

Conjuntos Soldados Submetidos a Carregamento Excêntrico Quase Estático e de Impacto Estrutural “Fora do Plano”

Alexandre Urbano Hoffmann¹ , Ivan Guerra Machado¹ 

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, Porto Alegre, RS, Brasil.

Como citar: Hoffmann AU, Machado IG. Conjuntos soldados submetidos a carregamento excêntrico quase estático e de impacto estrutural “Fora do Plano”. *Soldagem & Inspeção*. 2023;28:e2804. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI28.04>

Resumo: Este artigo mostra resultados de uma investigação sobre o comportamento de conjuntos produzidos com juntas soldadas de filete, submetidos a carregamentos excêntricos, quase estáticos e de impacto estrutural “fora do plano”. Sendo assim, os conjuntos soldados foram fabricados, com um dos elementos em “balanço”, utilizando-se aços estruturais ASTM A-36 e ASTM A-572 grau 50, unidos pelo processo de soldagem a arco com proteção gasosa (MAG). Para fins de comparação, todas as soldagens foram realizadas com os parâmetros mantidos constantes e eletrodos classes AWS ER70S-6 e AWS ER120S-G. Dentre os principais resultados foi observado que nos ensaios com carregamento quase estático, para ambos os metais base, os cordões paralelos soldados com AWS ER120S-G pré-aquecidos a 150 °C suportaram maiores carregamentos por tempos menores, e os cordões transversais suportaram menores carregamentos por tempos maiores. Nos ensaios de impacto estrutural dos conjuntos soldados com metal base ASTM A572 grau 50, cordões paralelos soldados com eletrodo AWS ER70S-6, pré-aquecidos a 150 °C resistiram cerca de 50% da carga projetada. Superfícies de fratura produzidas pelo carregamento por impacto estrutural dos cordões soldados com eletrodo AWS ER120S-G foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura. Cordões de solda paralelos produziram fraturas com características dúcteis e cordões perpendiculares fraturas dúcteis com planos de clivagem.

Palavras-chave: Soldagem; Impacto estrutural; Juntas de filete; Conjuntos soldados; Carregamento de flexão simples quase estática e de impacto estrutural "Fora do Plano".

Weldments Subjected to Quasi-static Eccentric Loading and “Out of Plane” Structural Impact Loading

Abstract: This paper shows results of an investigation on the behavior of assemblies produced with welded fillet joints subjected to eccentric, quasi-static and “out-of-plane” structural impact loads. Therefore, weldments were manufactured, with one of the elements in “balance”, using ASTM A-36 and ASTM A-572 grade 50 structural steels, joined by the process of gas metal arc welding (GMAW or MAG). For the purpose of comparison, all weld beads were made with parameters kept constant and classes AWS ER70S-6 and AWS ER120S-G electrodes. Among the main results, it was observed that in tests with quasi-static loading, for both base metals, the parallel weld beads welded with AWS ER120S-G preheated to 150 °C withstood greater loads for shorter times, and the transverse weld beads withstand smaller loads for longer periods of time. Related to structural impact tests of ASTM A572 grade 50 base metal weldments, the parallel weld beads welded with electrode AWS ER70S-6, preheated to 150 °C, withstood near to 50% of the designed load. Fracture surfaces produced by structural impact loading of the weld beads with the AWS ER120S-G electrode were analyzed by scanning electron microscopy. Parallel weld beads produced fractures with ductile characteristics, and perpendicular weld beads produced ductile fractures with cleavage planes.

Keywords: Welding; Structural impact; Fillet joints; Welded assemblies; Quasi-static eccentric loading and “Out of Plane” structural impact.

1. Introdução

Juntas soldadas por filetes são amplamente utilizadas, pois podem alcançar resistências mecânicas relativamente altas e as superfícies necessárias para realizar as soldas são de fácil preparação [1]. Porém, como é usual na soldagem por fusão, principalmente a ductilidade desse tipo de conexão pode ser negativamente alterada devido, entre outros motivos, pelas discrepâncias entre a tensão de escoamento real e a de projeto, além de alterações na resistência ao impacto e natureza do carregamento [2].

Como uma junta soldada é o local onde dois ou mais elementos estão interligados, de modo a assegurar que os esforços relevantes sejam transmitidos entre eles [3], critérios de projeto como: configuração da junta, capacidade de rotação, rigidez e propriedades estruturais são preponderantes para a sua resistência frente às solicitações impostas quando submetidas a carregamentos [4].

Os primeiros estudos realizados sobre o comportamento de soldas de filete indicaram que aquelas transversais, quando submetidas a um carregamento perpendicular ao eixo da solda, são aproximadamente 60% mais resistentes do que as longitudinais, onde a linha de aplicação da carga é paralela ao eixo da solda [4].

Recebido: 13 Mar., 2023. Aceito: 18 Ago., 2023.

E-mails: hoffmann@ufrgs.br (AUH); welder@ufrgs.br (IGM)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

Testes em conjuntos soldados com soldas de filete de mesma geometria, submetidos à carga de tração aplicada em ângulo de 30°, 60° e 90° em relação ao eixo das soldas, “no plano”, demonstraram que com o aumento no ângulo de aplicação do carregamento a resistência estrutural aumentou, mas ocorreu a redução da capacidade de deformação [5]. Neste trabalho a definição de carregamento excêntrico “no plano” e “fora do plano” é adotada conforme mostrado na Figura 1, onde a aplicação da carga em (a) está no mesmo plano em que se encontram os filetes de solda, enquanto em (b) e (c), a carga excêntrica está sendo aplicada fora do plano onde se encontram os filetes de solda [1].

