo fundamento da energia absorvida, observa-se incompatibilidade, apesar de serem alcançados por critérios diferentes. A partir da avaliação das faces de fratura, fica evidente que apenas com a visualização destas há riscos de disparidade entre os resultados, uma vez que a aparência das faces de fratura de materiais distintos pode ser semelhante.

Fig. 7 - Macroscopia da face de fratura dos corpos de prova ensaiados ao impacto Charpy às temperaturas: (a) ambiente; (b) 0°C; (c) -20°C; (d) -40°C; (e) -60°C (aumento 5X).



Tab. 5 - Porcentagem de fratura dúctil utilizando como referência a norma ASTM E23.

Temperatura (°C)	% Qualitativo	% Quantitativo
Ambiente	50,00	34,73
0,0	50,00	32,21
-20,0	40,00	26,28
-40,0	40,00	25,29
-60,0	20,00	9,68

Portanto, para um estudo rebuscado do micromecanismo de fratura obtendo maior confiabilidade, foram realizadas análises microscópicas das faces de fratura via MEV. Essa verificação teve por objetivo confirmar o micromecanismo de fratura observado pelo meio de macroscopia nas faces de fratura dos corpos de prova ensaiados ao impacto Charpy nas diferentes temperaturas.

As micrografias via MEV da superfície de fratura dos corpos de prova após os ensaios, executados a temperatura ambiente, -20°C e -60°C, são exibidas da **Fig. 8** a **Fig. 10** respectivamente. As figuras consistiram na exposição das superfícies subdivididas em três regiões dos corpos de prova (superior, central e inferior), ressaltando que na coluna esquerda o aumento é de 30X ou 50X e na coluna direita o aumento é de 1000X ou 2000X.

É perceptível na **Fig. 8** que a superfície contém aspecto típico de uma fratura predominantemente dúctil, a rugosidade. Outro fator característico de uma fratura dúctil suprema, as microcavidades (*dimples*), também são salientadas na superfície. Esses micromecanismos são respaldados na curva da energia absorvida em função da temperatura ajustada

pelo método da tangente hiperbólica, pois pela tal apresentaria uma fratura principalmente dúctil.

Os corpos de prova ensaiados a -20°C são os de temperatura mais próxima da $TTDF_{EA}$ e cujas faces de fratura obtidas foram consideradas mistas (como apresentando fraturas frágil e dúctil), o que condiz com o comportamento que se espera do material na temperatura de transição. Conforme apresentado na **Fig. 9**, que mostra em detalhe cada porção distinta da face de fratura, ou seja, onde se considerou que há tanto fratura por clivagem quanto fratura por cisalhamento.

Na **Fig. 10**, são apresentadas micrografias da superfície de fratura dos corpos de prova após o ensaio a -60°C. As características da superfície mostram uma fratura predominante consequente do micromecanismo de clivagem, o que condiz com a região dessa temperatura na curva da energia absorvida em função da temperatura ajustada pelo método da tangente hiperbólica.

3.3 Efeito da composição química

Efetuada uma análise comparativa entre o material em estudo e outro tipo de aço temperado revenido, o aço AISI 4340 perscrutado em outro trabalho [32], obteve-se a corroboração do prescrito no efeito da composição química para a curva de energia de fratura por impacto. Em demais estudos, esse efeito também é consistente com o comportamento de outros aços [33]. A $TTDF$ do aço AISI 4340 ocorreu em 0°C determinada a 21,0 J. O teor de Mn, C, P e S do mesmo em % peso é 0,72, 0,42, 0,015 e 0,008, respectivamente [32]. Do modo que é apresentado na **Tabela 1**, o UHH-Q&T possui maior teor de Mn, induzindo a elevação da energia absorvida, no entanto

o maior teor de C alicia com maior vigor ao invés. Portanto, devido em parte a essa relação, a energia absorvida do material em estudo é menor (12,92 J).

