

AVALIAÇÃO DA RIF E PROPAGAÇÃO INSTÁVEL DE TRINCA A PARTIR DE DADOS OBTIDOS VIA ENSAIO DE CHARPY INSTRUMENTADO*

Nelson de Freitas Costa¹
Afonso Reguly²

Resumo

Em um ensaio de impacto Charpy convencional, não é comum mensurar a energia consumida nas etapas de fratura, geralmente se obtém apenas a porção de fratura dúctil. Esse trabalho tem como objetivo apresentar a proporção do consumo de energia das diferentes etapas de fratura e relacionar com a área de superfície de fratura do corpo de prova. Ainda, desenvolve discussão dos fenômenos envolvidos, utilizando a teoria já conhecida. Para a obtenção dos dados foi realizado ensaio de Charpy instrumentado em 50 corpos de prova de 9 lotes diferentes. As amostras foram retiradas a 1/3 do raio da seção redonda de barras laminadas a quente temperadas e revenidas. As amostras foram preparadas conforme amostra do tipo A, definido na ASTM E23. O ensaio foi conduzido a -20°C , obedecendo a norma ASTM E2298. Os resultados mostraram que aproximadamente 80% da energia consumida na fratura é consumida na etapa de fratura dúctil, sendo que 88% dessa energia é consumida na região de início de fratura. Essa região, porém, não representa maior área na superfície de fratura, devido a diferença de trabalho para deformação nas etapas de nucleação de trinca e propagação instável de trinca.

Palavras-chave: Charpy instrumentado; Energia consumida; RIF; Fratura.

EVALUATION OF FIR AND UNSTABLE CRACK PROPAGATION REGION FROM DATA OBTAINED BY INSTRUMENTED CHARPY TEST

Abstract

In a conventional Charpy impact test, it is not usual measure the absorbed energy in each stage of fracture, usually obtains only the shear fracture portion. This paper aims to present the proportion of absorption energy in each stage of fracture and relate this to the area of fracture surface of the samples. In addition it develops discussion of the phenomena involved, using the already know theory. To obtain the data was realized instrumented Charpy test on fifty samples from nine different heats. The samples were taken from 1/3 of radius from round section of quenched and tempered hot rolled round bars. The samples were prepared according to A type sample, defined in the standard ASTM E23. The test was conducted at -20°C , according to standard ASTM E2298. The results showed that approximately 80% of the energy absorbed in fracture is absorbed in sheared fracture stage, and 88% of this energy is consumed in fracture initiation region. However, this region does not present the bigger area in fracture surface, due to the difference of working in the deformation in the stages of crack nucleation and unstable crack propagation.

Keywords: Instrumented Charpy; Absorbed energy; FIR; Fracture.

¹ Engenheiro Metalúrgico, Aluno de Mestrado, Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) - PPGE3M/UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico, Doutor, Professor titular, Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) - PPGE3M/UFRGS, Av. Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, Brasil

1 INTRODUÇÃO

Uma das formas mais simples, rápida e barata para verificação de susceptibilidade de fratura frágil de materiais, é o ensaio de Impacto Charpy [1][2]. Porém, o ensaio convencional apresenta certas limitações, apresentadas e discutidas por uma série de autores. Resumidamente, pode-se relacionar como limitações principais: retornar apenas o valor de energia total consumida na fratura; os resultados de energia absorvida obtidos são característicos à geometria do corpo de prova (CP), sem poder ser expandido para componentes em projetos; pode apresentar considerável variabilidade entre os resultados de energia lidos no dial do equipamento para uma mesma série de ensaios. Essas limitações tornam os resultados inaptos para o uso em projeto [1][2][3][4].

A instrumentação do ensaio de impacto Charpy permite obtenção de resultados adicionais que podem ser utilizados para estudar o comportamento do processo de fratura de um determinado material. Além da energia total consumida na fratura, as energias consumidas em cada etapa do processo (iniciação e propagação da trinca), são possíveis de serem quantificadas e analisadas [2][4][5]. Uma série de autores vêm publicando trabalhos avaliando resultados obtidos nesse ensaio, suas variáveis influenciadoras e apresentando metodologias para instrumentação de equipamentos. O ensaio de Charpy consiste em liberar um martelo de determinada altura para que esse, através de impacto, promova a fratura de um CP. Define-se a fratura como a separação física de um material, gerando duas novas faces no processo. Sabe-se que a fratura pode ocorrer de forma dúctil, frágil, ou ainda como uma mistura dos dois comportamentos. Na fratura dúctil existe alto consumo de energia, devido a deformação plástica no material. Enquanto que, em uma fratura frágil, em que nenhuma ou quase nenhuma deformação plástica ocorre, há baixo consumo de energia. Divide-se a fratura em duas etapas: a iniciação e a propagação de trinca [1]. Avaliando-se um gráfico carga-deslocamento obtido através de impacto instrumentado, como o da **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, retirado do trabalho de Quinan & Palma [2], pode-se verificar graficamente essa definição, ou seja, a área abaixo da curva é dividida em iniciação e propagação de trinca [2].