Em muitos casos, a conexão entre os membros é realizada através de juntas soldadas por filete, ocasionando situações em que a aplicação dos esforços gera excentricidade da carga atuante sobre o filete ou sobre o grupo de soldas. Isso provoca excentricidade da carga no plano ou fora do plano.

Estudos recentes [6,7] sobre conjuntos soldados com geometrias similares à Figura 1a, produzidos por juntas de filetes com eletrodo AWS ER120S-G e submetidos a ensaios de impacto estrutural “no plano”, mostraram que algumas propriedades mecânicas são notavelmente alteradas pelo pré-aquecimento (naquele caso 150°C), em comparação a juntas soldadas na temperatura ambiente. Nesse estudo foi constatada a redução da carga máxima resistida, quando os conjuntos sofreram carregamentos de impacto estrutural, evidenciando-se assim a necessidade de precaução no dimensionamento de juntas soldadas submetidas a este tipo de carregamento.

Quando o carregamento excêntrico fora do plano ocorre, Figura 1b e c, as juntas soldadas por filete são submetidas à combinação de esforços de flexão e cisalhamento simultaneamente. A configuração dos cordões de solda frente à aplicação da carga ganha destaque, pois tem influência direta na resistência da junta. Desta forma, na Figura 1, têm-se, dois casos de carregamento excêntrico fora do plano em função da posição dos cordões de solda. Na Figura 1b, o eixo dos cordões de solda de filete está paralelo ao vetor de aplicação da carga, na Figura 1c, o eixo dos cordões de solda é transversal ao vetor de aplicação da carga.

Um modelo de cálculo para o dimensionamento de juntas soldadas sob a combinação de flexão e cisalhamento fora do plano é o método baseado no centro instantâneo de rotação, onde se assume que o carregamento excêntrico causa rotação de um membro, sobre um ponto localizado no centro do grupo de soldas [8].

Portanto, o presente trabalho tem por objetivo dar continuidade à investigação mais ampla em andamento sobre conjuntos soldados em juntas de filete submetidos a carregamentos torcionais quase estáticos e de impacto estrutural “no plano” [6,7], mas agora com carregamento “fora do plano”.

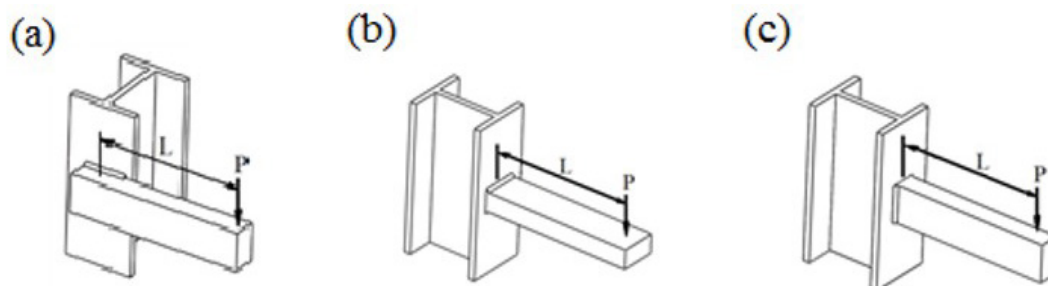


Figura 1. Em (a) tem-se o carregamento excêntrico no plano, (b) o carregamento excêntrico fora do plano, cordões de solda de filete transversais ao vetor de carregamento. (c) carregamento excêntrico, cordões de solda de filete, paralelos ao vetor de aplicação da carga. (Nota: Sendo (L) a distância em (m) do centro do grupo de soldas em relação a (P) que é a resultante do carregamento aplicado em (kN)).

2. Material e Métodos

Para investigar a relação entre consumível, material base e natureza do carregamento (quase estático e dinâmico) sobre os cordões de solda, foram selecionados como metais base (MB) duas categorias distintas de aços estruturais em forma de chapas de aço. Estes MB são o ASTM A-36, com 400 a 500 MPa de resistência a tração; limite de escoamento mínimo de 250 MPa e alongamento mínimo 0,2% e o ASTM A572 grau 50, com 450 MPa de resistência a tração mínimo; limite de escoamento mínimo de 345 MPa e alongamento mínimo de 21%. Ambos os conjuntos foram construídos com estes aços nas dimensões de 400 mm x 150 mm e 38,1 mm de espessura, denominadas de “chapa base” e com dimensões de 450 mm x 120 mm e 63,5 mm de espessura, denominadas de “braço em balanço”. As propriedades mecânicas dos MB foram certificadas pelo fornecedor. As análises químicas desses aços foram realizadas por espectrometria de emissão óptica e estão na Tabela 1, com os valores respeitando as respectivas normas [9,10].

Tabela 1. Composição química dos aços ASTM A36 e ASTM A572G50.

Metal Base	Elementos Químicos (% em massa)					
	C (máx.)	Mn	P (máx.)	S	Si	Cu (máx.)
ASTM A-36	0,172	0,68	0,012	< 0,01	0,018	< 0,005
ASTM A-572 Gr. 50	0,09	0,991	0,013	< 0,01	0,016	0,0076

Os metais de adição empregados individualmente foram o AWS ER70S-6 (480 MPa de limite de resistência a tração, limite de escoamento mínimo de 400 MPa e alongamento mínimo de 22%) e AWS ER120S-G (900 MPa de limite de resistência a tração, limite de escoamento mínimo de 850 MPa e alongamento mínimo 18%), ambos com diâmetro 1,2 mm. Estas propriedades mecânicas foram fornecidas pelo fabricante [11], enquanto que as composições químicas destes consumíveis estão na Tabela 2.

