Unisanta Science and Technology, **2020, 1, August**
Published Online 2020 Vol.9 N°1 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Descrição da Tenacidade por Impacto Charpy ao Redor de Juntas Soldadas de Aço Estrutural e Simulação de suas Curvas Dinâmicas Força x Tempo

Willy Ank de Morais[1,2], Aluizio Cugler dos Santos[1], Audrey Duarte de Santa'ana[1], Bruna Rodrigues dos Santos[1], Caio Nunes Ferreira Marguerito[1], Luiz Felipe Passos Mathias[1]

[1]**UNISANTA** – Universidade Santa Cecília – Faculdade de Engenharia – Graduação em Engenharia Mecânica
Rua Oswaldo Cruz, 266 - Santos-SP, Brasil - CEP: 11045-100

[2]**WILLY ANK SOLUÇÕES** – Departamento Técnico
Rua Onze de Junho, 312 A.102 - São Vicente-SP, Brasil- CEP: 11320-160

E-mail*:* willyank@unisanta.br
Received June, 2020

Resumo: Este trabalho apresenta uma descrição quantitativa dos valores de tenacidade ao entalhe por impacto em torno de juntas soldadas, como forma de melhor avaliar o desempenho e a confiabilidade deste tipo de união, amplamente utilizado em estruturas de aço e vasos de pressão. Para obter uma análise mais abrangente, empregou-se a energia absorvida e também a relação entre as diferentes morfologias fractográficas dos corpos de prova testados. Com base na análise fractográfica dos corpos de prova, foram simuladas curvas força versus tempo para o ensaio Charpy, que servem para descrever melhor os resultados obtidos nestes ensaios. Os dados analisados foram obtidos a partir de corpos de prova padrão (10×10×55 mm), usinados a diferentes distâncias em relação à linha central da solda, de modo a permitir obter uma varredura quantitativa do desempenho mecânico pontual do aço ao redor da união soldada.

Palavras chave: Tenacidade ao Entalhe; Ensaio Charpy; Aço Estrutural; Integridade Estrutural.

Description of the Charpy Impact Toughness Around Welded Joints and Simulation of their Force x Time Dynamic Curves

Abstract: This work presents a quantitative description of the impact notch toughness values around welded joints as a way to better evaluate the performance and reliability of this type of union, widely used in steel structures and pressure vessels. To obtain a more comprehensive analysis, It was used the absorbed energy and the relationship between the different fractographic morphologies from the specimens. Based on fractographic analysis of the specimens, force versus time curves were simulated for the Charpy test, which serve to better describe the results obtained in these tests. The analyzed data were obtained from standard specimens (10×10×55 mm), machined at different distances from the weld centerline, in order to allow a quantitative scan of the punctual mechanical performance of the steel around the joint welded.

Keywords: Notch toughness; Charpy test; Structural Steel; Structural Integrity.

1. Introdução

A maioria das estruturas em aço são fabricadas e/ou montadas através de operações de soldagem, que causam um certo impacto nas características microestruturais e no desempenho mecânico dos componentes estruturais soldados [1 e 2]. Esta alteração de caraterísticas pode levar a uma degradação progressiva ou intensificar a severidade de eventos de degradação, especialmente em

Copyright © 2020 ISESC.

condições adversas de carregamento mecânico ou ambientais [1 e 3].

Assim sendo, o estudo e a compreensão da tenacidade dos materiais em engenharia são condições muito importantes no que se diz questão ao nível de confiabilidade em máquinas, estruturas e equipamentos [4]. Através da quantificação correta e representativa da tenacidade [5 e 6], torna-se possível selecionar o material e as características adequadas que farão com que os componentes do equipamento funcionem.

Dentro deste contexto, torna-se relevante o uso do ensaio de tenacidade ao entalhe por impacto Charpy [4 e 5], para quantificar o desempenho de um material em condições que lhe impõe uma grande fragilização. A justificativa no uso de tais ensaios está intimamente relacionada com o conceito de mecânica da fratura [7 e 8], que, conforme abordado por Callister e Rethwisch [9]: "uma tensão de tração que esteja sendo aplicada é amplificada na extremidade de um pequeno rasgo ou entalhe".

Portanto, a quantificação do efeito de entalhes mecânicos, em condições adversas de impacto, permite realizar um melhor controle de qualidade e avaliar a confiabilidade de materiais em aplicações estruturais [7 a 10]. Para essas situações, alguns códigos e normas foram elaborados com o intuito de garantir a operação destes ativos mesmo com tais defeitos identificados.

Neste caso, pode-se citar o código API 579 [10], desenvolvido em 2001 com o objetivo de avaliar, em diferentes níveis de complexidade, a adequação de equipamentos ao serviço, além de promover uma otimização indireta nos planos de manutenção e vida útil de uma planta industrial.

1.1 O Ensaio Charpy

O ensaio Charpy é uma das técnicas de ensaio por impacto, utilizado para determinar a característica de fratura do material. O teste foi criado para determinar a energia de impacto que o material sofre, ou seja, o quanto de energia o material absorve ao ser atingido. O método tem o intuito de entender o comportamento do material, se tornando uma importante ferramenta de estudo sobre sua propriedade frágil/dúctil. É um teste muito importante para indústria devido ao rápido resultado que se obtém, além de ser fácil de se realizar [5 e 6].

Para a execução do teste, é utilizado um corpo de prova (CP) em forma de barra, com seção transversal quadrada (10×10 mm), onde é feito um entalhe em "V", "U" ou *key-hole*. Há também a possiblidade de realizar ensaios sem entalhe, para materiais mais frágeis [5 e 6]. A Figura 1 apresenta uma esquematização ilustrada do corpo de prova com entalhe e do ensaio Charpy [9].