3.4 Correlação entre impacto Charpy e tenacidade à fratura

Tanto o ensaio Charpy quanto o ensaio de queda de peso Pellini ainda são amplamente aplicados em materiais estruturais. A ASTM padronizou ambos os ensaios, bem como uma série de abordagens relacionadas [16, 34-35]. Embora esses ensaios não tenham o rigor matemático e as capacidades preditivas dos métodos de mecânica da fratura, essas abordagens fornecem uma excelente indicação qualitativa da tenacidade do material. A vantagem desses métodos qualitativos é que são de menor custo e maior facilidade de execução do que os ensaios de mecânica da fratura [16, 34].

Fig. 8 - Imagens via MEV de detalhes da face de fratura do corpo de prova ensaiado ao impacto Charpy à temperatura ambiente.

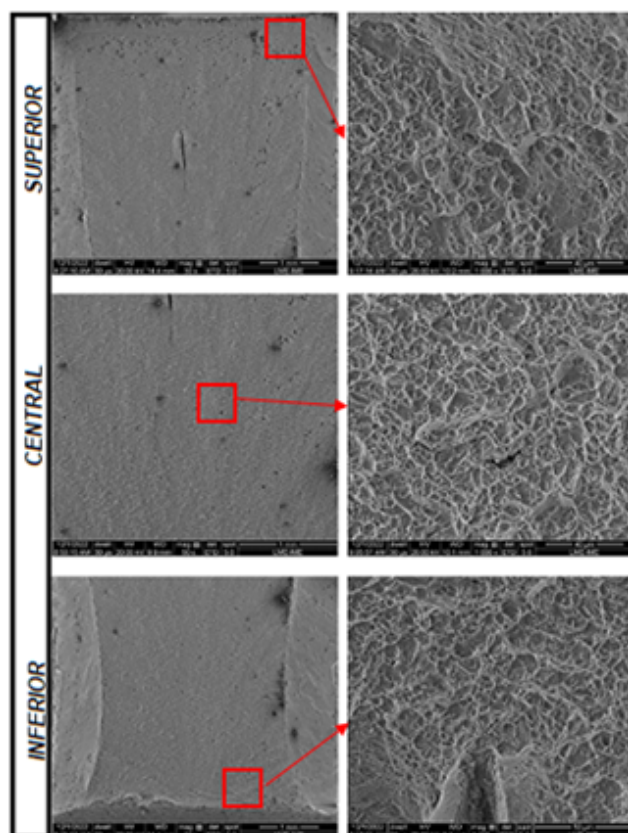
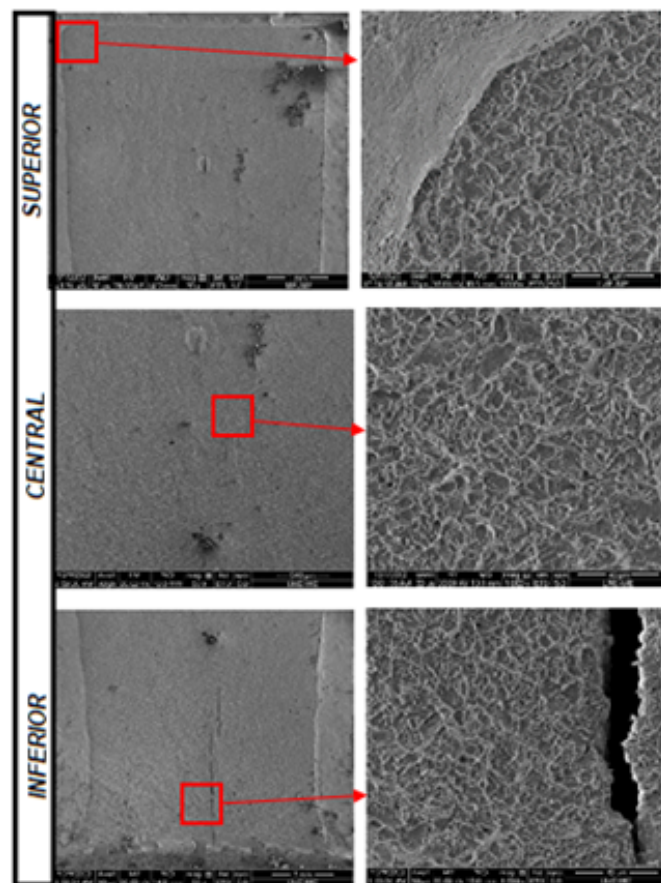