Tabela 2. Composição química dos consumíveis [11].

Consumível	Elementos Químicos (% em massa)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
AWS ER120S-G	0,10	0,68	1,77	0,015	0,010	0,36	1,84	0,45
AWS ER70S-6	0,083	0,87	1,45	0,010	0,015	0,01	0,01	0,04

Cabe ressaltar, que o AWS ER70S-6 é considerado como “*matching*” por apresentar resistência mecânica menor ou semelhante ao metal base, enquanto o AWS ER120S-G é “*overmatching*”, pois apresentar resistência mecânica maior que o metal base [12].

As dimensões da “chapa base” garantiram a rigidez necessária para sua função e ela permaneceu fixa, não tendo sofrido alteração visível a olho nu na sua superfície durante os experimentos. O “braço em balanço” também deve ser igualmente rígido, pois recebe a aplicação do carregamento quase estático e de impacto. No caso deste último tipo de carregamento, por ser concentrado, o impacto foi sobre um “batente” (ou “chapa de sacrifício”) posicionado sobre a superfície do “braço em balanço”.

Todos os conjuntos foram soldados na posição plana por GMAW, com a fonte de potência no modo tensão constante em corrente contínua polaridade do eletrodo positiva, sendo a proteção gasosa de argônio + (15%) CO₂ e vazão de 15 l/min. A distância do bico de contato à peça foi de 18 mm, sendo os cordões de solda depositados com ângulo de trabalho e deslocamento 0°. Para a realização dos experimentos foi utilizado um sistema robotizado, composto por braço robótico MA1400 da Yaskawa Motoman Robotics e fonte de potência Trans Puls Synergic 4000 R.

Após a realização de testes exploratórios com base em trabalhos anteriores, os seguintes parâmetros de soldagem foram selecionados e empregados para realização de todas as juntas; tensão 26,5 V; corrente elétrica 240 A; velocidade da soldagem 7 mm/s e velocidade de alimentação do arame 6,5 m/min. As temperaturas dos conjuntos soldados imediatamente antes da operação foram ambiente (TA) e de pré-aquecimento (TP) a 150 °C.

A Figura 2 mostra em detalhes o projeto dos conjuntos soldados fabricados com dois cordões de solda transversais (TW) à direção de aplicação da carga (F), enquanto que na Figura 3 está o projeto dos conjuntos soldados fabricados com os cordões de solda paralelos (PW) à aplicação da carga (F). Ambas as figuras mostram a distância de aplicação da carga de 300 mm e a “chapa de sacrifício”, que auxiliou para melhor distribuir a carga de impacto.

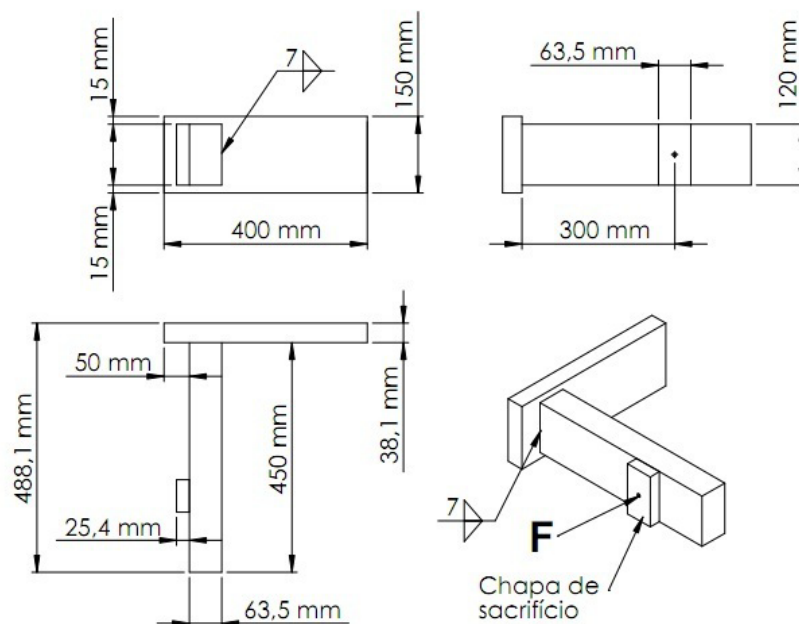


Figura 2. Projeto dos conjuntos soldados com cordões transversais (TW) ao vetor de impacto.

