

RELAÇÃO ENTRE A TENACIDADE A FRATURA K_{IC} E A ENERGIA DE IMPACTO DE UM ENSAIO SIMULADO PARA O AÇO AISI 4340 NORMALIZADO

Fabício Martins Gonçalves ¹
Silvio Vinícius Araújo Mendonça ²
Hélio de Souza Queiroz ³

Resumo

Na realização de projetos de estruturas e componentes mecânicos é fundamental a identificação das propriedades mecânicas dos materiais. Diversas metodologias e técnicas podem ser utilizadas em aplicações da mecânica dos sólidos, destacando a mecânica da fratura que fornece parâmetros para caracterização de um material através da tenacidade à fratura e do fator de intensidade de tensão que se desenvolvem na região de trincas e defeitos. Estas técnicas são influenciadas pelo tipo de carregamento, estático ou dinâmico. Algumas destas propriedades mecânicas são de difíceis obtenções, demandando equipamentos de ensaios dinâmicos complexos e um significativo custo operacional devido ao tempo de realização. Este trabalho tem como objetivo estudar a relação entre a tenacidade à fratura, denominada de fator K_{IC} e a energia de impacto, denominada CVN, no aço liga AISI 4340 normalizado. Este material foi escolhido por sua relevância em diversos projetos e aplicações, e por ser considerado uma referência entre os aços classificados como aços de ultra alta resistência. A metodologia aplicada utiliza simulação numérica pelo método de elementos finitos para a realização de um ensaio de impacto em um corpo de prova Charpy V-notched, modelado segundo a norma ASTM E23. Foram obtidos valores para CVN a partir desta simulação, afim de se comparar com valores disponíveis na literatura. Para correlacionar os valores de energia de impacto com os valores de K_{IC} foram consideradas equações desenvolvidas em alguns estudos afim de se averiguar sua precisão e relevância. Os resultados ainda mostraram que as equações são adequadas para a obtenção do K_{IC} , mas o valor para CVN retornado na simulação é muito distante do disponível na literatura.

Palavras-Chave: Mecânica da fratura. Tenacidade a fratura K_{IC} . Energia de Impacto. Aço AISI 4340.

¹ Graduando (Engenharia Mecânica, UniEVANGÉLICA) - Centro de Universitário, Brasil). fabriciomrts@gmail.com

² Graduando (Engenharia Mecânica, UniEVANGÉLICA) - Centro de Universitário, Brasil). silvioaramende@gmail.com

³ Mestre (Engenharia Mecânica, UniEVANGÉLICA) - Centro de Universitário, Brasil). helio.queiroz@unievangelica.edu.br

RELATIONSHIP BETWEEN FRACTURE TOUGHNESS K_{Ic} AND THE CHARPY IMPACT TEST OF A SIMULATED TEST ON AISI 4340 STEEL NORMALIZED

Abstract

In the execution of structural designs and mechanical components it is fundamental to identify the mechanical properties of the materials. Several methodologies and techniques can be used in solid mechanics applications, emphasizing fracture mechanics that provides parameters for characterization of a material through fracture toughness and tensile strength that develop in the region of cracks and defects. These techniques are influenced by the type of loading, static or dynamic. Some of these mechanical properties are difficult to obtain, requiring complex dynamic test equipment and a significant operational cost due to the time taken. This work aims to study the relationship between fracture toughness, called K_{Ic} factor and impact energy, denominated CVN, in standard AISI 4340 alloy steel. This material was chosen for its relevance in several projects and applications, and for being considered a reference among steels classified as ultra high strength steels. The applied methodology uses numerical simulation by the finite element method to perform an impact test on a Charpy V-notched test body, modeled according to ASTM E23. CVN values were obtained from this simulation, in order to compare with the values available in the literature. In order to correlate the energy values of impact with K_{Ic} values, equations developed in some studies were considered in order to ascertain their accuracy and relevance. The results also showed that the equations are adequate to obtain the K_{Ic} , but the value for CVN returned in the simulation is very far from that available in the literature.

Keywords: Fracture mechanics. Fracture toughness K_{Ic} . Impact energy. AISI 4340 steel.