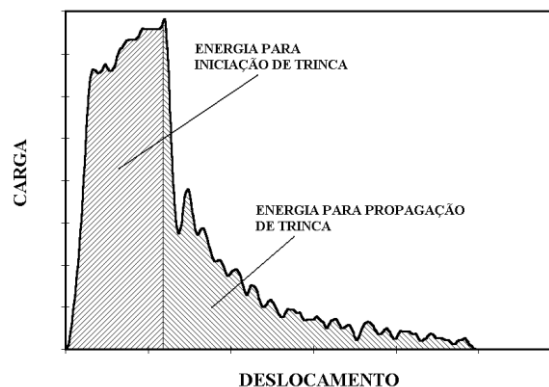


Figura 1. Gráfico carga-deslocamento obtido por ensaio de Impacto Charpy Instrumentado. Observam-se nas regiões ilustradas no gráfico as etapas da fratura. Fonte: Quinan & Palma (1997) [2].

Nota-se, ainda avaliando a figura 1, que a nucleação de trinca e o início da propagação dessa, dá-se na carga máxima (F_m) alcançada no ensaio. Essa curva descreve comportamento de materiais que tem propagação de trinca instável imediatamente após a nucleação dessa característica de materiais com comportamento frágil. No entanto, materiais que apresentam certa ductilidade, experimentam propagação

estável da trinca. Segundo desenvolvimento de Tetleman e Mcevil, conforme citado por Dieter [apud 1], para materiais com alguma ductilidade, após a primeira trinca ser nucleada, ainda não é possível a propagação instável, formam-se microtrincas e vazios que se unirão, causando um crescimento lento da trinca [1], até ser atingido comprimento suficiente para a fratura instável.

Usando como base a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, pode-se expressar a energia consumida na fratura matematicamente, de forma geral, conforme a equação 1, considerando que a propagação de trinca pode ser dividida em propagação estável e instável de trinca.

$$E_{fratura} = E_{iniciação} + E_{propagação} \quad (1)$$

Na equação 1 são desconsideradas perdas do sistema, ou seja, consumo de energia em outras etapas que não sejam a fratura do CP. **Ireland** [apud 2], exemplifica essa perda, por exemplo, pela energia consumida para causar pequenas deformações no corpo de prova, localizadas nos pontos de engaste do CP na máquina (equivalentes à indentações Brinell).

Segundo Dieter [1], a nucleação de trinca, na etapa de iniciação de trinca, pode ocorrer pela presença de partículas de segunda fase e pelo empilhamento de discordâncias, que geram regiões de alta tensão, exercendo papel de concentrador de tensões. Cottrell, conforme citado por Dieter [apud 1], postulou que a nucleação de trinca irá ocorrer apenas quando o trabalho realizado pela tensão cisalhante no plano de escorregamento ativo (responsável pelo movimento de discordâncias), igualar-se ao trabalho realizado pela força de fricção oposta a movimentação das discordâncias somada ao trabalho para produzir novas superfícies de fratura.

A queda brusca de carga necessária para deformar o CP apresentada na figura 1 após a carga máxima, segundo Takebayashi et al [5], é comparável com a propagação instável apresentada em materiais completamente frágeis. A força motriz para a propagação da trinca é a liberação de energia elástica ocasionada pela movimentação da trinca na estrutura do metal, sendo que, uma vez que o balanço entre a energia para criação de duas novas superfícies for pelo menos igual a energia elástica liberada, a propagação ocorrerá [1].

Ao considerar materiais metálicos com estrutura atômica cúbica de corpo centrado (CCC), estrutura suscetível a transição dúctil-frágil, os comportamentos dúctil e frágil, aparecem isolados respectivamente em temperaturas acima da região e abaixo da região onde tem-se a transição dúctil-frágil. Na região de transição dúctil-frágil, ou seja, temperatura intermediárias, apresentar-se-á aspecto da fratura com regiões de aspecto fibroso, indicando deformação plástica e alto consumo de energia, e região de aspecto brilhante, indicando fratura frágil com baixo consumo de energia. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta uma relação entre aspecto de superfície de fratura e região do diagrama de transição, ilustrando essas diferenças.