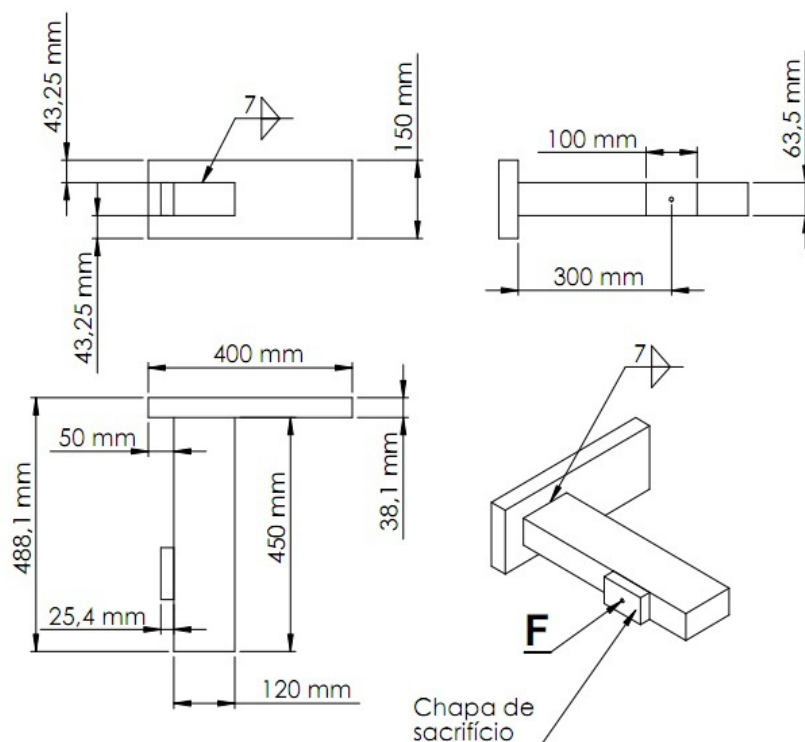


Figura 3. Projeto dos conjuntos soldados com cordões paralelos (PW) ao vetor de impacto.

Por sua vez, foram observadas várias características dos cordões de solda através de macrografias das suas seções transversais. Na Figura 4 está mostrada uma típica macrofotografia, neste caso de junta soldada na temperatura ambiente (TA) sobre aço ASTM A36, com consumível AWS ER70S-6. A partir dessas macrografias - todas as apresentadas no presente artigo obtidas com Nital a 4% - foi medido o tamanho da perna; realizados testes de microdureza (Vickers) com carga de 0,5 kgf aplicada de acordo com norma [13] e avaliada a diluição de cada junta soldada com o auxílio do software livre de edição gráfica ImageJ [14]. Constatou-se que a variação da diluição entre as amostras é inferior a 8%, sendo esse valor considerado desprezível.

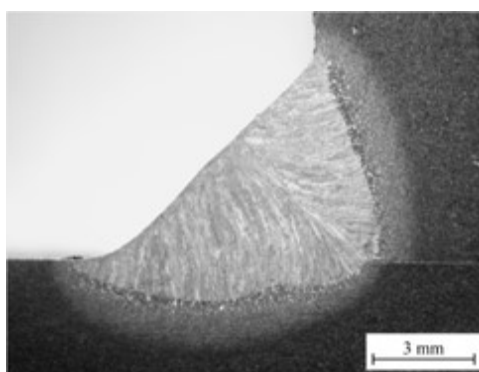


Figura 4. Macrografia da junta soldada ASTM A36_ER70S-6_TA

Para a investigação do comportamento das juntas soldadas quando submetidas a carregamento quase estático “fora do plano”, foi utilizado um pórtico desenvolvido no LS&TC. Trata-se de uma estrutura robusta e nela foi montado um dispositivo rígido para fixação dos corpos de prova. Este dispositivo foi projetado para permitir que os ensaios dos oito conjuntos soldados de cordões paralelos e de oito conjuntos soldados de cordões transversais fossem realizados sem necessidade de alteração de sua posição, minimizando a possibilidade de incoerência nos resultados. O pistão hidráulico alojado no pórtico está conectado a uma unidade hidráulica composta por uma bomba hidráulica, um motor e um inversor de frequência. Uma célula de carga modelo Q-10T e um transdutor de deslocamento linear (LVDT), ambos utilizando a configuração de $\frac{1}{2}$ ponte de Wheatstone, coletam as informações e as transmitem para um sistema multicanal digital universal Spider 8 da marca HBM.

Quarenta e oito ensaios dinâmicos de carregamento excêntrico por impacto estrutural “fora do plano” foram realizados. O martelo de impacto com massa de 252 kg, quando lançado num ângulo de 60°, impacta a peça na velocidade de 4,84 m/s e com energia cinética de 2,95 kJ, conforme descrito em [6,7,15-17].

Os conjuntos soldados foram colocados em um dispositivo de fixação rígido, alojado na base do equipamento. O componente no martelo que sofre o contato com o membro (plano) em balanço é denominado punção, cujo formato é cilíndrico e, portanto, o impacto aproximadamente ocorre através de uma linha. Este contato ocorre quando o martelo adquire a sua máxima energia cinética, como mostrado na Figura 5a, onde também pode ser visto a câmera de alta velocidade.

A aquisição de dados para obter as velocidades no momento de impacto e após o membro em balanço percorrer 10 mm, foi realizada com o uso de uma câmera filmando com alta velocidade da fabricante Phantom, modelo V411; lente acoplada NIKKOR 105mm / f2.8, da Nikon e um filtro UV. A taxa de aquisição das imagens foi de 7000 quadros por segundo e a resolução de 512x512 pixels, sendo processada pelo software de aquisição PCC (Phantom Camera Control). Cabe destacar que o ponto de referência para coleta dos dados com a câmera sempre esteve fixo em cada conjunto soldado e na mesma posição relativa.

Nas Figuras 5b e c estão fotogramas da filmagem do experimento de lançamento do martelo de impacto em ângulo de 60°. A Figura 5b mostra o punção 11,049 ms após a liberação do martelo, na posição considerada ser o início do evento. Este é o momento que a referência no punção de impacto passa pela marca de 20 mm da escala, que está fixa na base do equipamento. Na Figura 5c a referência no punção cruza a marca de 30 mm, que se encontra na escala fixa no momento de 11,068 ms. A diferença de tempo e de posição do ponto de referência em relação à escala, fornece variação de tempo (Δt) de 0.019 ms e variação de posição (Δs) de 10 mm.