1. Introdução

A fratura em componentes é um problema enfrentado desde de os primórdios das construções humanas. Atualmente esse problema alcançou uma relevância ainda maior devido à alta complexidades das estruturas e equipamentos humanos e a consequente necessidade por segurança e disponibilidade desses. Muito citada, a pesquisa feita por Duga em 1983, nos EUA, estimou um custo de 119 bilhões de dólares por ano devido a fratura em componentes mecânicos, com redução para 28 bilhões de dólares caso fossem aplicados os conhecimentos de falhas por fadiga e Mecânica da fratura disponíveis a época [1] [2] [3].

A complexidade dos testes da mecânica da fratura leva a execução de testes de impacto, como o ensaio de Charpy. Esse método é muito usado para seleção de material e em controles de qualidade, apresentando limitações consideráveis quanto a existência de expressões analíticas que se relacionem com seus resultados. Isso faz com que se use os ensaios de impacto apenas de maneira qualitativa ou comparativa. Mesmo com o uso de corpos de prova com pré-trincas o único dado quantitativo de um teste de impacto que pode ser utilizado é o total de energia por unidade de área [2] [4] [5].

Buscou-se algumas relações analíticas disponíveis na literatura que se propõem a converter os valores de energia de impacto CVN em valores de tenacidade a fratura K_{IC} . Para obtenção da energia de impacto optou-se por simular um ensaio de impacto em Análise de Elementos Finitos, fazendo uso do software Abaqus/CAE. Selecionou-se para a análise o aço AISI 4340 normalizado, um aço de ultra alta resistência, considerado referência em comparações com outros aços com essa mesma designação. O objetivo deste trabalho, portanto, foi correlacionar os valores resultantes de uma simulação de teste de impacto com os valores de tenacidade a fratura, e verificar a relevância das equações disponíveis na literatura como simplificadoras dos ensaios de mecânica da fratura [2], [6].

2. Revisão teórica

2.1. Evolução histórica da mecânica da fratura

Durante a Segunda Guerra Mundial, em um esforço para repor os navios cargueiros afundados pela Marinha Alemã, foi criado nos EUA um novo processo de produção de navios. O

programa foi responsável pela produção dos “Liberty ships”. A classe de navios Liberty obteve relativo sucesso, com algumas falhas catastróficas a serem consideradas. Em torno de 12 dos 2700 navios da classe Liberty produzidos durante o conflito, simplesmente partiram-se ao meio ainda ancorados no cais [7] [8] .

As investigações dos incidentes com os navios concluíram que as falhas foram causadas pela presença de concentrações de tensão e facilidade de propagação de trincas na estrutura do navio. O aço utilizado sempre foi considerado adequado para a união dos painéis com rebites. No entanto, a introdução do uso de soldagem na união dos painéis, permitiu a propagação de trincas sem nenhuma barreira. Como agravadores da situação ainda haviam cantos de perfil quadrado espalhados pelo convés e o aço apresentava baixa tenacidade a fratura medida em ensaios de impacto de Charpy [9] [8].

Com o fim da Segunda Guerra Mundial, a mecânica da fratura começou a se consolidar como área de conhecimento da engenharia. Em 1956 foram utilizados conhecimentos de mecânica da fratura para explicar as falhas da fuselagem do primeiro avião comercial com motores a jato, os de Havilland Comet. Em pouco mais de 1 ano, 4 aviões simplesmente se desintegraram em voo, levando a perda do Certificado de Aeronavegabilidade dos Comet. A aeronave utilizava cabine pressurizada, o que criava um diferencial de pressão interna e externa em seu voo a 10,7 km de altitude. Toda a dinâmica de pressurizações causou crescimento de trincas por fadiga, que emanaram dos buracos de parafusos e rebites usados para fixar as janelas, sendo essa a principal causa apontada para os acidentes [8] [10].