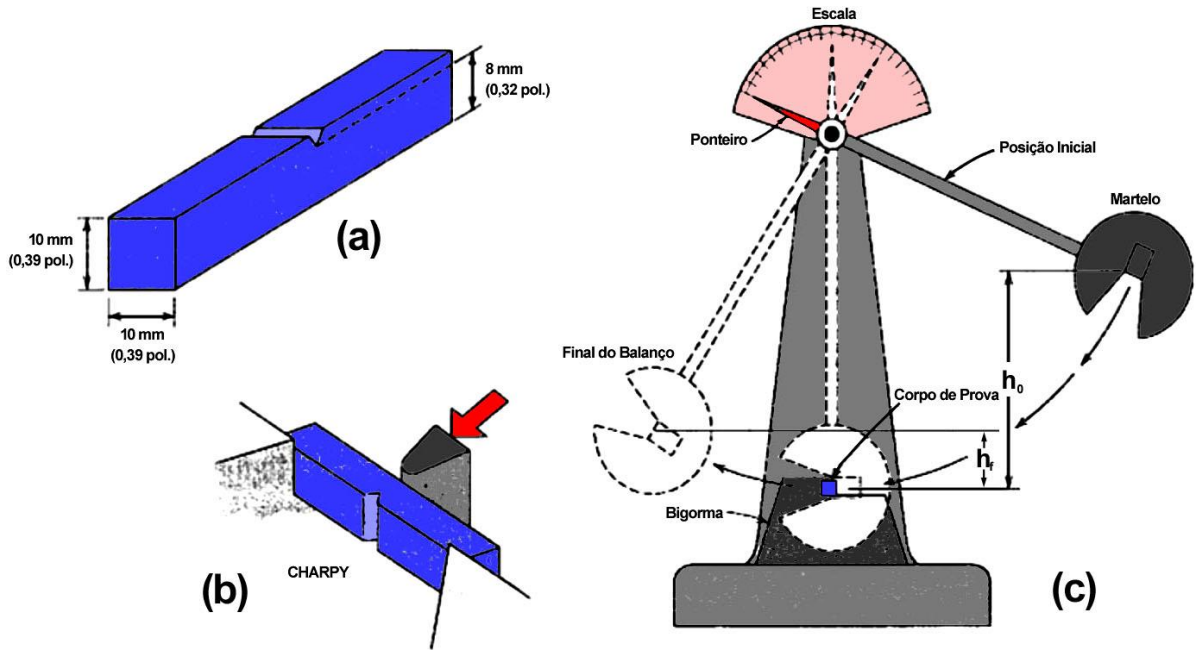


Figura 1. Ensaio de tenacidade ao entalhe por impacto Charpy: (a) Corpo de prova com entalha em "V" utilizado no ensaio Charpy, (b) Corpo de prova posicionado e preparado para o ensaio de impacto, (c) Ilustração do martelo pendular, equipamento utilizado no ensaio de impacto Charpy [9].

Copyright © 2020 ISESC

Sabe-se que em uma superfície, ou em chapas muito finas, não atuam tensões normais, condição que gera estado de tensões plano (TP) [4, 7 e 8]. À medida que a espessura é aumentada, induz-se estados complexos de tensões, em deformação plana (DP), diminuindo a tenacidade aparente, conforme ilustrado pelos dados da Figura 2. Portanto, a espessura torna-se relevante para a determinação da tenacidade dos materiais com certa plasticidade, dando-se preferência nesses ao uso de CPs mais espessos, nos quais os resultados de tenacidade são mais conservadores (menores).

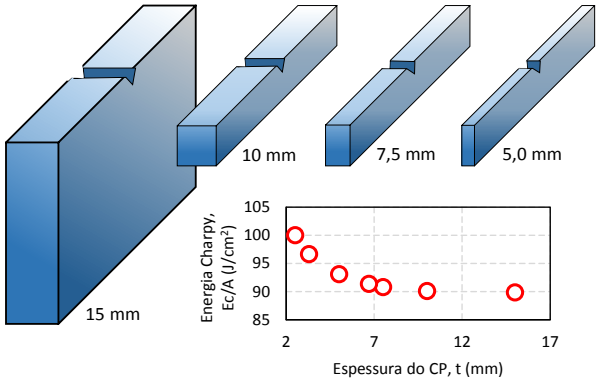


Figura 2. Ilustração do efeito do tamanho dos corpos de prova na determinação da tenacidade. Caso a espessura dos CPs não influenciasse nos resultados, o valor da energia para fratura (tenacidade) seria constante com a área, o que não ocorre [6].

Existem outras variáveis que influenciam no resultado final do teste além das dimensões dos corpos de prova. Dentre estas variáveis, podem ser citadas [6 e 9]: a direção (longitudinal, transversal ou intermediária) e a posição (superfície, centro, lateral, etc.) de retirada do corpo de prova do material ou componente a ser avaliado, assim como a geometria do entalhe usinado (em "V", "U", *keyhole* ou mesmo sem entalhe).

Os resultados do teste ainda podem ser classificados como quantitativos ou qualitativos.

- Os resultados quantitativos descrevem a capacidade de absorção de energia à fratura, e pode ser usado para inferir a tenacidade do material.
- Já os resultados qualitativos podem ser utilizados para determinar a ductilidade do material. Se há quebra de material de uma superfície plana, a fratura é frágil, e se houver presença de deformação plástica a fratura é proporcionalmente dúctil à fração de área deste tipo de superfície.

1.2 Instrumentação do Ensaio Charpy

A instrumentação da máquina de ensaio Charpy tem ocorrida a quase meio século [7, 11 e 12], como uma tentativa de se obter respostas do ensaio que fossem aplicadas junto aos resultados obtidos na mecânica de fratura, assim ajudando a determinar a tenacidade dinâmica a fratura (K_{ID}). No início, acreditava-se que a o K_{ID} poderia ser obtido por meio do carregamento de uma fratura estática através do impacto, por meio de um pêndulo Charpy (vide Fig. 1). Essa linha de raciocínio baseava-se na crença de que a taxa de incremento do fator de intensidade de tensões (K) de uma trinca estática era idêntica à de uma trinca em propagação, bem como o comportamento do material. Sendo assim, poder-se-ia obter comportamento de propagação de uma trinca pela seguinte equação [7]:

$$\sigma = \sqrt{\pi * a} \qquad (1)$$

Na qual: a = comprimento da trinca em propagação e
σ = tensão aplicada sobre a trinca.

Esse parâmetro não seria aplicável ao material pelo fato de que os dados retirados de uma trinca estática não possuem uma relação direta com trincas em propagação. Por isso, foram disponibilizados alguns métodos para a avaliação do K_{ID}, sendo o mais utilizado o ensaio Charpy instrumentado.

O ensaio Charpy instrumentado já vinha sendo empregado desde a década de 1970, quando em 1977, o pesquisador Ireland [11] decidiu estudar com maior profundidade o comportamento dos materiais submetidos ao impacto. Mesmo assim, a instrumentação da máquina de Ensaio Charpy só foi realmente introduzida ao meio científico nas últimas décadas [12]. Adicionalmente, foi somente no início dos anos 2000 que surgiu a primeira norma técnica sobre o Charpy instrumentado, a ISO 14.556 [13]. Por ser um assunto relativamente recente, existem poucos pesquisadores, especialmente no Brasil [11 e 12], que tenham conhecimento pleno sobre esse assunto, e que tiverem a oportunidade de validar os procedimentos da norma [13]. Porém, a possibilidade de um uso mais eficaz do ensaio Charpy ainda se mostra atraente.