Ao analisar a superfície de um CP de ensaio de Impacto Charpy, ensaiado em condições da região de transição dúctil-frágil, é possível observar os diferentes aspectos de fratura, dividido por regiões. A norma ASTM E23 [3] ilustra a superfície do CP apresentando as diferentes regiões como pode ser visto na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde: a região logo abaixo do entalhe é definida como região de início de fratura (RIF), onde há deformação plástica (após ser atingido o escoamento), nucleação de trinca e propagação estável dessa; após ser atingida uma carga crítica, forma-se a região de lados "A" e "B", que representa a região de fratura frágil, onde ocorreu a propagação instável de trinca; as regiões nas laterais do CP e abaixo da região de propagação instável da trinca representam a fratura final do CP, nessas região ocorre fratura estável após a propagação instável de trinca cessar [3].

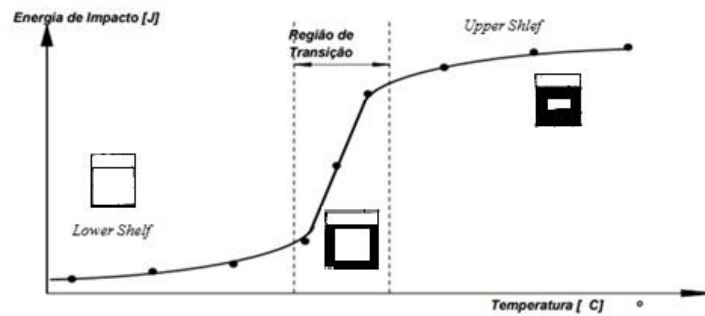


Figura 2. Esquema ilustrando a superfície de fratura resultante de ensaio de impacto e região correspondente no diagrama de transição dúctil-frágil. Nota-se aumento de susceptibilidade de fratura frágil conforme se reduz a temperatura. Fonte: Adaptado do material do curso de Ensaio de Impacto [6] e da norma ASTM E23 – 12C-12 [3].

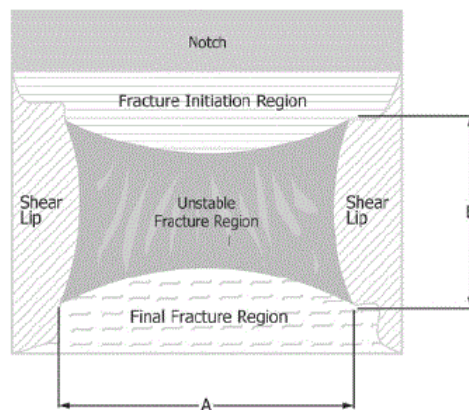


Figura 3. Superfície de fratura de um CP de ensaio de Impacto Charpy indicando as regiões com aspectos de fratura diferentes. Fonte: Retirado da norma ASTM E23 – 16b, pág. 10 [3].

A norma ASTM E23 apresenta, para materiais ensaiados na transição dúctil-frágil, a curva carga vs deslocamento do tipo B (figura 4), na qual podem ser observadas as cargas específicas que caracterizam as alterações que ocorrem durante o fenômeno da fratura.

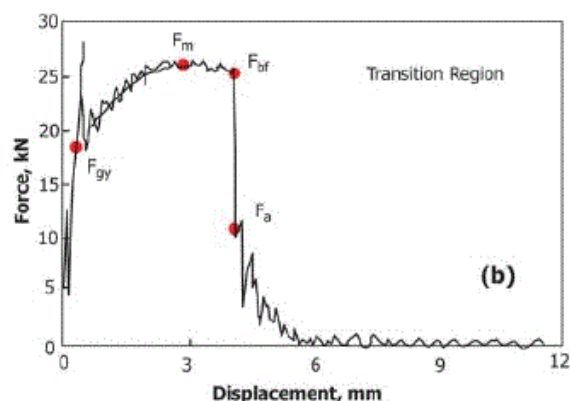


Figura 4. Gráfico carga vs deslocamento do tipo B obtido via ensaio de Charpy instrumentado, característico de materiais ensaiado na região de transição dúctil-frágil. Fonte: Retirado da norma ASTM E23 – 16b, pág. 20 [3].

As cargas, segundo a ASTM E23, são definidas da seguinte forma: a carga F_{gy} é definida como a carga em que ocorre o escoamento geral, a região compreendida

entre o início do processo e essa carga representam o comportamento elástico do material; a carga F_m é a carga máxima obtida no ensaio e representa a nucleação de trinca; as cargas F_{bf} e F_a representam respectivamente o início e o fim da propagação instável de trinca.