Nas últimas décadas, muitas pesquisas foram direcionadas para o desenvolvimento de um modelo microestrutural da fratura. Outro aspecto importante é o auxílio da tecnologia da computação, como o uso de Análise de Elementos Finitos para as abordagens de mecânica da fratura. A aplicabilidade prática da mecânica da fratura se mostrou tão pertinente que atualmente se estabilizou como disciplina em engenharia [8].

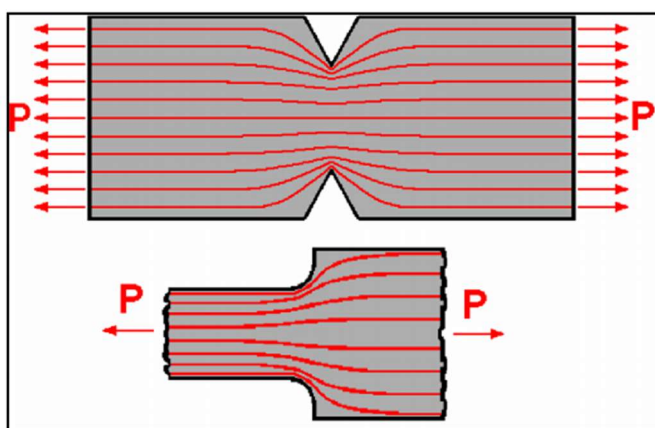
2.2. Concentração de tensões

As tensões aplicadas ao material podem gerar trincas que atuam como concentradores de tensões. As trincas são causadas pelo escorregamento entre camadas de átomos, ou seja a

concentração de tensões não causaria a ruptura do material em um primeiro momento pois a deformação plástica alivia essas tensões [11].

Uma trinca pode ser representada por um entalhe, como se pode ver na figura 1 as tensões causadas pela tração do material se concentram na ponta da trinca assim aumentando a chance de ruptura total do material [11].

Figura 1 - Efeitos da concentração de tensão devido a uma trinca.



Fonte:[12]

As concentrações de tensão causam a ruptura indesejável do material devido a uma trinca. O fator de intensidade de tensão estuda estas tensões em estado linear elástico [8].

2.3. Tenacidade a fratura K_{Ic}

A mecânica da fratura linear elástica (MFLE) estuda a fratura na região de deformação elástica. O fator de intensidade de tensão representado pela constante K_I , caracteriza as condições na ponta da trinca na região de comportamento linear elástico, se o material falhar localmente em alguma combinação crítica de tensão e deformação desse modo a fratura ocorre em uma intensidade crítica de tensão denominada K_{Ic} , portanto o K_{Ic} também é denominado tenacidade a fratura [8].

O K_{Ic} é uma importante propriedade do material para previsão e prevenção de fraturas e avaliação de tolerância a danos. O K_{Ic} na mecânica da fratura linear elástica é o tamanho crítico do fator de intensidade de tensão K_I na ponta de uma trinca quando a deformação do corpo for elástica. É uma propriedade mensurada em unidades de tensão vezes a raiz quadrada do comprimento [13] [14] [11].

A tenacidade a fratura pode ser medida através de testes onde o material que possui uma trinca é exposto a uma tração cíclica para provocar a ruptura, o fator de intensidade K define a reação da trinca após ser exposta a tensão, a trinca causa escoamento local provocados pelas altas concentrações de tensões criadas, esse tipo falha é um fenômeno que é detalhada mais a fundo com o estudo da mecânica da fratura [14].

No entanto os métodos experimentais aplicados a mecânica da fratura apresentam complexidade alta. O processo de preparo do corpo de prova, início e crescimento da pré-trinca são considerados críticos, implicando em dificuldade para a execução dos testes [5].

2.4. Correlação entre a energia de impacto CVN e a tenacidade a fratura

A energia de impacto de Charpy, denominada CVN, é indiretamente utilizada para estimar valores de K_{IC} através de equações analíticas. Para tanto é necessário selecionar tais equações de acordo com comportamento dos resultados dos testes de impacto, ou seja, de acordo com a zona de interesse, tensão de escoamento (σ_y) do material e valores de CVN [15].

As correlações são usualmente baseadas na tensão de escoamento, Módulo de Young (E) e em correlações aplicadas a diferentes zonas em uma curva de transição de temperatura de Charpy [2], [15].