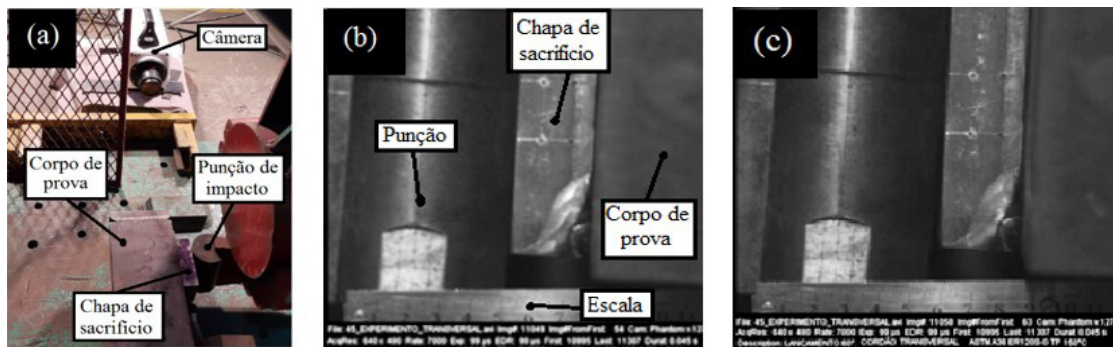


Figura 5. (a) Detalhe do punção de impacto, conjunto soldado, câmera usada na filmagem; (b) e (c) fotogramas do punção, chapa de sacrifício e pontos referenciais, corpo de prova e escala.

3. Resultados

3.1. Microdurezas e geometrias das juntas soldadas

Nas Figuras 6 e 7 estão perfis de microdureza (HV 0,5 kg e distância média entre indentações de 0,25 mm) de todas as seções transversais das juntas soldadas sobre os aços ASTM A-36 e ASTM A572G50, para mesmos parâmetros de soldagem, com eletrodos AWS ER70S-6 e AWS ER120S-G, nas temperaturas ambiente (TA) e de pré-aquecimento (TP) de 150 °C.

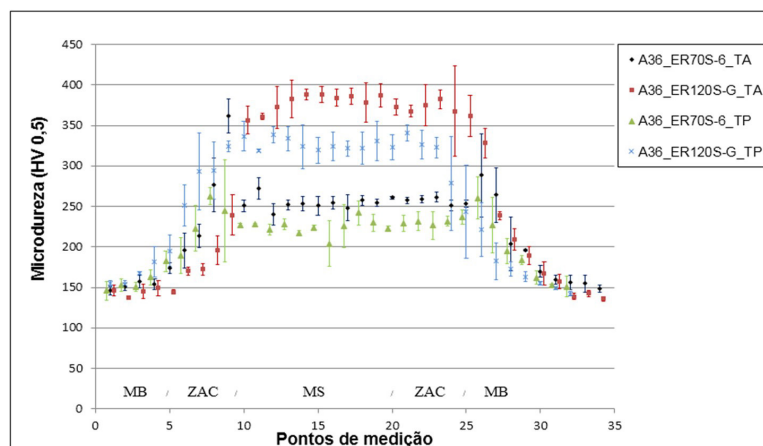


Figura 6. Durezas nas juntas soldadas sobre o ASTM A36. ZAC: zona afetada pelo calor; MB: metal base inalterado; MS: metal de solda.

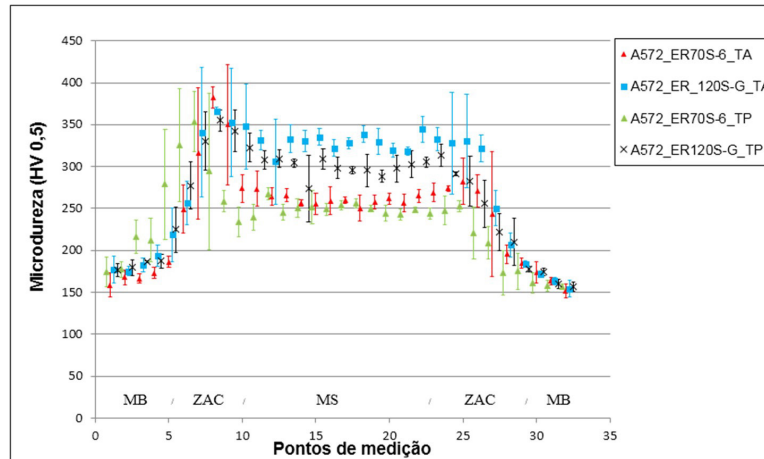


Figura 7. Durezas nas juntas soldadas sobre o ASTM A572 G50. ZAC: zona afetada pelo calor; MB: metal base inalterado; MS: metal de solda.

3.2. Ensaios de carregamento quase estático

Foram realizados 16 ensaios de carregamento quase estáticos sobre os conjuntos soldados com cordões de solda transversais (TW) e paralelos (PW), empregando-se os consumíveis AWS ER70S-6 e AWS ER120S-G, soldados na TA e com TP. Nas Figuras 8 e 9 estão os resultados para os aços ASTM A-36 e ASTM A572G50, respectivamente.

