



XXX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica
19 a 23 de agosto de 2024, Uberaba, Minas Gerais, Brasil

ENSAIO DE QUEDA POR PESO EM SOLDAS FCAW

Bruno Gabriel Carneiro, d201810855@uftm.edu.br¹
Alexandre de Oliveira Dias, alexandre.dias@uftm.edu.br¹
Marcílio Alves, maralves@usp.br²

¹Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Av. Randolfo Borges Júnior, 1400 - Univerdecidade, Uberaba - MG, 38064-200,

²Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, Cidade Universitária, São Paulo – SP, 05508-030.

Resumo. O objetivo desse trabalho foi investigar a deformação em um corpo de prova de aço inoxidável austenítico, soldado através do processo de soldagem por arame tubular na posição plana, de acordo com a norma ASTM E208-17; assim como a propagação de trinca a partir de um entalhe normalizado no centro do cordão de simples deposição. Um martelo de 136kg se chocou com um corpo de prova há -12 °C, com dimensões 129 x 51 x 15,88 mm, posicionado sobre uma bigorna completamente usinada. Simulação computacional através do ANSYS® mostrou-se eficaz na convergência da área abaulada e deslocamento do martelo em y, após a deformação do corpo de prova até encostar no batoque central (deformação elástica) e deformação plástica na superfície não soldada do corpo de prova. Não ocorreu trinca a partir do entalhe, tanto experimentalmente como na simulação, mostrando que a metodologia empregada no procedimento de soldagem e no método numérico são eficientes em resistência ao impacto à baixa temperatura quanto a previsibilidade do comportamento estrutural a partir da indução de um concentrador de tensões no cordão de solda.

Palavras chave: Ensaio de queda por peso. Aço inoxidável austenítico. Processo de soldagem por arame tubular.

Abstract. The aim of this study was to investigate the deformation in a specimen of austenitic stainless steel welded using the flux-cored arc welding process in the flat position, according to ASTM E208-17 standard, as well as crack propagation from a notch normalized at the center of the single-pass weld bead. A 136kg hammer impacted a specimen at -12°C, with dimensions of 129 x 51 x 15.88 mm, positioned on a fully machined anvil. Computational simulation using ANSYS® proved effective in converging the bulged area and hammer displacement in the y-direction after deformation of the specimen until it contacted the central stop (elastic deformation) and plastic deformation on the unwelded surface of the specimen. Crack initiation did not occur from the notch, both experimentally and in simulation, demonstrating that the methodology employed in the welding procedure and the numerical method are efficient in low-temperature impact resistance and predictability of structural behavior through the induction of a stress concentrator in the weld bead.

Keywords: Drop-Weight Test (DWT), Stainless steel, FCAW (Flux Cored Arc Welding).

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o processo de soldagem por arame tubular (FCAW) é muito utilizado na junção dos aços inoxidáveis na indústria, levando um considerável aumento na velocidade de produção, por sua maior densidade de corrente e consequentemente maior taxa de deposição. A soldagem realizada por esse processo é mais eficiente e econômico comparada à outros processos de soldagem devido à sua alta taxa de fusão, possibilidade de automatização e de soldagem em todas as posições, facilidade de execução, soldas com bom acabamento e vantajosas propriedades mecânicas (Dias, 2009) (Tumer e Yilmaz, 2016) (Wainer, et al., 1992).

Em muitas situações envolvendo carga de impacto é desejável que uma estrutura não falhe no sentido da separação do material. Por isso, a capacidade de previsão de falha torna-se uma questão importante a ser considerada na etapa de projeto estrutural. No entanto, os diversos critérios de falha desenvolvidos até o momento não abrangem todos os casos, e um critério de falha mais universal, ainda não existe (Alves, 2020). Para se evitar falhas catastróficas de aços estruturais, a temperatura mínima de serviço é geralmente especificada a ser maior que a NDT através de certo incremento de 33K (-243,15° C). Além disso, na abordagem da mecânica da fratura, a temperatura básica do DWT é geralmente combinada com a tenacidade à fratura dinâmica (K_{ID}) para gerar curvas de calibração adequadas (Lei e Yao, 1996).