A equação 1 foi desenvolvida por Barson, Rolf e Novak para aços com tensão de escoamento entre 760 MPa e 1700 MPa. Também é definido que seu desenvolvimento leva em consideração a temperatura de transição dúctil-frágil do material, sendo desenvolvida para a região upper shelf, onde o material absorve o máximo de energia no estado dúctil [13], [16], [17].

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,64 \left(\frac{CVN}{\sigma_y} - 0,01\right) \quad (1)$$

A equação 2 foi desenvolvida por Ault, e é designada para aços de ultra alta resistência utilizados na aviação [13], [16].

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2 = 1,37 \left(\frac{CVN}{\sigma_y}\right) - 0,045 \quad (2)$$

A equação 3 foi desenvolvida por Witt e é designada para aços na região upper shelf utilizados na construção de vasos de pressão de reatores [13], [16].

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2 = 0,893 \left(\frac{CVN}{\sigma_y}\right) - 0,0291 \quad (3)$$

A equação 4 foi desenvolvida por Kussmaul e Roos e possui as mesmas aplicações da equação 3 [13], [16].

$$\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_y}\right)^2 = 1,23 \left(\frac{CVN}{\sigma_y}\right) - 0,0061 \quad (4)$$

A equação 5 foi desenvolvida por Thorby e Ferguson e é designada para aços com CVN entre 6 J e 55 J [18].

$$K_{IC} = 18,2(CVN)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

A equação 6 foi desenvolvida por Marandet e Sanz e é designada para aços na região lower shelf. Tal equação também considera a curva de transição dúctil-frágil, sendo lower shelf a região da curva onde o material absorve o mínimo de energia, em estado frágil [17], [18].

$$K_{IC} = 20(CVN)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

Embora os valores obtidos de um ensaio Charpy não representem os valores reais de tenacidade a fratura, esses valores podem ser usados em uma série de pontos para estimá-la em uma avaliação de mecânica da fratura, com relativa precisão. Mesmo assim a menor complexidade dos testes de Charpy, custos menores e menor tempo gasto, fazem com que correlações entre CVN e K_{IC} continuem relevantes [17] [15].

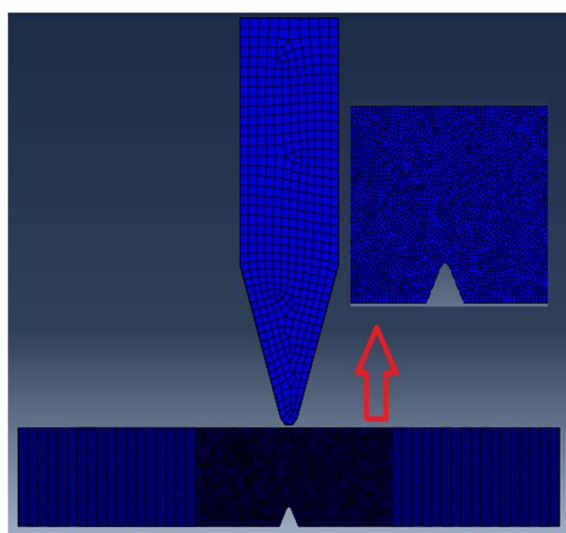
2.5. Análise de Elementos Finitos (FEA)

Todas as análises clássicas de mecânica dos sólidos são resolvidas com o uso de equações paramétricas que representam funções analíticas. Esse método, no entanto, possui maior aplicabilidade em componentes considerados de geometria simples como cilindros e prismas, gerando um oneroso trabalho caso a complexidade geométrica aumente [7].

A análise pelo método de elementos finitos consiste em dividir o volume de uma peça em um conjunto finito de elementos contíguos e discretos e aplicar uma equação sobre cada elemento e sobre

cada ponto que os conectam de forma que se resolva um conjunto de equações. O resultado é a construção de uma malha que modela o elemento a ser analisado [7]

Figura 2 – Malha utilizada para FEA



Fonte: dos Autores, 2018.