A instrumentação desde ensaio permite a geração de uma gama informações adicionais, em relação ao ensaio convencional, tornando-se de grande valia para a engenharia de materiais. A forma de instrumentação mais comum é dada através de extensômetros elétricos no martelo pendular, que irão funcionar como um elemento sensitivo para o comportamento da força em função do tempo de deformação e da fratura do corpo de prova (CP) que está em ensaio [11 e 12].

Copyright © 2020 ISESC

Durante o ensaio é costumeiro o aparecimento de oscilações na curva força × tempo registrada durante o ensaio, como ilustradas na Figura 3 [14]. Estas oscilações, que são captadas pelo extensômetro acoplado ao martelo do equipamento, são apontadas por Ireland [15] em sendo oriundas de uma combinação entre:

- a resposta do CP diante da carga de impacto,
- as forças de inércia devido a aceleração do CP,
- as flutuações de baixa frequência e
- ruídos de alta frequência é a explicação para o sinal obtidos pelo extensômetro que estão acoplados ao martelo.

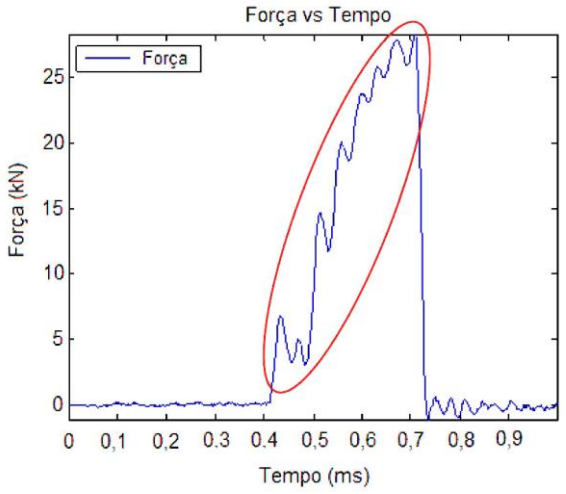


Figura 3. Oscilações normalmente verificadas em ume ensaio Charpy instrumentado [14].

A oscilação na força de contato entre o martelo pendular e o corpo de prova requer um intervalo de tempo entre 2τ a 3τ para ser reduzida a níveis aceitáveis [15]. Neste caso, τ o período das oscilações que pode ser descrito pela equação:

$$\tau = 3{,}36\left(\frac{W}{So}\right)[EBCs]^{\frac{1}{2}} \qquad (2)$$

Na qual: S_0 = Velocidade do som no corpo de prova;
W = Largura do corpo de prova;
B = Espessura do corpo de prova;
E = Módulo de elasticidade longitudinal;
C_S = Flexibilidade do corpo de prova.

A Figura 4 ilustra o comportamento das curvas força × tempo em função da temperatura para um aço comum de resistência mecânica média [11]. A Figura demostra os estágios do processo de fratura, que podem ser identificados devido à instrumentação. Por exemplo, o parâmetro W_M representa o valor da energia absorvida, e pode ser representado pela área sob a curva força × tempo até o carregamento máximo P_M. Outros parâmetros que podem ser retirados do gráfico estão apresentados na legenda da Figura 4

Através da lei de movimento de Newton, pode-se converter o valor de pulso em energia, considerando a dissipação da energia cinética do pêndulo durante o processo de deformação e posterior fratura. A velocidade decrescente do pêndulo é proporcional à força instantânea aplicada ao corpo de prova conforme:

$$\Delta E = Ea\left[1 - \left(\frac{Ea}{4Eo}\right)\right] \qquad (3)$$

Na qual: E_a = Energia para causar a fratura do CP;
E_0 = Energia cinética total do pêndulo e
ΔE = Energia absorvida.

2. Materiais e Métodos

O material adotado para o estudo e elaboração deste trabalho foi o aço carbono ASTM A36, de aplicação estrutural e fabricada pela CSN. Tal aço, conforme o código ASME BPVC II, compõe parte do grupo dos materiais que podem ser utilizados para a confecção de vasos de pressão. Foram utilizadas quatro chapas de aço laminadas a quente com ½ polegada (12,7 mm) de espessura, cortadas aproximadamente com 300 mm de comprimento e 200 mm de largura, de modo a serem unidas pelo seu comprimento. A principais características destas chapas de aço estão apresentadas na Tabela 1.

Para preparar as chapas para a soldagem, foram usinados chanfros em "V" nas extremidades laterais a serem unidas pelo processo de soldagem. Essa operação foi efetuada por meio de um corte em ângulo de 60°, sendo também feito um espaçamento de 3mm na raiz da junta entre as partes que serão unidas.

Para o início da análise, as quatro chapas foram selecionadas aleatoriamente e formou-se dois pares de amostras, designadas A e B, com dimensões aproximadas de 400 × 300 mm. Ambos conjuntos foram firmemente fixados para evitar empenos durante a operação de soldagem e submetidos a um pré-aquecimento na região das juntas, sendo tal atividade executada por meio da utilização de um maçarico alimentado por uma mistura de oxigênio com acetileno. Com o auxílio de um termômetro infravermelho industrial, obteve-se uma temperatura média de 120 ºC.

O método de soldagem utilizado foi o *SMAW* (*Shielded Metal Arc Welding*), empregando uma mistura de CO_2 e Ar como atmosfera de proteção. Como metal de adição, empregou-se o consumível SFA/AWS A5.1 E7018 com 2,5 mm de diâmetro. As propriedades físicas, bem como sua composição química típica estão apresentadas na Tabela 1.