Pellini e associados do Laboratório de Pesquisas Navais (Washington DC) desenvolveram esse ensaio em 1952, junto com o “Drop-Weight Tear Test” (DWTT). Desde então, o “Drop-Weight Test” (DWT) foi usado na investigação dos requisitos de condições para iniciação de fraturas frágeis em aço estrutural (Masubuchi, 1980) e como um método simples,

porém significativo de determinar a Temperatura de Transição Dúctil-Frágil (*NDTT – nil-ductility transition temperature*). Foi definido em 1950, em testes de explosão por bojo (ou protuberância); nos quais a chapa retangular se mantém plana durante a fratura e a propagação de trinca no entalhe do cordão de solda ocorre somente na presença de deformações elásticas (Puzak, et al., 1952).

O método DWT é usado como propósito de qualificação por organizações industriais, sendo referenciado em várias especificações dos Códigos “ASME” e do “*ASTM Boiler and Vessel Pressure*”. O maior propósito do ensaio é determinar a temperatura de transição dúctil-frágil (*NDT - Nil ductility transition*), definido como a temperatura máxima no qual o corpo de prova se quebra de acordo com as condições experimentais deste método. Este teste pode ser usado sempre que for solicitada uma especificação no qual os aços estejam sujeitos aos requerimentos de tenacidade à fratura. Foi desenvolvido para medir as características de início de fratura de materiais estruturais com espessura igual ou maior que 5/8” (15,88 mm). De acordo com a norma, a massa do martelo deve estar entre 22,7 e 136 kg e os trilhos ou dispositivos de elevação devem permitir a fixação do peso em várias distâncias fixas permitindo a obtenção de energia potenciais de 340 a 1900J.

A filosofia básica do método dos elementos finitos é a discretização e a aproximação, sendo uma técnica de aproximação numérica que divide um componente ou estrutura em regiões discretas (os elementos finitos) e a resposta é descrita por um conjunto de funções que representam os deslocamentos ou as tensões naquela região (Juvinal, et al., 2008).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O arame tubular McKAY Chroma Weld 316LT1-1, de fluxo rufílico, foi escolhido para a soldagem dos aços inoxidáveis tipos 316 e 316L, entre outros, atendendo às especificações AWS A5.22 E316LT1-1 e JIS Z 3323 TS316L-FC1, do lote nº 2032613. O gás de proteção utilizado seguiu a recomendação do fabricante do arame, privilegiando um alto teor de CO₂, com uma vazão constante de aproximadamente 14 l/min. A tocha foi posicionada perpendicularmente à solda, fixando-se uma distância de 16 mm do bico de contato até a peça, o que resultou em 11 mm de distância da tocha e 5 mm de recuo do bico de contato.

O corpo de prova utilizado neste estudo foi obtido de chapa laminada a quente (LTQ) do ASTM 304, possuindo espessura de 5/8 polegadas (15,88 mm), com o sentido de laminação alinhado ao maior comprimento, ou seja, paralelo à direção do cordão de solda.

A bigorna foi construída a partir de um SAE 1045, com dureza mínima de 50HRC.

Tabela 1. Composição química do metal-base laminado a quente e recozido.

ASTM 304	C %	Si %	Mn %	Cr %	Ni %	S %	P %	N %	Cr _{eq}	Ni _{eq}
Mín.	0,03			17,50	8,00				-	-
Máx	0,08	0,75	2,00	19,50	10,5	0,03	0,045	0,10	-	-
Atual	0,05	0,39	1,19	18,1	8,0	0,002	0,022	0,07	18,1	10,24

3. ENSAIO EXPERIMENTAL DE QUEDA POR PESO

O objetivo desses ensaios foi simular a iniciação de uma trinca por clivagem em corpos de prova submetidos a uma soldagem simples, depositando-se um pequeno cordão de solda. Neste contexto, a zona afetada pelo calor (ZAC), criada pelo cordão de solda que inicia a trinca, demonstra uma resistência à fratura superior em comparação à região não afetada pelo calor. Importante destacar que o ensaio é geralmente insensível à orientação da laminação e forjamento do material, salvo em casos específicos onde essa orientação é um fator desejado para análise.