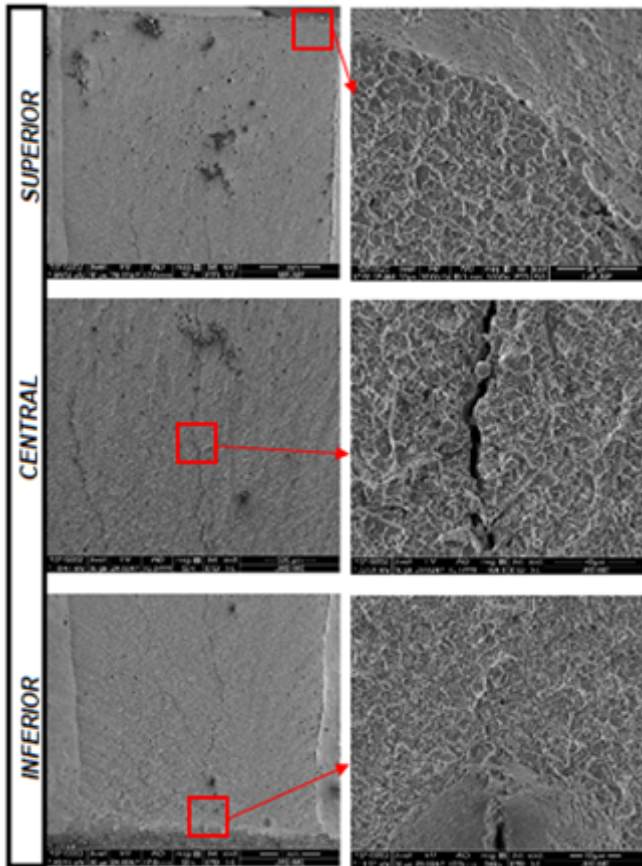
Fig. 9 - Imagens via MEV de detalhes da face de fratura do corpo de prova ensaiado ao impacto Charpy à -20°C.



Alguns pesquisadores [36-38] correlacionaram a energia absorvida obtida no ensaio Charpy com parâmetros de tenacidade à fratura, como K_{Ic} . Algumas dessas correlações empíricas funcionam razoavelmente bem, ademais a indústria de construção naval utiliza o ensaio de queda de peso Pellini para qualificar aços para cascos de navios. No entanto, existem diferenças importantes entre esses ensaios e os ensaios de mecânica da fratura que impedem relações simples entre as medidas qualitativas e quantitativas de tenacidade.

Entre essas diferenças, pode-se mencionar que os corpos de prova dos ensaios Charpy e de queda de peso possuem entalhe inicial, enquanto os da mecânica de fratura apresentam trincas acentuadas por fadiga [16, 34].

Fig. 10 - Imagens via MEV de detalhes da face de fratura do corpo de prova ensaiado ao impacto Charpy à -60°C .



Na ocasião em que o material disponível não permite a confecção dos corpos de prova de impacto Charpy na medida padrão ($10 \times 10 \times 55 \text{ mm}$), menores podem ser usados, como foi nesse estudo, mas os resultados obtidos em diferentes dimensões de corpos de prova não podem ser comparados diretamente. Quando forem necessários ou especificados corpos de prova Charpy com dimensões menores do que o padrão, ou seja, *sub-size*, eles poderão ser selecionados conforme o anexo A3-Additional Impact Test Specimen Configurations da norma ASTM E23 [16].