A alta complexidade dos problemas de mecânica da fratura faz com que a Análise de Elementos Finitos se torne uma importante ferramenta para solucioná-los. O Abaqus/CAE é um software de modelagem e análise de elementos finitos, utilizado para solucionar uma extensa gama de problemas em engenharia, sendo aplicado para simular o ensaio de impacto neste estudo [19].

3. Metodologia

3.1. Material

O material selecionado para esse estudo foi o aço AISI/SAE 4340 normalizado. O uso geral deste aço é justificado pois possui um bom equilíbrio entre resistência e tenacidade. A microestrutura formada confere a ele propriedades como limite de escoamento e resistência a fadiga altos. O material é tipicamente utilizado em elementos de fixação, engrenagens, eixos e em elementos de máquinas similares. Além disso é usado em virabrequins e bielas em motores, e na aviação, em trens de pouso e em outras partes críticas da estrutura do avião [6] [20].

Buscou-se no *ASM Handbook volume 4: heat treatment*, as propriedades do material em questão para a avaliação teórica das equações. A tabela 2 apresenta as propriedades do aço AISI/SAE 4340, normalizado a 870 °C.

Tabela 2 – Propriedades teóricas do aço AISI 4340 Normalizado a 870°C

Limite de Resistência (MPa)	Tensão de Escoamento, σ_y (MPa)	Dureza (HB)	CVN (J)	K_{Ic} (MPa. \sqrt{m})
1280	860	363	47,07	125,36

Fonte: [21], [6].

Um aspecto importante desse estudo é que foram utilizadas regressões quadráticas para obtenção dos valores de CVN e K_{Ic} . Foi utilizada a ferramenta de cálculo e conhecimento computacional Wolfram Alpha para obtenção das equações a partir dos dados de diferentes faixas de dureza para o material em questão.

3.2. Ensaio de Charpy em simulação numérica

Neste artigo foi utilizado o método de elementos finitos baseado no software Abaqus para simular um teste de impacto de Charpy, utilizando um corpo de prova modelado de acordo com a norma ASMT E23. O corpo em questão possui seção transversal quadrada de 10 mm, por 55 mm de comprimento e um entalhe em “V” de 2 mm de profundidade centrado na face oposta a aplicação do carregamento de impacto. A ponta do entalhe possui arredondamento com raio de 0,25 mm [22].

Na interface do software Abaqus/CAE, deve-se definir os comportamentos e propriedades que definem o material em questão. Para este ensaio foram definidos a densidade, responsável por caracterizar a massa dos corpos, o comportamento elástico do material e fez-se o uso do método de Jhonson-Cook para caracterizar o comportamento plástico e os danos do material durante o carregamento de impacto.

A tabela 3, apresenta os parâmetros utilizados para definir o comportamento elástico do material e também sua densidade.

Tabela 3 – Parâmetros elásticos e de massa AISI 4340

Modulo de young (GPa)	Coefficiente de Poisson	Densidade (g/cm ³)
205	0,32	7,85

Fonte: [6] [21].

O comportamento plástico do material juntamente com a caracterização dos danos, são descritos pelo modelo de Jhonson-Cook que representa uma relação empírica usada para descrever

a sensibilidade à taxa de deformação de materiais metálicos. A modelagem por meio deste método permite simular o comportamento do material quando em carregamento de impacto [23] [24] [25].

A Equação 7 representa o modelo de Johnson-Cook para o comportamento plástico do material, sendo σ_{eq} a tensão de fluência do material.

$$\sigma_{eq} = [A + B\varepsilon_p^n][1 + clb(\varepsilon' *)][1 - T^{*m}] \quad (7)$$

Essa equação é dividida em três termos onde o primeiro termo representa a lei de endurecimento, o segundo representa a taxa de deformação, e o último representa os efeitos da temperatura [23] [24] [25].

A tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados neste estudo para descrever o comportamento plástico do AISI 4340 no modelo Johnson-Cook.