Copyright © 2020 ISESC

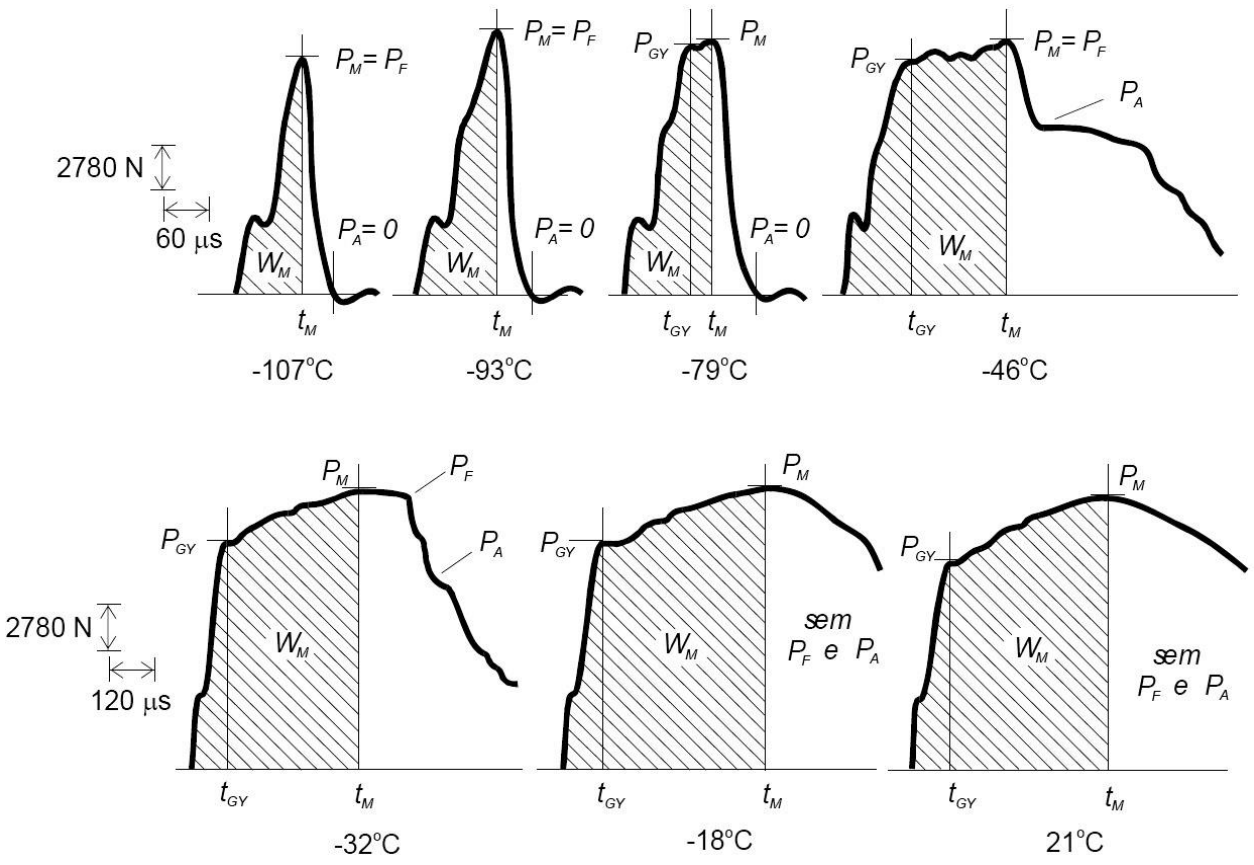


Figura 4. Exemplos de curvas força × tempo registradas através de ensaios Charpy instrumentados aplicado a amostras de aço estrutural típico, nas quais:

P_M	Carga máxima	t_M	Tempo para carga máxima
P_{GY}	Carga de escoamento geral	t_{GY}	Tempo para escoamento geral
P_F	Carga para fratura rápida	W_M	Energia absorvida até a carga máxima
P_A	Carga de retardo dúctil da trinca, após propagação frágil rápida		

Tabela 1. Composições químicas e características mecânicas dos materiais empregados.

Material	%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Al	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo	E_{Chapy} [J] (2 "V")	S_{LE} [MPa]	S_{LR} [MPa]	%Along.
ASTM A36[(1)]	0,16	0,69	0,015		0,020	0,045	0,013	0,016	0,022	<0,01	n.d.	324	457	29,9[(3)]
E7018[(2)]	0,07	0,9	0,5	n.d.							110 @-30°C	460	580	28[(4)]

Obs.: (1) dados do certificado do fabricante (CSN), condição laminado a quente. (2) dados do fabricante (Würth), condição típica do metal depositado. (3) Padrão ASTM E8M com L_0=200mm. (4)

Copyright © 2020 ISESC

A soldagem foi realizada em etapas sucessivas, ou seja, com passes múltiplos em várias camadas, sempre com as chapas firmemente fixas, conforme ilustra a Figura 5. A Amostra A foi obtida pela união constituída por um total de 11 passes e a Amostra B foi unida com apenas 5 passes. Essa diferença no número de passes para a união das chapas será abordada na etapa de análise dos resultados da análise de dureza.



Figura 5. Visualização da condição de travamento das chapas de aço, utilizada durante todo o procedimento de soldagem até o resfriamento do conjunto.

Após soldadas, ambas as amostras passaram por um processo de resfriamento natural, com as amostras ainda travadas (vide Fig. 5), com o intuito de evitar o empeno das chapas. Mesmo seguindo os procedimentos e permitindo o resfriamento natural das chapas, ainda que travadas em seus respectivos suportes, o processo de empeno ocorreu. Como alternativa para realizar o realinhamento, optou-se por realizar um passe de solda do lado oposto das amostras, com o objetivo de reforçar a penetração do passe de raiz e promover uma contração inversa nos objetos, permitindo um realinhamento das chapas pelo reequilíbrio das tensões residuais.

Posteriormente ao processo de soldagem, foi necessária a realização do corte das chapas. Primeiramente foram realizaram-se dois cortes transversais por guilhotina de modo a limitar as dimensões do material a 300×200 mm, conforme mostrado na Figura 6.a, de modo a permitir a finalização dos cortes em serra automática, ilustrada na Figura 6.b. Após o corte na guilhotina, realizou-se o esmerilhamento na região da solda, afim de melhorar o acabamento e a identificação das juntas por ataque macrográfico. Após isso realizaram-se mais 15 cortes longitudinais de modo que ao final desta operação foram obtidas 15 peças com uma seção reta aproximadamente quadrada de 13×13 mm com 200 mm de comprimento, ilustrados na Figura 6c. Estas 15 peças, foram identificadas e destas foram cortados e usinados corpos de prova Charpy em posições variadas em relação à linha de solda.

A preparação final dos corpos de prova Charpy foi feita, com os CPs alinhados sempre na direção transversal à laminação das chapas, usinando os entalhes em duas posições para os CPs no MB, conforme ilustradas na Figura 7, e para a posição transversal-longitudinal para CPs contendo ZTA ou ZF. Tal configuração gera resultados mais conservadores de energia Charpy [7, 8 e 9].

O ensaio de Charpy foi realizado no Centro de Desenvolvimento Tecnológico da General Motors do Brasil, localizada na cidade de São Caetano do Sul (SP). Os ensaios foram realizados a temperatura ambiente de 17,5°C em uma máquina de ensaio Charpy da marca INSTRON, modelo 450MPX (V2).