Nesse trabalho busca-se identificar e quantificar a proporção dos consumos de energia nas diferentes etapas do processo de fratura, dividindo-as de acordo com as características presentes na área da superfície de fratura e confrontar com a teoria apresentada, utilizando dados obtidos em ensaio de Impacto Charpy Instrumentado para um aço do tipo API 2F em condições da região de transição dúctil-frágil, de curva característica do tipo B, conforme a norma ASTM E23.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar esse trabalho, foram retiradas amostras de 9 lotes do aço API 2F, utilizado para produção de amarras aplicadas em estruturas offshore. As amostras foram retiradas de barras redondas laminadas a quente, no estado bruto de laminação. Segue na tabela abaixo (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), as médias, os desvios padrões e a amplitude de variação dos elementos que compõe a composição química dos 9 lotes.

Tabela 1. Estimadores estatísticos

Elemento	Média	Desvio Padrão	Amplitude
C	0,218	0,0083	0,02
Al	0,019	0,0022	0,008
Si	0,233	0,0260	0,08
Mn	0,980	0,0433	0,14
Cr	0,968	0,0186	0,06
Mo	0,219	0,0060	0,02
Ni	0,546	0,0181	0,05
V	0,071	0,0024	0,008
P	0,018	0,0026	0,007
S	0,005	0,0015	0,004

Valores em % de massa atômica.

As amostras foram submetidas a tratamento térmico de Têmpera e Revenimento, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**) apresenta as temperaturas, tempos e meios de resfriamento utilizados.

Tabela 2. Parâmetros de tratamento térmico

Tratamento Térmico	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Resfriamento (meio)
Têmpera (Austenitização)	890 (+/- 5°C)	30	Água
Revenimento	650 (+/- 5°C)	60	Ar

Após o tratamento térmico, foram confeccionados os corpos de prova (CPs) para o ensaio de Charpy Instrumentado. Foram confeccionados 6 CPs para cada lote. Houve problema na preparação de amostra e perda de dados para 7 CPs, assim, totalizaram-se 47 ensaios de impacto com resultados possíveis de serem utilizados.

Os CPs foram retirados a 1/3 do raio da amostra em relação a superfície e tiveram entalhe transversal à direção de laminação. Os corpos de prova foram confeccionados

conforme a norma ASTM E23, considerando-se o TIPO A. Os CPs foram usinados em torno CNC e posteriormente polidos. Tiveram entalhe do tipo V produzido em brochadeira. O ensaio de impacto instrumentado foi realizado a -20°C . Normas de empresas certificadoras internacionais, que normatizam homologação do processo para materiais aplicados em estruturas offshore, solicitam realização de ensaio nessa temperatura [7]. Os procedimentos de ensaio seguiram a especificação da norma ASTM E2298 [8].

O ensaio foi executado em uma máquina Instron, com martelo instrumentado com strain gauges. O software acoplado na máquina de ensaio, através da leitura da diferença de potencial e realizando dupla integração na curva obtida, retornou a curva carga (kN) - deslocamento (mm) para cada ensaio. Além da curva, o software ainda disponibilizou as cargas F_m e F_{gy} , as energias referentes à essas cargas (W_m e W_{gy}), e também a energia total absorvida através da integração da curva carga-deslocamento (W_t).

As cargas F_{bf} e F_a foram obtidas através do método matemático de derivação da curva carga (kN) vs deslocamento (mm), utilizando para isso a taxa de variação da carga em função do deslocamento, seguindo a seguinte equação (equação 2), onde F é a carga e S o deslocamento.

$$\frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{F_{n+1} - F_n}{S_{n+1} - S_n} \quad (2)$$

Através dessa metodologia, foi encontrada a solução apresentada na figura abaixo (figura 5). Nota-se nas cargas F_{bf} e F_a há alteração significativa na curva derivada, característica que auxilia na definição da carga específica. Então, através da simples leitura dos dados, é possível extrair as cargas desejadas.

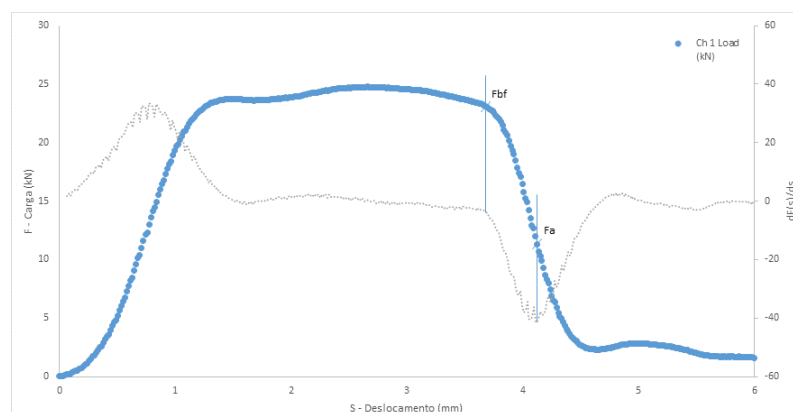


Figura 5. Gráfico carga vs deslocamento e a respectiva curva derivada. Nota-se a indicação das cargas F_{bf} e F_a .