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório de Impacto do GMSIE (Grupo de Mecânica dos Sólidos e Impacto em Estruturas) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, especificamente na sala equipada com o Martelo de Impacto, como ilustrado na Figura 1. Para captura detalhada dos ensaios, utilizou-se uma câmera Photron FASTCAM SA5 de alta velocidade, programada para registrar imagens a uma taxa de 10.000 quadros por segundo.



Figura 1. Banco experimental do ensaio DWT. Sala do Martelo GMSIE – POLI – USP.

O equipamento de teste empregado possui um mecanismo de impacto similar ao de um peso vertical, conforme estabelecido pela norma ASTM E208 – 17. Para garantir a eficácia do teste, a velocidade de impacto não deveria ser inferior a 4,88 m/s, assegurando assim energia suficiente para fraturar completamente o corpo de prova com um único golpe. Entretanto, com uma massa de 136kg, essa velocidade pode ser reduzida para 2445 mm/s. A energia total necessária para tal feito foi calculada em 406,5 J, apropriada para corpos de prova de aço com espessura superior a 12,7 mm e limite de resistência à tração de 690 MPa. A velocidade foi calculada através de uma relação direta da massa com a altura de queda, através da Equação (1) e a energia de impacto através da energia cinética, conforme Eq. (2).

$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

$$E_{\text{impacto}} = E_{\text{cinética}} = \frac{mv^2}{2} \quad (2)$$

3.1. Preparação da Bigorna e Corpo de Prova

A bigorna foi posicionada de forma que o corpo de prova tivesse o impacto do martelo exatamente na parte central da superfície oposta ao cordão de solda (Fig. 2). O corpo de prova foi imerso em uma caixa de espuma de poliestireno expandido (EPS), contendo nitrogênio líquido (-196°C ou 77K) durante uns 10 min; sequencialmente foi retirado e teve a temperatura monitorada até o momento da realização do ensaio. O ensaio iniciou-se com o corpo de prova a -12°C para se estar próximo a temperatura de transição dúctil-frágil do material. O martelo já estava posicionado em 300mm de altura. Distância conferida por um corpo de prova similar; sendo esta distância referente da ponta do martelo até o corpo de prova.



Figura 2. Corpo de prova DWT, posicionado para queda do martelo de altura 300mm (ASTM E208-17).

3.2. Análise de Impacto

A bigorna foi posicionada de forma que o corpo de prova tivesse o impacto do martelo exatamente na parte central da superfície oposta ao cordão de solda, conforme demonstrado pela Fig. 3.



Figura 3. Corpo de prova DWT, após queda do martelo de altura 300mm (ASTM E208-17).

4. ANÁLISE COMPUTACIONAL ANSYS®

Realizou-se simulações numéricas de ensaio de queda por peso (DWT) por intermédio do programa ANSYS® e ANSYS Mechanical®, em corpos de prova DWT conforme ASTM E208-17; soldados no modo convencional através do processo FCAW. Os modelos assumiram as não-linearidades geométricas do material e as condições de contorno experimental. Nessa simulação empregou-se somente os efeitos de análise dinâmica explícita. Os resultados numéricos serão confrontados com os resultados experimentais obtidos pelo ensaio DWT com o objetivo de verificar a consistência do modelo computacional proposto.

O comportamento do corpo de prova, da bigorna e do martelo foram selecionados como não lineares. As simulações numéricas foram realizadas resolvendo as equações de deformações e tensões de von Mises com o software ANSYS Workbench, usando-se a interface do ANSYS Mechanical para o estabelecimento de parâmetros e a resolução dos critérios de convergência direcionados uma determinada solução requerida após se estabelecer as condições de contorno iniciais de pré-processamento. A análise explícita é uma das análises mais poderosas no ANSYS, levando muito tempo na resolução de problema, entretanto fornecendo resultados mais precisos.

Com o modelo proposto foi possível obter numericamente - através do método de elementos finitos - o campo de deformações e tensões residuais, com a vantagem de utilizar uma única malha de elementos finitos do início ao fim da análise numérica. Focou-se nas deformações e tensões residuais geradas através do impacto, sensíveis à variação de temperatura, função da energia potencial, resultante da massa de um martelo em queda livre (2gh).