Com base no ilustrado na Figura 8, a curva força × tempo, obtida em um ensaio Charpy instrumentado, está associada à cada região de fratura observada no CP [6]. Considerando que a área total da curva é proporcional à Energia Absorvida, torna-se possível criar um modelo que simule esta curva, empregando-se como parâmetro de entrada, a área dúctil inicial ($\%AD_0$), área frágil (%AF) e área dúctil final ($\%AD_F$) ou de zona cisalhante.

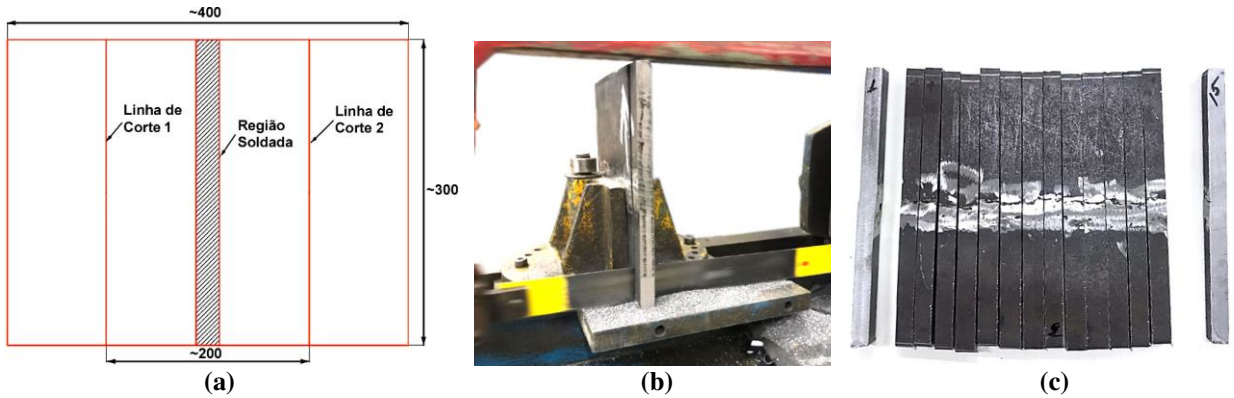


Figura 6. Corte nas amostras soldadas: (a) dimensões do corte transversal em guilhotina; (b) etapa de corte por serra alternativa e (c) peças finais com dimensões aproximadas 13×13×200 mm.

Copyright © 2020 ISESC

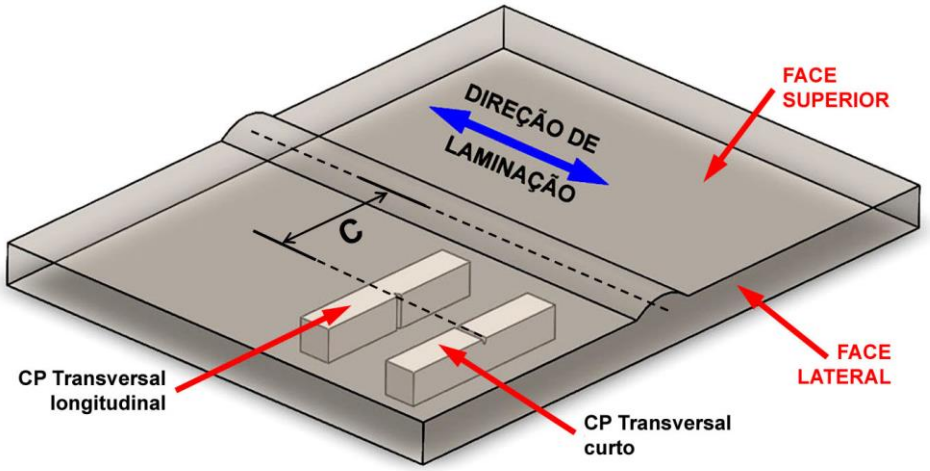


Figura 7. Posicionamento dos CPs e entalhes em relação à linha central de solda. Os CPs foram posicionados na com os entalhes a uma distância *C* da linha de solda, nas posições transversal-curto e transversal-longitudinal.

Para a análise macrográfica, todas as amostras foram atacadas quimicamente em uma capela utilizando o reagente Nital 10%, através da utilização do método de fricção com algodão. Depois de atacados, os corpos de prova foram analisados a olho nu com o intuito de identificar as zonas termicamente afetadas, a solda e o metal base dos mesmos. A macrografia possibilitou a medição da distância entre o meio da solda e o meio do corpo de prova (entalhe). Este parâmetro, ilustrado na Figura 7 e denominado C foi empregado para individualizar a identificação de cada corpo de prova de modo a permitir associar seus resultados com a sua posição relativa à solda depositada. Assim a identificação final de cada CP contém:

1. a amostra, A ou B, fabricada com 11 ou 5 passes de solda, respectivamente;
2. o número da tira (peça) empregada (n = 1 a 15) e
3. o valor da posição relativa da linha de solda (*C*) valendo 35 mm para CPs só com MB.

Finalmente, realizou-se a medição da dureza Rockwell na escala B (HR_B), que emprega uma carga de 100 kgf e esfera de aço duro com 1/16 polegada de diâmetro, através de um durômetro Wolpert, presente no Laboratório de Metalografia da Universidade Santa Cecília.

As medições de dureza foram feitas na parte central das principais regiões dos corpos de prova soldados: metal base (MB), zona termicamente afetada (ZTA) e zona fundida (ZF). Para os corpos de prova de metal base, foram realizadas três medições em pontos diferentes da face lateral e face superior (vide Fig. 7), a fim de medir a variação dos resultados encontrados nestas faces.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 2 apresenta os resultados das medições de dureza HR_B nas chapas de aço ASTM A36, nas faces lateral e superior das amostras A e B. Os valores de dureza na face lateral tendem a apresentar menores valores de dispersão quando há um número maior de regiões de medição (8 para a amostra A contra apenas 3 para a amostra B), indicando uma maior homogeneidade microestrutura da face lateral do produto laminado a quente, o que é esperado pela literatura [7 e 8].

Tabela 2. Resultados das medições de dureza no MB.