A medida das áreas de superfície de fratura para cada região do CP foi realizada através da simples marcação de contorno das áreas e, utilizando medida conhecida da imagem, definindo a relação pixels/mm da imagem. Com essa relação e a área demarcada, foi realizada a medida de área de cada região. Para realizar esse processo foi utilizado o open software ImageJ.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A curva carga-deslocamento obtido nos ensaios instrumentados está apresentado na figura 6. Nota-se que esse tem o mesmo perfil do gráfico do tipo B apresentado na figura 4, demonstrando, segundo a ASTM E23, que o material apresenta indício de ter sido ensaiado na região de transição dúctil-frágil.

Buscando dividir as regiões das curvas obtidas de forma a comparar com a superfície de fratura obtidas nos ensaios, e atender o objetivo do trabalho, foi proposta a divisão das etapas de fratura em 3 regiões distintas, já previstas na análise da superfície de fratura apresentada na figura 3 da norma ASTM E23. A divisão proposta permite comprar as energias consumidas através das curvas com a área de superfície de fratura do CP ensaiado. As etapas propostas estão ilustradas na figura 6, sendo elas: região I, do início da deformação plástica (F_{gy}) até o início da propagação instável da trinca (F_{bf}); região II, da propagação instável de trinca entre as cargas F_{bf} e F_a ; e finalmente, a região III, referente a porção de final de fratura, iniciando na carga F_a até a o fim da curva.

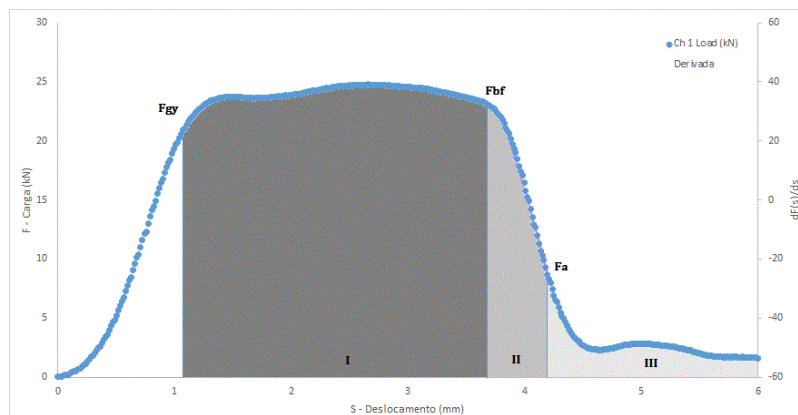


Figura 6. Gráfico carga-deslocamento para um material ensaiado na região de transição dúctil-frágil.
Fonte: O autor.

A primeira região, entre o início do ensaio e a carga F_{gy} , apresentada em branco e sem identificação na figura 6, com alta taxa de crescimento de carga por deslocamento, representa a parcela elástica do comportamento do material. Nessa etapa a energia é consumida na movimentação dos átomos em torno da posição de equilíbrio que ocupam na estrutura, aplicando-se a Lei de Hooke, sendo que ainda existe a capacidade de os átomos retornarem à posição original, ou seja, não há ocorrência de deformação plástica, assim, não é gerada área de deformação na superfície de fratura do CP. Então, essa etapa não será discutida nesse trabalho.

A região I, que cobre um grande deslocamento e tem pouca variação de carga, representa o início de deformação plástica do material e contém a etapa de nucleação de trinca e propagação estável dessa, ou seja, essa região compreende uma fração da etapa de iniciação de trinca e uma fração da etapa de propagação de trinca. Isso ocorre pois, após a nucleação da trinca ocorrer na carga máxima (F_m), a propagação instável de trinca não se dá de forma instantânea, devido a certa ductilidade que o material apresenta. Como apresentado por Tetleman e Mcevily [apud 1], ao invés disso, existe a propagação estável da trinca através do coalescimento de microtrincas, consumindo energia até que o balanço energético seja favorável para o início da propagação instável (F_{bf}), quando se torna favorável a geração de duas novas superfícies. Essa porção de propagação estável de trinca é definida pela diferença de trabalho entre as cargas F_m e F_{bf} e, na superfície de fratura, está contida na RIF.

A região II, que apresenta queda brusca de carga com o deslocamento iniciando na carga F_{bf} e finalizando na carga F_a , é uma porção de fratura frágil, onde a liberação de energia elástica devido a propagação da trinca torna favorável a geração de duas novas superfícies, ocasionado a fratura catastrófica apresentada nessa região na superfície de fratura.