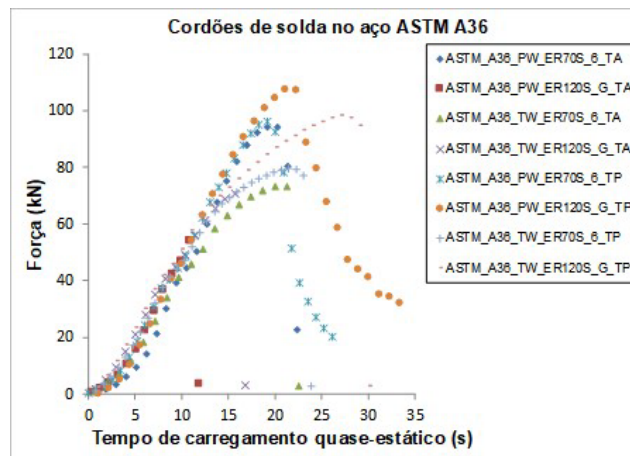


Figura 8. Tempo de carregamento quase estático em relação à força, apresentando a resistência dos cordões de solda transversais (TW) e paralelos (PW) para o aço ASTM A-36.

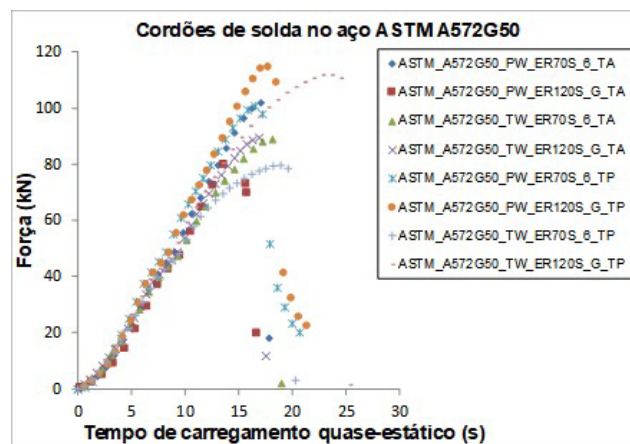


Figura 9. Tempo de carregamento quase estático em relação à força, apresentando a resistência dos cordões de solda transversais (TW) e paralelos (PW), para o aço ASTM A572 G50.

A Tabela 3 apresenta, de forma sucinta, as forças máximas suportadas pelas estruturas imediatamente antes de ocorrer à súbita redução dos seus valores devido ao início da fratura na junta. A área sob a curva está relacionada diretamente com a ductilidade estrutural dos conjuntos soldados [18] e a sua unidade é a mesma do carregamento por impulso (kN.s).

Tabela 3. Cargas máximas resistidas no ensaio de carregamento quase estático.

Material Base Aço ASTM A36			Material Base Aço ASTM A572G50		
Código de soldagem	Carga*	Área**	Código de soldagem	Carga*	Área**
	(kN)	(kN.s)		(kN)	(kN.s)
A36_PW_ER70S_6_TA	95	842	A572G50_PW_ER70S_6_TA	102	838
A36_PW_ER120S_G_TA	59	291	A572G50_PW_ER120S_G_TA	84	525
A36_TW_ER70S_6_TA	73	853	A572G50_TW_ER70S_6_TA	89	834
A36_TW_ER120S_G_TA	70	587	A572G50_TW_ER120S_G_TA	90	762
A36_PW_ER70S_6_TP	96	880	A572G50_PW_ER70S_6_TP	100	830
A36_PW_ER120S_G_TP	108	1162	A572G50_PW_ER120S_G_TP	115	929
A36_TW_ER70S_6_TP	79	1010	A572G50_TW_ER70S_6_TP	79	858

Nota: *Carga máxima resistida; **Área sob a curva.

3.3. Ensaio de carregamento por impacto

Nas Tabelas 4 e 5 estão os resultados dos ensaios de carregamentos quase estático e por impacto estrutural, além daqueles calculados analiticamente. Os resultados referentes ao carregamento por impacto foram extraídos de 48 experimentos, sendo 24 realizados com conjuntos soldados com o ASTM A-36 e 24 conjuntos soldados com o ASTM A572G50, na temperatura ambiente (TA) e com pré-aquecimento (TP) de 150 °C. Foram replicados três testes para cada combinação e as médias dos resultados da carga máxima resistida por impacto estão mostradas nas referidas tabelas.

Tabela 4. Cargas máximas resistidas pelos conjuntos soldados com o ASTM A36.

Material Base: Aço ASTM A36							
Metal de Adição (AWS)		Cordões de Solda Transversais (TW)			Cordões de Solda Paralelos (PW)		
		Carga Máxima Resistida (kN)			Carga Máxima Resistida (kN)		
		Análítico*	Quase Estático	Impacto** $\sigma(Desv. Pa.)$ ***	Análítico*	Quase Estático	Impacto** $\sigma(Desv. Pa.)$ ***
TA	ER70S-6	45,5	73	8,4 (2,7)	29,7	95	13,4 (2,4)
	ER120S-G	92,0	70	8,2 (1,4)	60,1	59	9,0 (2)
TP	ER70S-6	45,5	79	7,4 (2,6)	29,7	96	9,0 (0,8)
	ER120S-G	92,0	98	10,1 (2,3)	60,1	108	11,2 (1,36)

Notas: (*) Valores estimados e aproximados, considerando-se as soldas como linha e os limites de escoamento dos consumíveis; (**) Ângulo de elevação do martelo de 60° (valores obtidos através das medições pelos fotogramas); (***) $\sigma(Desv. Pa.)$ (kN).

Tabela 5. Cargas máximas resistidas pelos conjuntos soldados com o ASTM A572G50.