Amostra		Face lateral			Face Superior		
		#1	#2	#3	#1	#2	#3
A	1	57	59	64	61	70	68
	3	64	65	66	64	67	64
	5	69	69	70	62	65	64
	7	65	66	68	52	62	65
	9	69	7	69	64	67	64
	11	69	69	69	64	72	64
	13	68	70	69	68	67	63
	15	65	72	68	64	72	64
B	4	71	89	78	64	90	69
	9	65	66	65	64	69	66
	14	66	63	63	63	60	60
		Média	Desv.	CV%	Média	Desv.	CV%
A	todas	64	13	20%	65	4,0	6%
B	todas	70	8,7	12%	67	9,1	14%

Obs.: CV% é o Coeficiente de Variação (%Desvio/Média).

Copyright © 2020 ISESC

Os corpos de prova Charpy próximos à região da solda e que apresentam ZTA ou ZF, segundo revelado pela macrografia (com Nital a 10%), tiveram os valores de dureza testados apenas na face lateral, nas três regiões da união soldada: MB, ZTA e ZF. Os resultados destas medições de dureza estão apresentados na Tabela 3.

A tendência observada nos dados da Tabela 3 são coerentes com as condições do material após a soldagem. As juntas obtidas com mais passes (A) apresentam menores valores de CV% e nota-se uma diferença entre as durezas do metal de adição E7018 e do aço ASTM A36 (ZTA), ao se comparar os resultados no MB e na ZF.

Charpy. Os gráficos da Figura 8 apresentam estes resultados e as fotos da Figura 9 apresentam as superfícies de fratura analisadas. Através dos gráficos da Figura 8 é possível perceber que ao se afastar da linha de solda, ocorre diminuição da energia absorvida até um mínimo em torno de 10 mm. Nesta mesma posição, referenciando-se aos dados apresentados pela Tabela 4, os valores de %área dúctil total (%AD_0 + %AD_F) chegam aos valores mínimos entre 45 a 65% confirmando ser a região de menor resistência à fratura do material. À medida que o afastamento da linha de solda vai aumentando, tanto os valores da energia quanto da área

Tabela 3. Resultados das medições de dureza nos CPs Charpy contendo as três regiões de solda.

	Amostra	MB	ZTA	ZF
A	2	70	82	96
	4	74	83	100
	6	67	84	97
	8	66	84	93
	10	67	88	96
	12	67	82	97
	14	63	83	98
A	**Média**	**68**	**84**	**97**
	Desvio	**3,5**	**2,1**	**2,1**
	CV%	**5%**	**2%**	**2%**

	Amostra	MB	ZTA	ZF
B	1	67	80	94
	3	68	90	99
	5	68	81	99
	6	66	82	100
	7	68	81	99
	8	58	79	99
	10	68	81	99
	11	64	92	99
	12	66	80	114
	13	65	87	97
	15	68	79	98
B	**Média**	**66**	**83**	**100**
	Desvio	**3,0**	**4,6**	**5,0**
	CV%	**5%**	**6%**	**5%**

Obs.: CV% é o Coeficiente de Variação (%Desvio/Média).

Foram avaliados apenas 11 corpos de prova para fazer a varredura das características da junta soldada. Os CPs foram escolhidos de forma a se distribuírem de melhor forma ao redor da linha de solda, oferecendo uma descrição da tenacidade ao entalhe por impacto Charpy ao seu redor. O restante dos CPs será empregado para ensaios em máquina Charpy instrumentada para validar, posteriormente, os resultados simulados das curvas força × tempo mostradas no presente estudo.

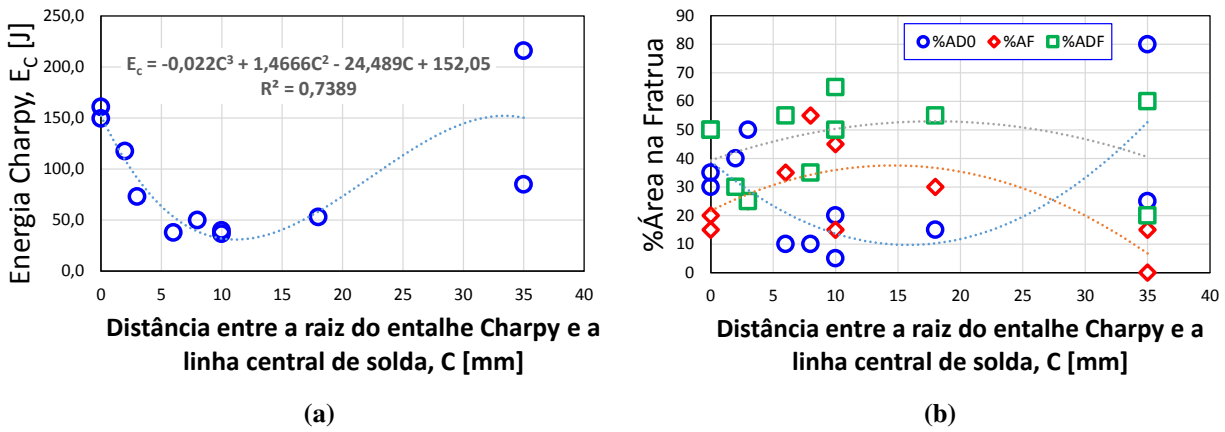
Para a realização do ensaio Charpy, os corpos de provas foram separados aleatoriamente em duas sequências. A primeira sequência contendo 6 corpos de prova e a segunda sequência com os 5 CPs, ambas as sequências com CPs oriundos da Amostra A e B (fabricada com 11 e 5 passes de solda, respectivamente). Os resultados da Energia Charpy, em Joules, e do percentual dos três tipos de superfícies de fratura (%AD_0, %AF e %AD_F) estão apresentados na Tabela 4.

Baseando-se nos dados da Tabela 4, foi possível gerar uma curva correlacionando a energia e o percentual das áreas de fratura obtidas no ensaio Charpy em função da distância entre a linha central da solda e a raiz do entalhe

Tabela 4. Resultados dos ensaios de tenacidade ao entalhe por impacto Charpy.

Seq.	Amostra	Tira	C [mm]	E_C [J]	% AD_0	% AF	% AD_F
1	B	5	0	160,9	30	20	50
1	A	2	3	73,1	50	25	25
1	B	10	8	50,0	10	55	35
1	B	2	10	36,5	5	45	50
1	B	13	18	52,8	15	30	55
1	B	4	35	215,8	80	0	20
2	B	12	0	149,6	35	15	50
2	A	14	2	117,5	40	30	30
2	B	11	6	37,6	10	35	55
2	B	15	10	39,8	20	15	65
2	B	14	35	85,0	25	15	60

Copyright © 2020 ISESC



(a) **(b)**

Figura 8. Gráficos com os resultados dos ensaios de tenacidade ao entalhe por impacto Charpy em função da distância da linha central de solda (C > 35 mm equivale a ensaio no MB).