A região III representa o consumo de energia para o final de fratura. Essa etapa de fratura tem caráter dúctil e fratura de forma estável, assim deve ser separada da porção de propagação instável de trinca para realização da avaliação, uma vez que representa, além de outro comportamento de fratura, uma outra porção na superfície de fratura. A figura 7 ilustra essas regiões em um esquema da superfície de fratura de um CP.

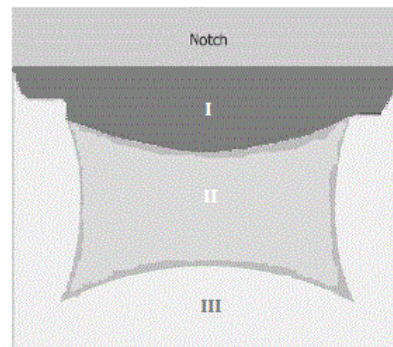


Figura 7. Esquema ilustrativo das regiões na superfície de fratura.

Fonte: O autor

O trabalho está focado na discussão das áreas de RIF e de propagação instável de trincas, uma vez que podemos facilmente definir as áreas de superfície de fratura referentes à essas regiões e essas representam cerca de 84% de toda energia consumida na fratura, assim a região de final de fratura não será discutida nesse trabalho. Com as grandezas obtidas, extraíram-se a energia consumida na RIF ($E_{RIF} - E_I$), e a energia consumida na propagação instável da trinca ($E_{uf} - E_{II}$). As médias e desvios padrões para as energias obtidas podem ser observados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Tabela 3. Média e desvio padrão para os valores de energia

Estimador	E_{RIF} (kN)	E_{uf} (kN)	W_t (kN)
Média	70,15	7,69	92,96
Desvio Padrão	21,58	1,16	25,73

A média dos valores de energias consumidas na propagação instável de trinca (E_{uf}) são pequenos quando comparadas com a energia total consumida na fratura e na região de início de fratura (E_{RIF}). Abaixo segue a discussão do consumo de energia e superfície de fratura para essas etapas da fratura.

3.1 Região de início de fratura (RIF)

Essa região é composta pelo comportamento plástico, em que ocorre a nucleação de trinca, e pela etapa de propagação estável de trinca, sendo graficamente representada pela área abaixo da curva na figura 8.

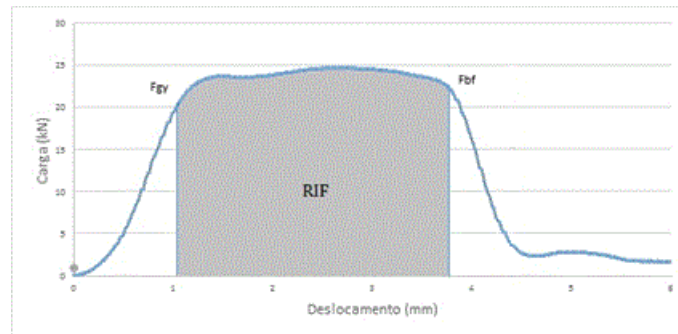


Figura 8. Gráfico carga-deslocamento demonstrando a maior área abaixo da curva, referente a RIF.

Essa etapa apresenta o maior percentual de consumo de energia da fratura, como pode ser observado na tabela 3, sendo o consumo de energia, em média 75% de toda energia consumida na fratura. A área abaixo da curva apresentada na figura 8 também corrobora com esse resultado, uma vez que cobre a maior parte da curva.

Essa região fica definida como a porção de nucleação de trinca mais a porção de propagação estável de trinca. Este fato se deve pois, após a nucleação de trinca, essa se propaga de forma estável, fazendo com que ainda prossiga a deformação de caráter dúctil na fratura, fazendo com que essa região fique contida dentro da região dúctil presente na RIF. Assim, a RIF é uma região que sobrepõe as regiões de iniciação e propagação de trinca. Subtraindo-se a energia para o escoamento da energia absorvida até o início da propagação instável de trinca (energia na absorvida na carga F_{bf}), têm-se a maior parte de energia consumida na fratura. O consumo de energia referente a propagação estável de trinca representa cerca de 44 % do consumo de energia na RIF. O restante da energia consumida é devido a nucleação de trinca durante a deformação plástica. A figura 9 ilustra a proporção entre esses consumos de energia na RIF.