A variação, aumento ou redução da espessura e/ou largura do corpo de prova tende a modalizar o volume do metal sujeito à distorção e, por esse fator, propende também variar a energia absorvida.

Contudo, qualquer aumento de dimensão, particularmente na espessura, também tende a aumentar

o grau de restrição e, ao tender a induzir fratura frágil, pode diminuir a energia absorvida [16].

Uma correlação geral entre os valores de energia absorvida obtidos com corpos de prova de diferentes tamanhos ou formatos não é viável, mas correlações limitadas podem ser estabelecidas para fins de especificação com base em estudos especiais de materiais e corpos de prova específicos [16].

4. Conclusões

A partir da metodologia utilizada no ensaio de impacto Charpy combinada com a análise fractográfica, conseguiu-se obter um melhor entendimento no que diz respeito a ensaios de impacto e análise do comportamento do material, sendo possível, assim, verificar a energia absorvida em função da temperatura para os corpos de prova ensaiados em diferentes temperaturas. Pode-se afirmar que é o método mais adequado para determinar a TTDF de um aço UHH-Q&T.

Com a realização dos ensaios, averiguou-se que é possível obter propriedades mecânicas quanto à tenacidade de um material por meio de impacto. Por meio desse desenvolvimento, percebeu-se que a temperatura influencia na tenacidade do material, obtendo-se, para o corpo de prova ensaiado, uma estrutura predominante frágil em baixas temperaturas e uma estrutura dominante dúctil em temperatura ambiente, certificadas pela micrografia. Dessa maneira, pode-se determinar o material correto a ser empregado em diversas temperaturas.

Pela avaliação das faces de fratura dos corpos de prova por MEV, foi possível visualizar que nos corpos de prova ensaiados na zona de transição há regiões onde, por avaliação visual, considerou-se que havia fratura por clivagem, mas nestas também há regiões com alvéolos resultantes de deformação plástica do material, típicos de fratura dúctil. Sendo assim, os critérios qualitativo e quantitativo são duvidosos.

Os resultados mostram que a TTDF com base em $12,92 \text{ J}$ de energia absorvida é $-27,73^{\circ}\text{C}$. Além disso, a temperatura na qual ocorreu transição de ductilidade nula é $-41,83^{\circ}\text{C}$ e a transição de fragilidade nula advém na temperatura de $-13,64^{\circ}\text{C}$.

Agradecimentos

Os autores agradecem a SSAB Special Steels por fornecer o material de base, os Laboratórios de Ensaios Mecânicos e de Microscopia Eletrônica de Varredura

da Seção de Engenharia de Materiais do Instituto Militar de Engenharia (IME) e o Laboratório de Caracterização de Materiais (LACAM) da Universidade Federal do Pará (UFPA) por fornecerem instalações de testes e de caracterização microestrutural para este trabalho.