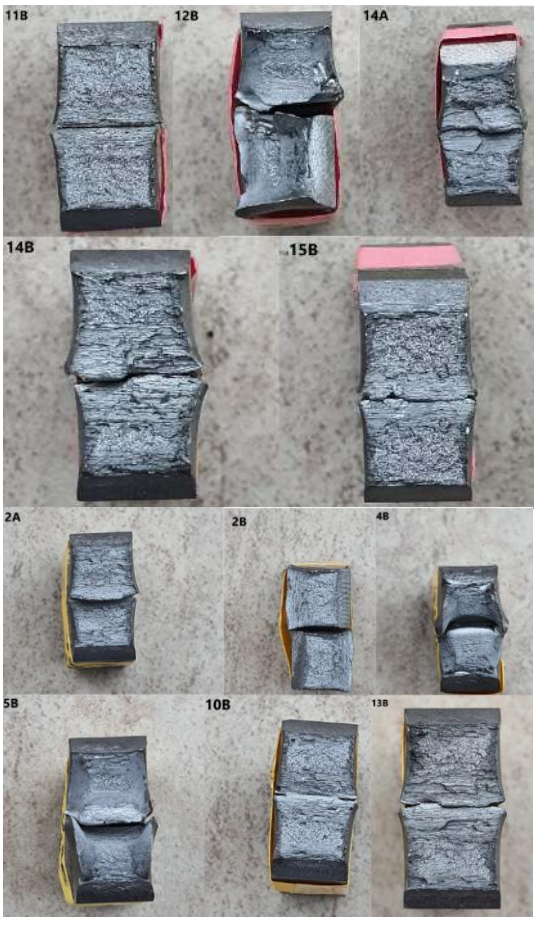


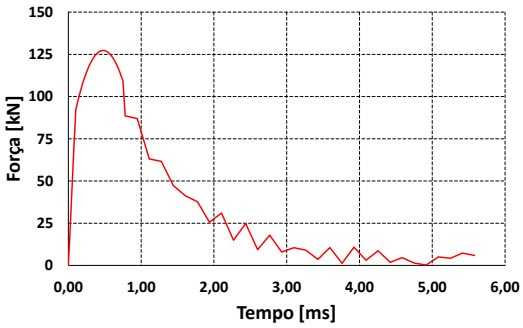
Figura 8. Superfícies de fratura registradas após a realização das duas sequências de ensaios Charpy. A identificação das amostras está ao lado das fotos.

dúctil total sobem até atingir um valor acima de 85% e uma energia média de 150 J, valores esses de energia similares às da zona fundida (ZF). Esta situação é justificada, inclusive em um trabalho desenvolvido anteriormente, no qual demonstrou-se que o consumível empregado (E7018) para soldagem deste tipo de aço (ASTM A36) oferece um desempenho tão bom quanto o do metal base [1]. Além disso, os valores encontrados neste trabalho para a ZF são compatíveis com o valor apresentado na Tabela 1, informado pelo fabricante. Neste último caso, deve-se considerar que o valor informado (110 J) foi obtido para uma temperatura (-30°C) menor do que a temperatura na qual foi obtido o resultado de Charpy (150 J) na ZF, neste trabalho (17°C).

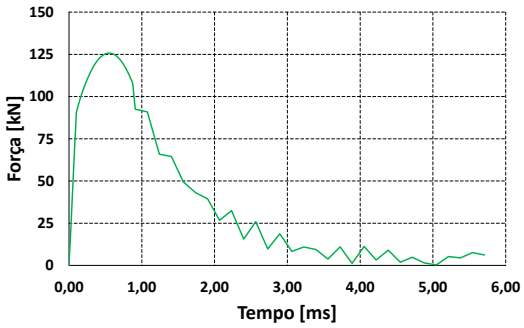
O principal resultado obtido através da instrumentação do Ensaio Charpy é a geração de uma curva de força × tempo do corpo de prova durante o impacto. Neste trabalho tais curvas foram simuladas através de dados obtidos por fractografia ($\%AD_0$, %AF e $\%AD_F$), conjuntamente com os valores de energia Charpy (E_C), das equações da literatura (Eq. 1, Eq. 2 e Eq. 3) e da interpretação dos fenômenos refletidos pelas curvas (valores de P_M, P_{GY}, P_F, P_A, t_M, t_{GY} e W_M - vide Fig. 4). Os resultados desta simulação estão mostrados pelas curvas força × tempo apresentadas na Figura 9.

Apesar de serem curvas simuladas e que necessitam de validação com curvas Força x deslocamento reais, os resultados apresentados na Figura 9 são relevantes para descrever o desempenho de uma junta soldada de aço estrutural. A morfologias destas curvas estão associadas, por exemplo, à fragilização na região da Zona Termicamente Afetada das amostras e, provavelmente, também estariam associadas à condição do número de passes de deposição se solda. Por isso torna-se importante que os demais CPs possam ser testados, em um equipamento instrumentado, para validar o modelamento empregado para gerar estas curvas.

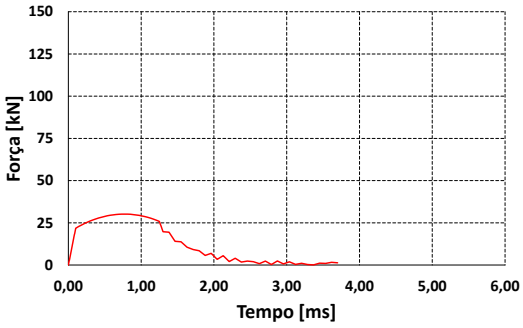
Copyright © 2020 ISESC



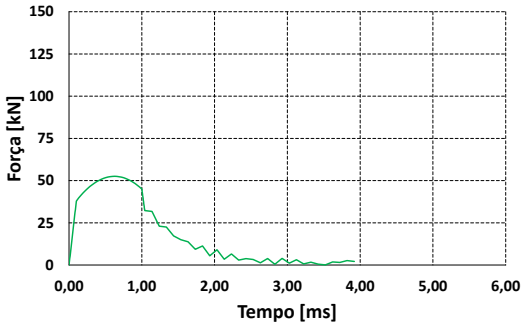
(5B, C = 0 mm, E_C = 161 J)