Material Base: Aço ASTM A572G50							
Metal de Adição (AWS)		Cordões de Solda Transversais (TW)			Cordões de Solda Paralelos (PW)		
		Carga Máxima Resistida (kN)			Carga Máxima Resistida (kN)		
		Análítico*	Quase Estático	Impacto** $\sigma(Desv. Pa.)$ ***	Análítico*	Quase Estático	Impacto** $\sigma(Desv. Pa.)$ ***
TA	ER70S_6	45,5	89	7,3 (3)	29,7	102	14,4 (0,1)
	ER120S_G	92,0	90	5,8 (1,7)	60,1	84	9,7 (1)
TP	ER70S_6	45,5	79	7,7 (2,8)	29,7	100	14,8 (2,1)
	ER120S_G	92,0	112	6,0 (1,2)	60,1	115	10,3 (0,5)

Notas: (*) Valores estimados e aproximados, considerando-se as soldas como linha e os limites de escoamento dos consumíveis; (**) Ângulo de elevação do martelo de 60° (valores obtidos através das medições pelos fotogramas); (***) $\sigma(Desv. Pa.)$ (kN).

Por sua vez, nas Figuras 10a e 10b estão macrofotografias de fraturas resultantes de ensaio de impacto estrutural nas soldas sobre ASTM A572G50, produzidas com eletrodo AWS ER120S-G depositado na temperatura ambiente e com pré-aquecimento de 150 °C, respectivamente.

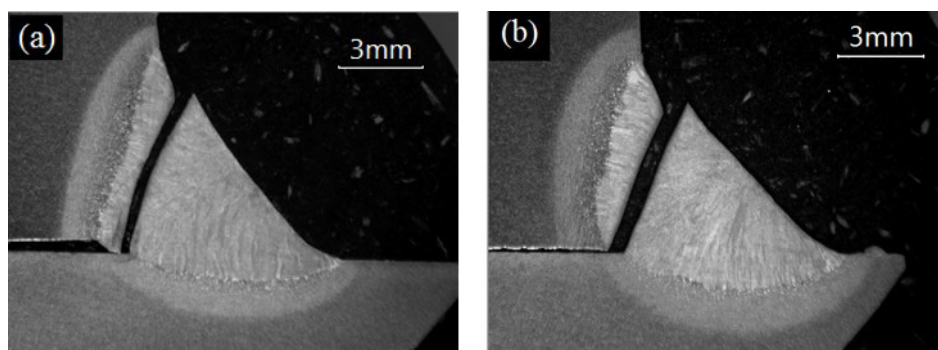


Figura 10. Macrofotografias de fraturas em cordões de solda transversal, produzidos sobre ASTM A572G50 eletrodo AWS ER120S: (a) na temperatura ambiente; (b) com pré-aquecimento de 150 °C.

A microdureza média ao longo da fratura mostrada na Figura 10a é 422 HV_{0,5} e o plano de fratura ocorreu em 75° tomando como referência a raiz do filete. Para a Figura 10b, a microdureza média junto a região de fratura é 424 HV_{0,5} e o plano de fratura ocorreu com ângulo de 70°.

Na Figura 11 estão mostradas as imagens das superfícies de fratura provocadas por carregamento de impacto estrutural, registradas com microscópio eletrônico de varredura (MEV), retiradas das extremidades dos cordões de solda produzidos com o eletrodo AWS ER120S-G. Estas superfícies das fraturas mostram: (a) cordão de solda PW realizado na TP sobre ASTM A36; (b) cordão de solda PW realizado TP sobre ASTM A572G50; (c) cordão de solda TW realizado em TA sobre ASTM A572G50; (d) cordão de solda TW realizado em TP sobre ASTM A572G50.

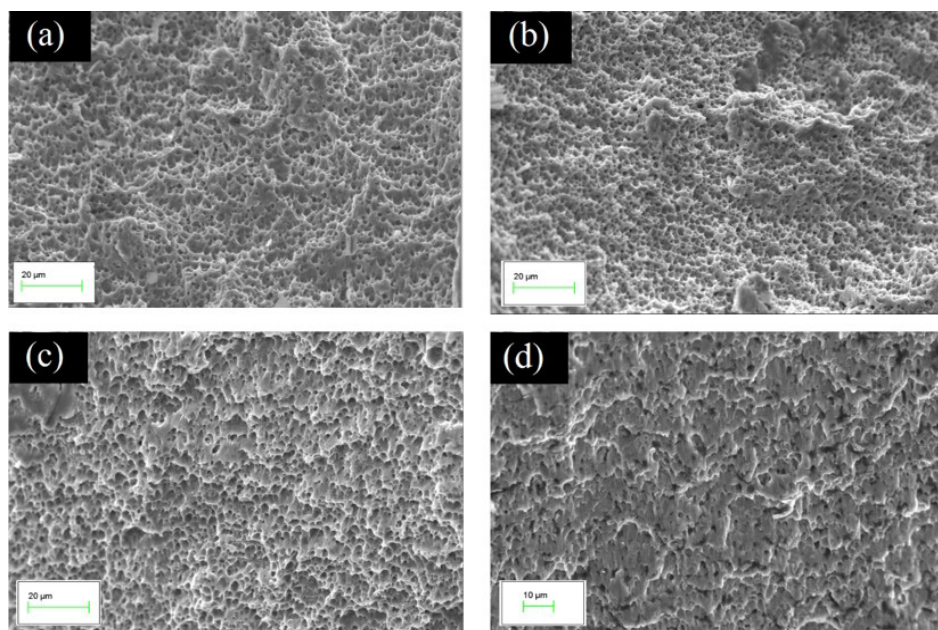


Figura 11. (a-d) Superfícies de fraturas registradas em MEV (vide texto).