O modelo segue uma metodologia que contém 3 etapas:

1ª Etapa: Definição de uma malha de elementos finitos para todo o processo, levando-se em consideração a geometria (desenho da bigorna envolvida e do corpo de prova DWT), características do material (principalmente do metal base, corpo de prova DWT soldado) e temperatura de realização do ensaio.

2ª Etapa: Realização da simulação numérica para a análise dinâmica explícita do impacto devido à queda de um martelo sobre o corpo de prova posicionado sobre uma bigorna fixa, de acordo com a ASTM E208-17, levando-se em conta os efeitos relacionados ao recalque do martelo após o primeiro impacto no corpo de prova DWT.

3ª Etapa: Análise dos resultados através da resposta geradas pelo ANSYS Mechanical®. São realizadas as validações dos dois passos anteriores com os valores medidos experimentalmente especialmente na avaliação do entalhe com relação à presença de trinca propagada através do entalhe usinado transversalmente no cordão de solda (Fig. 4).

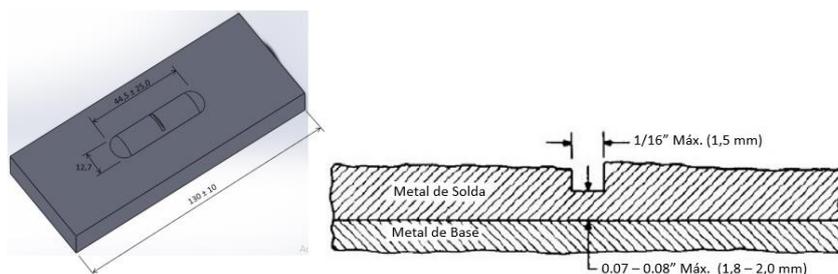


Figura 4. Corpo de prova DWT, soldado e vista em corte longitudinal do entalhe (ASTM E208-17).

4.1. Definição malha de elementos finitos

A malha estabelecida de elementos finitos deve se adequar à análise de impacto e análise estrutural. O método proposto para a escolha de uma mesma malha do início ao fim do processo, segue o caminho inverso deste, pois leva em consideração as simulações objetivando analisar as deformações e tensões residuais geradas no corpo de prova após o impacto. Com esse objetivo, é proposto um desenho - feito em SolidWorks® que delimita a malha a ser definida, incluindo seu adequado refinamento (Fig. 5). Buscando assim um tipo de elemento finito ideal e respectivos graus de liberdade necessários à simulação estrutural que permita uma malha com os requisitos de refinamento previstos ou requeridos. É recomendável utilizar “*defeaturing*” na geração da malha (especialmente em elementos tetraédricos).

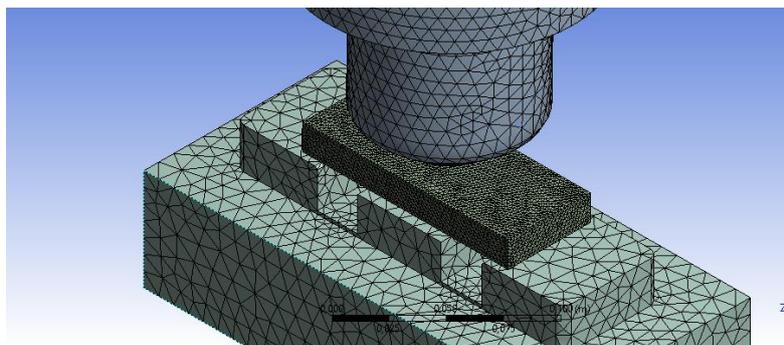


Figura 5. Malha do corpo de prova utilizada neste trabalho.

Evitou-se algoritmo de malhas hexa-dominantes. Mesmo elementos hexaédricos sendo recomendados, devido à boa estabilidade dos elementos, com geometrias complexas. É recomendável o uso de elementos tetraédricos, seja pela complexidade da geometria ou em áreas de transição. O problema de malhas hexa-dominantes é que podem ser gerados elementos piramidais, os quais não são permitidos pelo ANSYS® *Explicit Dynamics*, podendo levar a elementos com dimensões muito reduzidas na parte interna da malha, afetando desta forma o *time step* da simulação.