Referências

- [1] U.S. **Military Specification, MIL-DTL-46100E (MR). Armor Plate, Steel, Wrought, High-Hardness.** U.S. Army Research Laboratory, APG, MD, 9 July 2008.
- [2] RAPACKI, E.; FRANK, K.; LEAVY, B.; KEELE, M.; PRIFTI, J. **Armor steel hardness influence on kinetic energy penetration proceedings.** In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON BALLISTICS, 15., Jerusalem, 1995.
- [3] SSAB. **Armor: The steel you want between you and risk.** Sweden: SSAB, 2017.
- [4] BACKMAN, M. E.; GOLDSMITH, W. The mechanics of penetration of projectiles into targets. **International Journal of Engineering Science**, [s. l.], v. 16, p. 1-99, 1978.
- [5] PEREIRA, L. C.; BLAS, J. C. G.; GRIZA, S.; DARWISH, F. A. I. Use of instrumented Charpy testing on the fracture toughness characterization of metallic materials. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, [s. l.], v. 18, p. 1-11, 2021.
- [6] TANAKA, M.; UMEKAWA, S. On the breaking behaviour in Charpy impact bending tests. In: JAPAN CONGRESS FOR TESTING MATERIALS, 1., Kyoto, 1958.
- [7] ONO, S. Micro-time structure of impact fracture concerning Charpy test. In: JAPAN CONGRESS FOR TESTING MATERIALS, 1., Kyoto, 1958.
- [8] TAGAWA, T.; KAYAMORI, Y.; HIRA, H. Statistical scatter of fracture toughness in the ductile-brittle transition of a structural steel. **Eng. Fract. Mech.**, v. 77, n. 16, p. 3077-3086, 2010.
- [9] CHEN, S. L.; HU, J.; ZHANG, X. D. et al. High ductility and toughness of a micro-duplex medium-Mn steel in a large temperature range from -196°C to 200°C. **Journal of Iron and Steel Research International**, [s. l.], v. 22, p. 1126-1130, 2015.
- [10] GOPALAN, A.; SAMAL, M. K.; CHAKRAVARTTY, J. K. Fracture toughness evaluation of 20MnMoNi55 pressure vessel steel in the ductile to brittle transition regime: Experiment & numerical simulations. **J. Nucl. Mater.**, [s. l.], v. 465, p. 424-432, 2015.
- [11] CHAO, Y. J.; WARD, J. D.; SANDS, R. G. Charpy impact energy, fracture toughness and ductile-brittle transition temperature of dual-phase 590 steel. **Mater. Design**, [s. l.], v. 28, p. 551-557, 2007.
- [12] TANGUY, B.; BESSON, J.; PIQUES, R.; PINEAU, A. Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test: Part I: Experimental results. **Eng. Fract. Mech.**, [s. l.], v. 72, p. 49-72, 2005.
- [13] HAUSILD, P.; NEDBAL, I.; BERDIN, C.; PRIOUL, C. The influence of ductile tearing on fracture energy in the ductile-to-brittle transition temperature range. **Materials Science and Engineering: A**, [s. l.], v. 335, p. 164-174, 2002.
- [14] ROSENFELD, A. R.; SHETTY, D. K.; SKIDMORE, A. J. Fractographic observations of cleavage initiation in the ductile-brittle transition region of a reactor-pressure-vessel steel. **Metallurgical Transactions A**, v. 14, p. 1934-1937, 1983.
- [15] TAKASHIMA, Y.; MINAMI, F. Prediction of Charpy absorbed energy of steel for welded structure in ductile-to-brittle fracture transition temperature range. **Quarterly Journal of the Japan Welding Society**, v. 38, p. 103-107, 2020.
- [16] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23: Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials.** U.S.: American Society for Testing and Materials, 2018.
- [17] ZHANG, X.; QU, Y.; LI, R. Low temperature impact toughness and fracture analysis of EN-GJS-400-18-LT ductile iron under instrumented impact load. **Journal of Iron and Steel Research International**, [s. l.], v. 22, p. 864-869, 2015.
- [18] SAMAL, M. K.; CHAKRAVARTTY, J. K.; SEIDENFUSS, M.; ROOS, E. Evaluation of fracture toughness and its scatter in the DBTT region of different types of pressure vessel steels. **Engineering Failure Analysis**, v. 18, p. 172-185, 2011.
- [19] DIETER, G. E. **Mechanical Metallurgy.** 2. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1981.