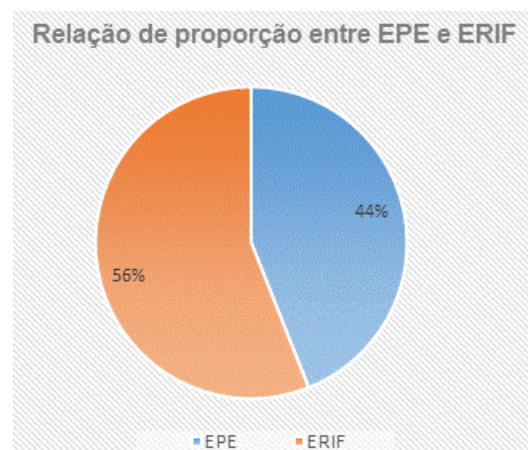


Figura 9. Relação proporcional entre consumo de energia na propagação estável de trinca (EPE) e energia consumida na RIF (ERIF).

O consumo de energia nessa etapa ocorre devido à deformação plástica apresentada na região I da figura 7, sendo regida pelo movimento de discordâncias na estrutura. Ao avaliar a superfície de fratura através de análise de imagem simples, nota-se que a área mensurada nessa região não representa a maior área de superfície de fratura na superfície do CP, a área representa cerca de 17% de toda área da superfície de fratura. Essa observação leva a uma conclusão equivocada, na qual a maior energia consumida não está correlacionada a maior área deformada. Esse equívoco se deve ao fato da superfície de fratura da RIF possuir aspecto fibroso, com picos e vales. Ou

seja, é provável que se fosse considerada a área de superfície seguindo as variações de nível apresentado na superfície, possivelmente se teria uma área maior nessa região. Essa diferença entre área aparente e a área real é uma limitação da medida de área da superfície de fratura ao se fazer uma análise de duas dimensões, como um uma análise de imagem simples.

3.2 Propagação instável de trinca

A porção de propagação instável de trinca se apresenta na superfície de fratura do corpo de prova com fratura frágil, tendo início nas marcas radiais, sendo de fácil visualização na superfície de fratura do corpo de prova. Essa etapa consome considerável menos energia do que a etapa de propagação estável de trinca, contida na área da RIF. A figura 10 apresenta a relação proporcional entre os consumos para dessas etapas em relação a energia consumida na etapa total de propagação de trinca. Aproximadamente 26% da energia consumida na propagação de trinca é absorvida na etapa de propagação instável. O restante da energia (aproximadamente 74%) é consumido na propagação estável.

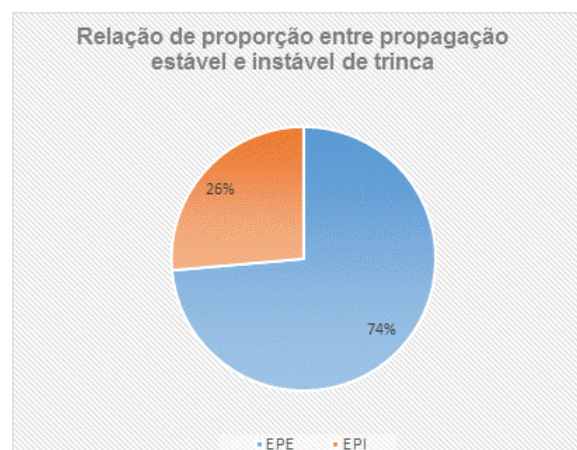


Figura 10. Proporção da energia consumida entre a propagação estável e instável de trinca.

A propagação instável de trinca possui baixo consumo de energia devido ao caráter frágil do fenômeno. Nessa etapa, a trinca já nucleada, propaga com velocidade alta pela estrutura do material. Graficamente pode ser observado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, uma queda acentuada de carga após F_{bf} . A energia elástica liberada pela propagação de trinca nessa etapa é maior que a energia necessária para criação de duas novas superfícies, tornando energeticamente favorável a propagação. Possivelmente, a gradiente entre a liberação de energia elástica e a energia para criação de novas superfícies deve influenciar a velocidade de propagação da trinca, ou seja, quanto maior a diferença entre energia elástica a liberar e energia para criação de novas faces, maior será a velocidade de propagação. Quando se analisa o percentual de consumo de energia em relação a energia total consumida na fratura, a energia consumida na propagação instável representa apenas 9% do consumo de energia na fratura. A figura 11 ilustra a proporção do consumo de energia nessa etapa com a energia total absorvida na fratura.

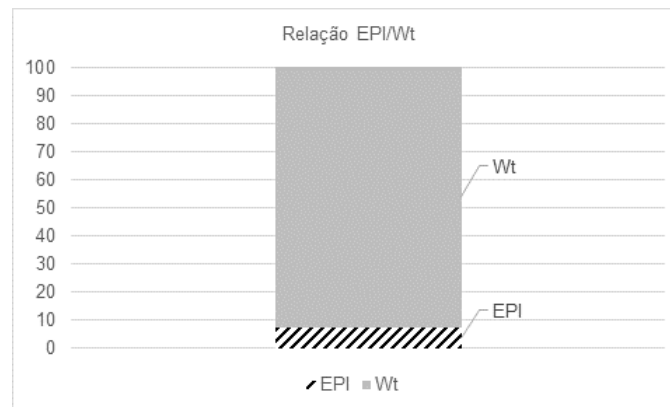


Figura 11. Proporção da energia consumida entre a propagação estável e instável de trinca.