As propriedades mecânicas dos materiais envolvidos no experimento na temperatura de -12°C foram obtidas a partir da interpolação linear da tabela 2 mostrada abaixo, Istrati (1961). Algumas propriedades mecânicas do AISI 304s em temperatura de 0°C também podem ser obtidos no trabalho de Deng e Murakawa (2006).

Tabela 2 Propriedades mecânicas do 304 e 316 à baixa temperatura.

<i>Grade e propriedade</i>	20°C	0°C	-40°C	-60°C	-200°C
304 (alívio de tensões)					
Limite de Fluência (kgf/mm^2)	25	24	24	24	27
Resistência à tração (kgf/mm^2)	62	91	109	120	173
Alongamento na Ruptura (%)	62	55	47	39	32
Redução de seção (%)	71	68	64	63	55
Resistência ao Impacto Izod (kgm)	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2
316 (alívio de tensões)					
Limite de Fluência (kgf/mm^2)	27	27	29	31	49
Resistência à tração (kgf/mm^2)	55	63	73	83	127
Alongamento na Ruptura (%)	60	60	59	57	46
Redução de seção (%)	76	75	75	73	64

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados foram analisados pelo software GOM®. Após filmagem em 10000 quadros/seg, descartando-se os momentos antes da ponta do martelo ter contato com o corpo de prova.

5.1. Análise dos dados reais de impacto

Os dados foram analisados pelo software GOM® (Fig. 6). Após filmagem em 10000 quadros/seg, descartando-se os momentos antes da ponta do martelo ter contato com o corpo de prova. A velocidade de verificada no momento do impacto foi de 2400,3 mm/s.

Na prática, não ocorreu propagação de trinca no campo de deformação elástica na temperatura de -12°C , com energia de impacto de 406,5J. A Fig. 7 mostra o corpo de prova logo após a realização do ensaio, com temperatura em -10°C verificada por um termopar tipo K (Cromel/ Alumel); nesta figura, o cordão de solda foi feito da direita para a esquerda.

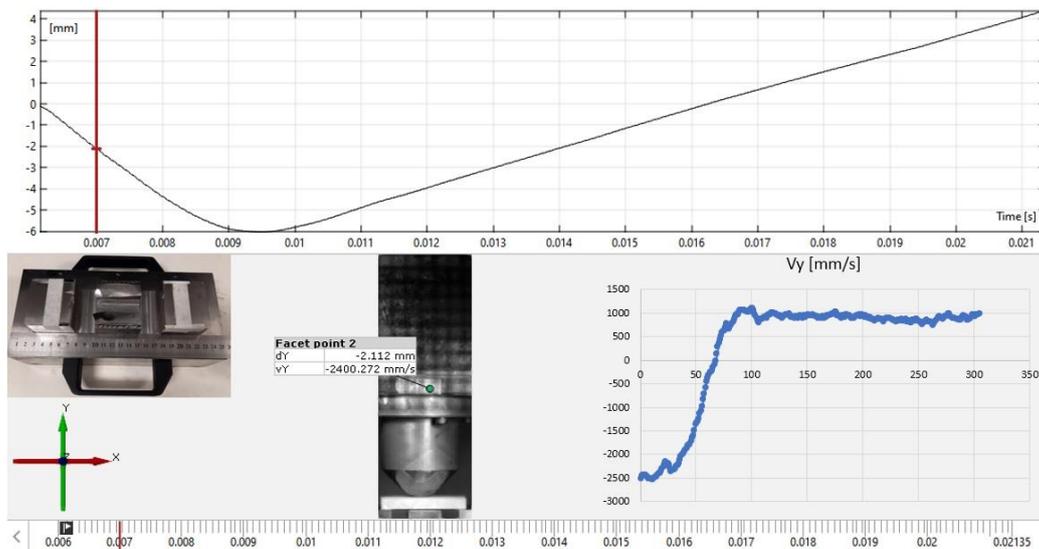


Figura 6. Análise de imagem GOM do deslocamento e velocidade em y. Corpo de prova em -12°C e queda de 136kg de altura de 300mm.

A deformação do martelo, dentro da faixa de energia permitida pela norma ASTM E208-17 foi 3,487mm. Deformação esta medida também pelo software a partir do contato do martelo com o corpo de prova até o início de ser rebote ou recalque após a deformação elástica.