- [20] LEACH, P. W.; WOODWARD, R. L. The influence of microstructural anisotropy on the mode of plate failure during projectile impact. **J. Mat. Sci.**, [s. l.], v. 20, p. 854-858, 1985.
- [21] MANGANELLO, S. J.; ABBOTT, K. H. Metallurgical factors affecting the ballistic behaviour of steel targets. **J. Mat.**, [s. l.], v. 7, p. 231-239, 1972.
- [22] SHOWALTER, D. D. et al. STANDARD, Australian Defence. DEF (AUST) 8030. Rolled Armour Plate, Steel (3-35 mm). **Army Research Laboratory**, Adelphi, 2005.
- [23] HERZIG, N ; MEYER, L. W.; PURSCHE, F., HUSING, K. Relation between dynamic strength and toughness properties and the behavior under blast conditions of high strength steels. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON IMPACT ENGINEERING, 7., 2010. **Anais [...]**. Warsaw: MABS, 2010. p. 278-284.
- [24] BRITISH STANDARD. BS EN 10029: Hot-rolled steel plates 3 mm thick or above – tolerances on dimensions and shape. UK: British Standard, 2010.
- [25] BRITISH STANDARD. **BS EN 10163-2**: Delivery requirements for surface condition of hot-rolled steel plates, wide flats and sections — Part 2: Plate and wide flats. UK: British Standard, 2004.
- [26] SSAB. **General product information strenx, hardox, armox and toolbox – UK**. [s. l.]: SSAB, 2018.
- [27] ERICKSONKIRK, M.; SHAIKH, A.; ERICKSONKIRK, M. Insights and observations arising from curve-fitting the Charpy V-notch and tensile data contained within the United States' light water reactor surveillance database. ASME 2008 PRESSURE VESSELS AND PIPING CONFERENCE. 2008. Chicago, 2008. p. 389-396.
- [28] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E2142**: Standard test methods for rating and classifying inclusions in steel using the scanning electron microscope. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2015.
- [29] FOLCH, L.; BURDEKIN, F. M. Application of coupled brittle-ductile model to study correlation between Charpy energy and fracture toughness values. **Eng. Fract. Mech.**, [s. l.], v. 63, p. 57-80, 1999.
- [30] ZHAO, Y. J.; SU, Y. M.; LIU, M.; HU, Z. L.; TANG, P. Ductile-to-brittle transition and impact fracture behavior of 3Mn–Si–Ni low carbon martensitic steel. **Strength of Materials**, [s. l.], v. 51, p. 291-299, 2019.
- [31] TAKASHIMA, Y.; ITO, Y.; LU, F.; MINAMI, F. Fracture toughness evaluation for dissimilar steel joints by Charpy impact test. **Welding in the World**, [s. l.], v. 63, p. 1243-1254, 2019.
- [32] DUARTE, A. S. **Metodologia básica para a produção de materiais de referência para a calibração indireta de máquinas pendulares de impacto Charpy**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.
- [33] ROE, G. J.; BRAMFITT, B. L. **Notch toughness of steels. ASM International, Metals Handbook**. Materials Park: ASM Handbook, 1990.
- [34] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E208**: Standard test method for conducting drop-weight test to determine nil-ductility transition temperature of ferritic steels. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2020.
- [35] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E436-03**: Standard test method for drop-weight tear tests of ferritic steels. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2021.
- [36] TEERI, T.; KUOKKALA, V.-T.; SIITONEN, P.; KIVIKYTÖ-REPONEN, P.; LIIMATAINEN, J. Impact wear in mineral crushing. **Proceedings of the Estonian Academy of Sciences Engineering**, [s. l.], v. 12, p. 408-418, 2006.
- [37] ZAMBRANO, O. A. A review on the effect of impact toughness and fracture toughness on impact-abrasion wear. **Journal of Materials Engineering and Performance**, Materials Park, v. 30, p. 7101-7116, 2021.
- [38] WALLIN, K. A simple theoretical Charpy-V-K correlation for irradiation embrittlement. In: MARRIOT, D. L.; MAGER, T. R.; BAMFORD, W. H. (Eds.). **Innovative Approaches to Irradiation Damage and Fracture Analysis**. v. 170. New York: ASME – American Society of Mechanical Engineers, 1989. p. 93-100.