Tabela 4 – Parâmetros do comportamento plástico de Jhonson-Cook para o aço AISI 4340

A (MPa)	B (MPa)	n	c	m
792	510	0,26	0,014	1,02

Fonte: [23] [24]

A equação 8 representa o modelo de danos de Johnson-Cook, caracterizando o comportamento do material durante o carregamento de impacto, sendo ε_f a deformação de fratura.

$$\varepsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma *)][1 + D_4 1n(\varepsilon_p' *)][1 + D_5 T *] \quad (8)$$

A equação 8 também se desmembra em três termos, sendo o primeiro termo a taxa de triaxilidade de tensão, o segundo a taxa de deformação, e o ultimo os efeitos da temperatura [23] [24] [25].

A tabela 5 apresenta os parâmetros utilizados neste estudo para caracterizar os danos do AISI 4340 pelo modelo de Johnson-Cook.

Tabela 5 – Parâmetros para o modelo de danos de Jhonson-Cook para o aço AISI 4340

D1	D2	D3	D4	D5
0,05	3,44	-2,12	0,002	0,61

Fonte: [23] [24]

O escopo deste teste não abrange os efeitos térmicos sobre o ensaio de impacto, portanto é plausível desconsiderar os parâmetros referentes ao termo de efeitos térmicos nas duas equações.

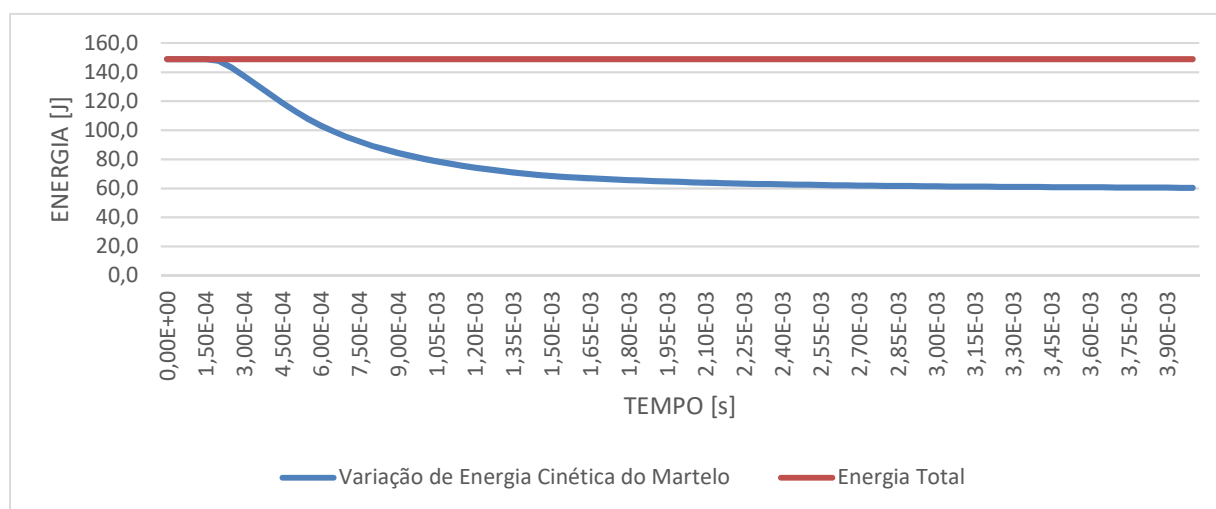
Por fim, definiu-se as propriedades do martelo e também os parâmetros do carregamento de impacto. A massa do martelo em um ensaio de impacto de Charpy de 150 J deve ser 9,85 kg e a velocidade do martelo durante o impacto deve ser de 5,5 m/s [26].

4. Resultados

4.1. Energia de impacto

O gráfico 1, foi gerado a partir dos dados de saída da simulação no Abaqus/CAE. Os valores apresentados são referentes a energia total e à variação de energia cinética do martelo versus o tempo decorrido no ensaio.

Gráfico 1 – Energia total e Variação de Energia cinética x tempo de ensaio



Fonte: dos Autores, 2018.

Em um ensaio de impacto, a energia absorvida pelo corpo de prova é mensurada com base na variação de energia do movimento do martelo. Após romper o corpo de prova, o martelo alcançará uma altura menor do que a inicial devido a energia cedida para romper o corpo de prova [26].