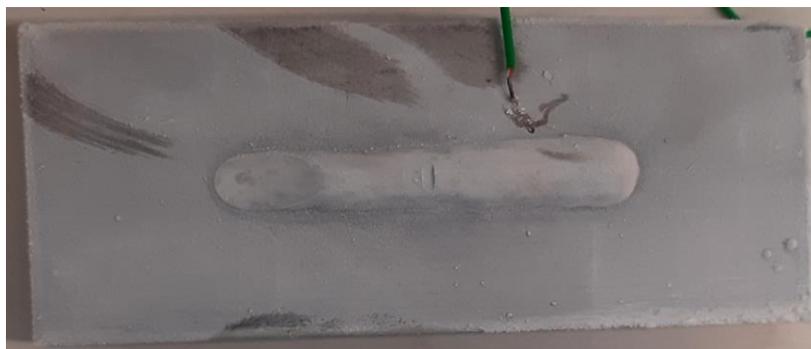


Figura 7. Entalhe no cordão de solda do corpo de prova após ensaio DWT.

5.2. Análise dos dados computacionais de impacto

Após a resolução das simulações computacionais foi possível observar as características do corpo de prova após o impacto do martelo. A tensão equivalente seguindo o critério de Von-Mises pode ser observado na fig. 8 abaixo, tendo como tensão máxima 446,5 Mpa.

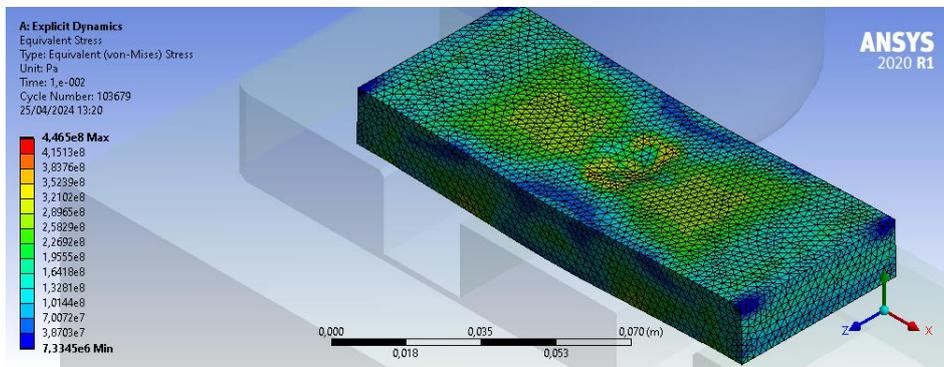


Figura 8: Tensão Equivalente de Von-Mises.

A Deformação plástica total máxima do corpo de prova após o impacto foi de 3,98 mm, o gráfico de deformações totais ao longo do corpo de prova pode ser observado na fig. 9.

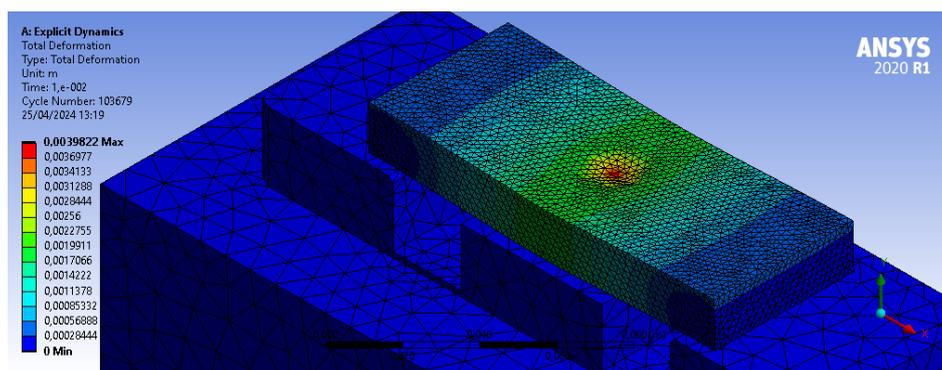


Figura 9: Deformação plástica total do corpo de prova.

As análises computacionais realizadas forneceram resultados satisfatórios em comparação aos valores reais obtidos no ensaio de impacto. Assim como no ensaio, não houve propagação da trinca no corpo de prova.