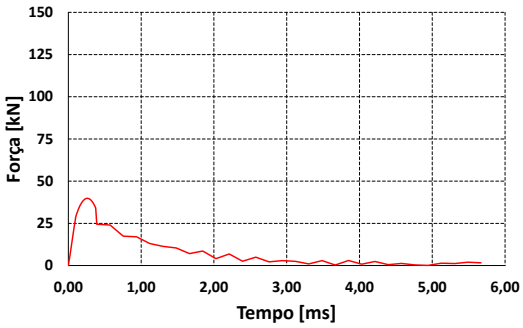
(12B, C = 0 mm, E_C = 150 J)



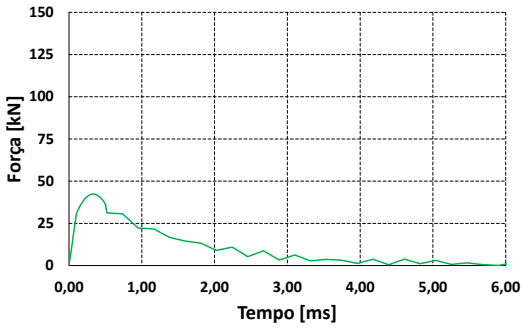
(2A, C = 3 mm, E_C = 73J)



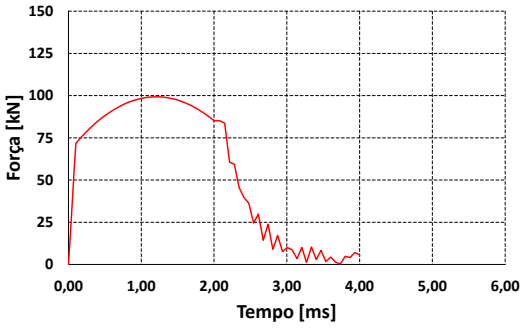
(14A, C = 2 mm, E_C = 117 J)



(13B, C = 18 mm, E_C = 53 J))



(15B, C = 10 mm, E_C = 40 J)



(4B, C = 35 mm, E_C = 216 J)

Figura 9. Curvas força × tempo simuladas a partir dos resultados obtidos de tenacidade ao entalhe por impacto Charpy.

Copyright © 2020 ISESC

4. Conclusões

A metodologia aqui apresentada sugere quantificar o desempenho de uma junta soldada de aços estruturais ou para vasos de pressão através de uma regressão entre os valores de energia Charpy (E_C) e distância do entalhe até a linha de solda (C). Tal regressão torna possível associar as condições do material e do processo de soldagem para indicar, de forma mais assertiva, as posições de maior interesse para inspeções, manutenções ou mesmo para proteção contra falhas futuras. Particularmente, no material analisado, verificou-se que as Zonas Termicamente Afetadas (ZTAs) são as regiões com maior potencial para falha. A simulação das curvas ainda precisa ser melhorada com novos dados e com o cruzamento dos resultados obtidos com curvas Força x deslocamento reais, obtidas a partir de máquinas de ensaios Charpy instrumentadas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer aos técnicos da UNISANTA Irineu da Penha Ressureição, Sérgio Giangiulio e Wilson Roberto de Oliveira Santos por todo o auxílio na execução do projeto, pela colaboração e disposição de tempo para nos auxiliar. À empresa Anjos Cortes e Dobras por sua colaboração ao longo de todo o trabalho, fornecendo o material e proporcionando o uso de ferramentas para seu processamento. À *General Motors* do Brasil, que através do Gerente Técnico de Engenharia de Produtos Marco Antonio Colosio, disponibilizou uma máquina de Ensaios Charpy, assim como auxiliou nos procedimentos para realização do ensaio.

Referências

1 Rey, A. R. ; Takakura ; Barros, F. O. ; Oliveira, J. A.; Vieira Junior, M. A. G. ; Rivela Junior, W. G. ; Demarchi, V. ; Carvalho, N. F. ; Morais, W. A. . Avaliação do Desempenho de uma União Soldada para Aplicação em Tubulações de Plataformas de Petróleo. **Unisanta Science & Technology**, v. 7, p. 33-43, 2018.

2 Lima, J. P. R. ; Godois, L. A. C. ; Santos, P. A. A. ; MORAIS, W. A. . Análise dos efeitos das tensões residuais em juntas soldadas. **REVISTA Ceciliana** (ONLINE), v. 9, p. 172-172, 2017.

3 Silva, F. S. ; Castillo, J. ; Morais, W. A. . Desempenho em fadiga de uma junta soldada dissimilar de aço carbono e aço inoxidável 409 obtida através de arame de solda tubular e sólido. **Unisanta Science & Technology**, v. 7, p. 14-17, 2018.

4 Dowling, N. E. **Comportamento Mecânico dos Materiais: análise de engenharia aplicada a deformação, fratura e fadiga**. Tradução de Willy Ank Morais. 4ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

5 Garcia, A.; Spim, J. A.; Santos, C. A. **Ensaios dos Materiais**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

6 Morais, A. **Ensaios Mecânicos dos Materiais** - Volume 1. São Vicente: WILLY ANK – Soluções para o Setor Metal-Mecânico, 2018.

7 Broek, D. **Elementary engineering fracture mechanics**. 3ª. ed., 1984.

8 Anderson, T. L. **Fracture Mechanics – Fundamentals and Application**. [S.l.]: CRC Press, 1994.

9 Callister, W. D.; Rethwisch, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais - Uma Introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

10 API 579. **Fitness-For-Service**. [S.l.]: American Petroleum Institute, 2016.

11 Krueger, E. L. **Charpy instrumentado: análise de instrumentação e da influência de condições metalúrgicas de um aço de ultra-alta resistência mecânica na tenacidade à fratura dinâmica**. (Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica). Campinas: UNICAMP, 2009.

12 Quinan, M. A. D. **Análise de Ensaio Instrumentado de Impacto Tipo Charpy. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Mecânica** - UFMG, 1996. (Dissertação de Mestrado). p. 98.

13 International Standard. ISO 14.556. **Steel - Charpy V-notch pendulum impact test - instrumented test method**. Geneva, 2000. 14p.

14 Manoel, P. A. Franzon; Sokei, C. R. ; Ventrella, V. A. ; Tokimatsu, R. C.. **Efeito de variações no ensaio Charpy instrumentado sobre as interferências presentes na curva força vs deslocamento**. In: XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, 2013, La Plata. Actas del XI Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. La Plata: Universidad Nacional de La Plata, 2013. p. 199-200.

15 Ireland, D. R. **Procedures and Problems associated with reliable control of the Instrumented Impact test. In. Instrumented Impact Testing**, ASTM STP 563, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1974, p. 3-29.

Copyright © 2020 ISESC