No gráfico 1, a diferença entre a energia total e o ponto onde a energia cinética atinge o seu menor patamar representa a energia cedida pelo martelo durante o impacto. O valor encontrado para essa diferença é de 88,6 joules, que é 53% maior em comparação com o esperado para o material, de acordo com a literatura.

4.2. Equações analíticas

A tabela 7, a seguir, apresenta os resultados das equações estudadas tendo como entrada de dados os valores teóricos de CVN e tensão de escoamento (σ_y), e como saída os valores de K_{IC} . Nessa análise foram utilizados apenas valores teóricos devido a discrepância dos valores encontrados na simulação.

Tabela 7 – Resultados encontrados para relação CVN (J) e σ_y (MPa) com K_{IC} (MPa. \sqrt{m})

Autores	K_{IC} pelas equações	Variação em relação ao K_{IC} teórico
Barson e Rolf; Rolf e Novak.	145,52	-16%
Ault.	148,93	-19%
Witt.	120,95	4%
Kussmaul e Roos.	212,80	-70%
Thorby e Ferguson.	124,87	0%
Marandet e Sanz.	137,22	-9%

Fonte: dos Autores, 2018.

Os resultados das equações utilizando os valores teóricos de CVN são comparados aos valores de K_{IC} obtidos da literatura afim de se averiguar a precisão do método de avaliação da tenacidade a fratura.

5. Conclusões

O software Abaqus/CAE não apresentou ou não foram encontrados resultados diretos para a energia absorvida pelo corpo, sendo utilizada uma observação indireta para sua obtenção. Pelo modelo simulado neste trabalho não foram encontrados resultados satisfatórios para a energia absorvida pelo corpo de prova durante o impacto do martelo. Tal situação demonstra a necessidade de uma melhor e mais precisa caracterização, levando em consideração a condição de tratamento térmico que o material se encontra.

Por fim, das correlações estudadas, apenas a equação desenvolvida por Witt e a equação desenvolvida por Thorby e Ferguson apresentaram resultados aceitáveis. Conclui-se que as equações são melhor aplicáveis para materiais com características semelhantes aos usados para desenvolvê-las. Esse pressuposto justifica a precisão encontrada na equação de Thorby e Ferguson, afinal ela foi desenvolvida para aços com energia de impacto CVN no intervalo entre 6 e 55 joules, condizente com o CVN do AISI 4340. Os resultados também abrem a discussão sobre a regressão

usada para encontrar os valores de K_{IC} , no presente trabalho. A correlação entre dureza e tenacidade a fratura teóricos retornou um resultado preciso, mostrando a relevância de um estudo mais aprofundado desse aspecto.

Referências

- [1] F. R. de Castro, “Avaliação Do Comportamento Mecânico E Tenacidade a Fratura Do Aço Sae/Aisi 4140 Submetido a Tratamento Térmico Criogênico,” p. 115, 2013.
- [2] A. L. Pinto, “AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO E TENACIDADE A FRATURA DA LIGA DE ALUMÍNIO 7075 – T651,” *CIPEEX - Unievangelica*, 2015.
- [3] J. J. Duga, W. H. Fisher, R. W. Buxbaum, A. R. Rosenfield, A. R. Burh, E. J. Honton, and S. C. McMillan, “The Economic Effects of Fracture in the United States,” Washington, DC, DC, 1983.
- [4] B. W. Jr and S. John, “Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials,” *Am. Soc. Test. Mater.*, vol. STP410–EB, 1966.
- [5] R. S. Teixeira, “Metodologia de Análise de Fadiga em Componentes Estruturais de Aço Baseada na Mecânica da Fratura,” *Esc. Eng. DA UFMG*, 2004.
- [6] ASM International, “ASM Handbook - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys,” *Technology*, vol. 2, p. 3470, 2001.
- [7] R. L. Norton, *Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada*, 4ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- [8] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, Third Edit. USA: CRC Taylor & Francis Group, 2005.
- [9] R. W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, Fourth Edi. Nova York: John Wiley & Sons, 1996.
- [10] P. A. Withey, “Fatigue failure of the de Havilland Comet I,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 4, no. 2, pp. 147–154, Jun. 1997.
- [11] M. Ferrante, *Seleção De Materiais*, Terceira e. Edufscar, 2002.
- [12] A. C. D. O. MIRANDA, “PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA EM GEOMETRIAS 2D COMPLEXAS SOB CARGAS CÍCLICAS VARIÁVEIS,” *PUC-Rio*, vol. 1, 2002.
- [13] P. T. Qamar SZ, Sheikh AK, Arif AFM, “Regression-Based CVN-KIC models for hot study tool steels,” *Mater. Sci. Eng. A.*, 2006.
- [14] N. E. Dowling, *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, Fourth Edi. USA: Pearson Education, 2013.