5.3. Comparação de Cratera.

A cratera formada pelo impacto do martelo no ensaio real teve um comprimento e largura de 17 e 15,5 mm, respectivamente (Fig. 10). Os valores de comprimento e largura da cratera na simulação computacional são de: 17,5 e 15 mm, respectivamente, um corte longitudinal no centro da cratera simulada pode ser observado na fig. 11.



Figura 10: Cratera formada após impacto.

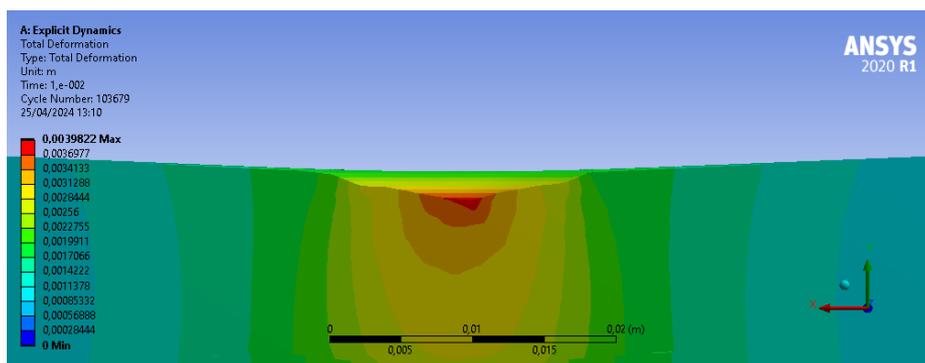


Figura 11: Corte longitudinal da cratera formada após impacto de simulação.

6. CONCLUSÕES

A solda de simples deposição em chapa do AISI 304, de 15,88mm de espessura, soldados com arame tubular E316LT1-1 demonstrou resistência tanto no limite de deformação elástica estabelecido pela norma E208-17, para energia de impacto de 406,5 J (martelo de 136kg liberado há 300mm).

Nas comparações realizadas entre os dados de simulação e experimentais as seguintes conclusões podem ser inqueridas: observa-se uma boa sinergia entre o método computacional e o ensaio de queda por peso, também não excedendo a tensão de escoamento do material para causar trinca a partir do entalhe sugerido pela norma ASTM E208-17.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à COMTEQ Soldas, à Gullco International e ao GMSIE (Escola Politécnica da USP).

8. REFERÊNCIAS

- Alves, M., 2020. *Impact Engineering: Fundamental, Experiments and Non Linear Finite Elements*. Editora Orsa Meggiore, Florianópolis, 2ª edição.
- Deng, D.; Murakawa, H. 2006. "Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements". *Computational Materials Science*, Vol. 37, p. 269–277.
- Dias, A. O., 2009 *Análise da Influência dos Parâmetros de Pulsação na Soldagem do Aço Inoxidável AISI 304 Através do Arame Tubular AWS E316LT1-4*. Dissertação de mestrado, UNIFEI, Itajubá. 7
- ISTRATI, G. Manual de Los Aceros Inoxidables. Buenos Aires: Libreria Y Editorial Alsina, 1961.
- Juvinall, R. C., Marshek, K., Urt, M., 2008. *Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas*. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 4ª edição.
- Lei, W., Yao, M. E. I. 1996. "The Physical Nature of Drop-Weight-Test NDT". *Engineering Failure Mechanics*, Vol. 53, n. 4, p. 645–652.
- Masubuchi, K. 1980. *Analysis of Welded Structures*. [s.l.]. Materials Science and Technology.
- Puzak, P. P., Eschbacher, E. W., Pellini, W. S. 1952. "Initiation and propagation of brittle fracture in structural steels". *Welding Journal*, Vol. 31 (12), p. 561-s-581-s.
- Tumer, M., Yilmaz, R. 2016. "Characterization of microstructure, chemical composition, and toughness of a multipass welded joint of austenitic stainless steel AISI316L". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 87, n. 9–12, p. 2567–2579.
- Wainer, E., Brandi, S. D., Mello, F. D. H. 1992. *Soldagem: Processos e Metalurgia*. Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 1ª Edição, 6ª Impressão.

9. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.