Na superfície de fratura mensurada, essa etapa representa na média cerca de 50% de toda a superfície de fratura, apresentando maior área do que a RIF. A fratura nessa etapa é de caráter frágil e não apresenta aspecto fibroso, como na RIF. Assim, ao contrário da área da RIF, não apresenta as cavidades do tipo “dimples” com certa profundidade e que caracterizam uma área aparente (área visualizada em duas dimensões) diferente da área real. Nessa região, o aspecto da fratura é de uma superfície menos acidentada, com a área de superfície aparente se aproximando mais da área de superfície real. O trabalho realizado nessa etapa, com menor caminho na superfície da fratura para percorrer, representa uma menor energia consumida do que a apresentada na RIF. Assim, mesmo aparentemente tendo maior área superficial, essa etapa representa pouco consumo de energia e menor caminho percorrido durante a deformação associada.

4 CONCLUSÃO

A RIF foi a região com maior quantidade de energia consumida na fratura. Em média cerca de 75% da energia consumida foi consumida nessa etapa, que compreende a região elástica, a nucleação da trinca e a propagação estável de trinca.

A propagação estável de trinca foi responsável por aproximadamente 44% da energia consumida na RIF, ou seja, aproximadamente metade da energia consumida, demonstrando que esse fenômeno não deve ser descartado em um estudo de tenacidade. A nucleação de trinca foi responsável pela outra metade do consumo de energia.

A região de propagação instável da trinca representa apenas 9% do consumo total de energia da fratura e cerca de 26% da energia consumida na etapa de propagação de trinca, consolidando-se como uma etapa catastrófica e com pouquíssimo consumo de energia quando comparado com as outras etapas. Essa conclusão corrobora com a teoria e demonstra que a fratura frágil é a etapa que consome menos energia no processo de fratura.

As áreas de superfície visualizadas não apresentam uma aproximação real do fenômeno. Ao quantificar as superfícies das regiões de fratura utilizando análise de imagens, com simples medida de superfície pelos contornos das regiões, a área de RIF aparentemente é menor ou muito próxima da área de propagação instável de trinca. No entanto, na região de RIF existe formação de “dimples”, cavidades com certa profundidade, que caracterizam um maior caminho a ser percorrido pela deformação, e proporcionam uma maior execução de trabalho. Então, a análise da área pela simples medida de área realizada através dos contornos da superfície obtida

mostra-se uma forma a ser desenvolvida, para permitir conclusões mais próximas da realidade dos consumos de energia no processo de fratura.

Agradecimentos

Agradecimento à Gerdau Aços Especiais por disponibilizar os materiais e apoio à apresentação do trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Dieter, George E. Mechanical Metallurgy. Singapura: McGraw-Hill Book Company;1988.
- 2 Marco Antônio Dutra Quinan, Ernani Sales Palma. Ensaios de Impacto Instrumentados. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. 1997 [acesso em 12 dez. 2016]. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/1997/ENFIR/R07AD.PDF>.
- 3 ASTM E23: Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohoken, PA, USA: ASTM International; 2016.
- 4 Zeljko Alar, Davor Mandic, Andrija Dugorepec, Matija Sakoman. Application of Instrumented Charpy Method in Characterisation of Material. Interdisciplinary Description of Complex Systems. 2015:479-487.
- 5 Shigeto Takebayashi, Kohsaku Ushioda, Naoki Yoshinaga, Shigenobu Ogatta. Effect of Carbide Size Distribution on the Impact Toughness of Tempered Martensitic Steels with Two Different Prior Austenite Grain Sizes Evaluated by Instrumented Charpy Test. Materials Transactions. 2013;7:1110-1119.
- 6 Grupo de Pesquisa em Solidificação da FEM-Unicamp [página da internet]. Campinas: FEM-Unicamp, 2014 [acesso em 25 nov. 2016]. Disponível em: <http://www.gps.dema.fem.unicamp.br/site/index.php/ensino/category/1-curso-em-641-ensaios-dos-materiais#>.
- 7 Guide for the Certification of Offshore Mooring Chain. Houston, Texas, USA: American Bureau of Shipping; 2009.
- 8 ASTM E 2298-09. Standard Test Method for Instrumented Impact Testing of Metallic Materials. West Conshohoken, PA, USA: ASTM International; 2009.