- [15] G. T. Méndez, S. I. Capula Colindres, J. C. Velázquez, D. A. Herrera, E. T. Santillán, and A. Q. Bracarense, "Fracture toughness and Charpy CVN data for A36 steel with wet welding," *Soldag. e Insp.*, vol. 22, no. 3, pp. 258–268, 2017.
- [16] Y. J. YU, M., LUO, Z., CHAO, "Correlations between Charpy V-Notch Impact Energy and Fracture Toughness of Nuclear Reactor Pressure Vessel (RPV) Steels," *Eng. Fract. Mech.*, 2015.
- [17] N. Ahmad, R. A. Pasha, and M. I. Hammouda, "Temperature Effects on Impact Energy of Tungsten Alloy," University of Engineering & Technology Taxila, Pakistan, 2011.
- [18] A. et al SHEKHTERA, "Assessment of temper embrittlement in an ex-service 1Cr-1Mo-0.25V power generating rotor by Charpy V-Notch testing, K_{1c} fracture toughness and small punch test," *Int. J. Press. Vessel. Piping, Aust.*, vol. 79, pp. 611–615, 2002.
- [19] D. R. De Paula, "Modelagem Tridimensional do Ensaio de Tenacidade à Fratura com o Software Abaqus," no. 1.
- [20] V. H. A.J.Abdalla, I.R.Carrer, M.J.R. Barboza, Baggio-Scheid and D. A. P. R. Neto, C.Moura, "ESTUDO DE FLUÊNCIA EM AÇOS 4340 COM DIFERENTES MICROESTRUTURAS E TRATAMENTO DE CARBONITRETAÇÃO A PLASMA," pp. 7139–7146, 2010.
- [21] ASM International The Materials Information Company and ASM International The Material Information Company, "ASM handbook Heat Treating," *ASM Int.*, vol. 4, p. 2173, 2001.
- [22] ASTM, "Norma E23-07a - Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials," *Am. Soc. Test. Mater. Handb.*, vol. 14, no. C, p. 28, 2007.
- [23] M. K. A. A. S. Sulaiman, A. Roshana, "Finite Element Modelling of the effect of tool rake angle on tool temperature and cutting force during high speed machining of AISI 4340 steel Finite Element Modeling of the effect of tool rake angle on tool temperature and cutting force during high speed," *Dep. Mech. Manuf. Eng. Fac. Eng. Univ. Putra Malaysia*, 2013.
- [24] G. Owolabi, D. Odoh, A. Odeshi, and H. Whitworth, "Occurrence of Dynamic Shear Bands in AISI 4340 Steel under Impact Loads," *World J. Mech.*, vol. 03, no. 02, pp. 139–145, 2013.
- [25] U. S. D. Madhusudhan, Suresh Chand, S. Ganesh, "Modeling and simulation of Charpy impact test of maraging steel 300 using Abaqus Modeling and simulation of Charpy impact test of maraging steel 300 using Abaqus," *Dept. Metall. Mater. Eng. RGUKT IIIT Nuzvid, A. P, India*, 2018.
- [26] M. D. L. de Almeida, "Dimensionamento de um Equipamento para Ensaio de Impacto Charpy," *Fac. Eng. Mecânica, UniRV Univ. Rio Verde*, pp. 1–22, 2015.