Observe-se, ainda, na Figura 11: (a) microcavidades esféricas, provenientes de carga de tração uniaxial e, também, grande proporção de microcavidades com formato parabólico alongados em diferentes alturas; (b) microcavidades esféricas e poucas regiões com formato parabólico alongado; (c) microcavidades esféricas, mas (provavelmente) grande maioria cavidades parabólicas alongadas, na mesma direção que o carregamento, ocorrendo o surgimento de superfícies de fratura transgranular; (d) microcavidades alongadas, com (provável) predominância de fratura ocasionada por clivagem.

Na Figura 12 está a variação da microdureza no metal de solda, medida na seção transversal fraturada dos filetes de solda com o mesmo procedimento adotado para gerar os perfis de microdureza mostrados na Figura 6 e Figura 7, possibilitando assim comparação. Em relação aos perfis de microdureza medidos nas seções dos cordões de solda inalterados, houve um aumento da microdureza do metal de solda em todas as amostras analisadas, Este fato pode ser explicado pela deformação causar o

encruamento do metal de solda, com as seguintes principais diferenças percentuais (todos os valores aproximados): condição de soldagem A36_ER120S-G_TP_PW, ocorreu o menor aumento da microdureza, de 3%; condição A572G50_ER120S-G_TP_PW a microdureza teve o maior aumento, de 11%; condição A572G50_ER120S-G_TP_TW, com aumento da microdureza de 8%; condição A572G50_ER120S-G_TA_TW com aumento da microdureza de 6%.

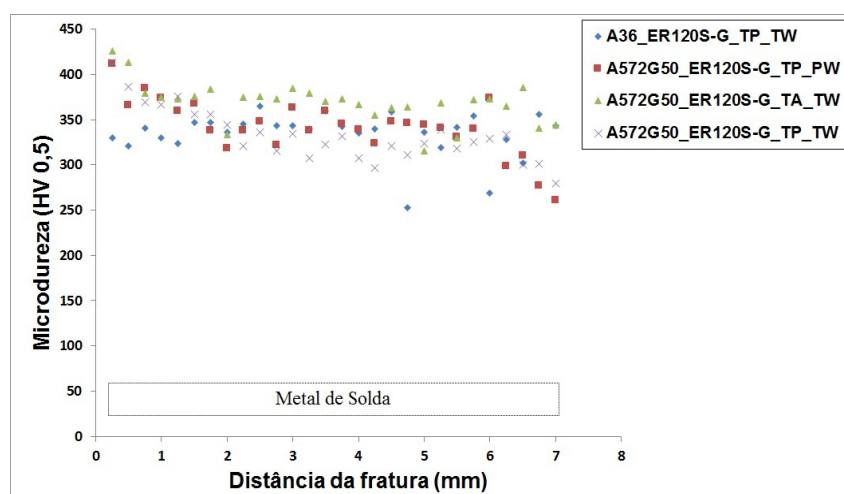


Figura 12. Valores de microdureza em relação à distância da fratura nas seções dos cordões de soldas fraturados.

4. Conclusão

Através da análise dos resultados apresentados neste artigo, são possíveis as seguintes conclusões:

- A resistência e a ductilidade de conjuntos soldados com junta de filete submetidos à carga de flexão simples quase estática e de impacto estrutural “Fora do Plano” são profundamente influenciadas pelo tipo de carregamento e da orientação dos cordões de solda em relação à direção de aplicação da carga.
- Nos ensaios de carregamento quase estático, para ambos os metais base, observou-se que cordões na posição paralela a direção de aplicação da carga, soldados com o eletrodo AWS ER120S-G pré-aquecidos a 150 °C suportaram maiores carregamentos em tempos menores em comparação com os cordões transversais, que suportaram menores carregamentos por tempos maiores.
- A utilização de dois metais de adição que produziram metais de solda com grandes diferenças de propriedades mecânicas, mostrou que o pré-aquecimento teve maior influência na resistência e micro dureza do filete de solda produzido com o eletrodo ER120S-G.
- Foi evidenciado que tanto para os cordões paralelos como para os cordões transversais em relação ao vetor de aplicação do carregamento, para todas as condições ocorre redução drástica na resistência mecânica da junta soldada, quando elas são submetidas a cargas de impacto estrutural. Nos ensaios de impacto estrutural dos conjuntos soldados com metal base ASTM A572 grau 50, cordões paralelos e metal de adição AWS ER70S-6, pré-aquecidos a 150 °C, foi atingida a resistência de aproximadamente 50% da carga analiticamente prevista. Para o metal base ASTM A36, soldado nas mesmas condições, a resistência foi de cerca de 46% da carga analiticamente prevista.
- Analisando as superfícies de fratura através de MEV, cordões de solda com a especificação A36_ER120S-G_TP_PW e A572G50_ER120S-G_TP_PW apresentaram fraturas com característica dúctil. Nos cordões de solda com a especificação A572G50_ER120S-G_TP_TW e A572G50_ER120S-G_TA_TW, foram observadas microcavidades alongadas em formato parabólico e também a presença de planos com fratura (provavelmente) transgranular ou clivagem.
- Em suma, estimativas analíticas para o dimensionamento de juntas soldadas sujeitas a carregamento quase estático aparentemente não devem ser empregadas para o caso do carregamento ser de impacto estrutural.

Contribuição dos autores

Esse trabalho é parte da Tese de Doutorado do Me. Eng^o. Alexandre Urbano Hoffmann, que está sendo desenvolvida sob a orientação do Prof. Dr. Ivan Guerra Machado. As principais contribuições do Me Eng^o. AUH foram: confecção dos conjuntos soldados, realização dos ensaios de impacto, medições, tratamento e análise dos resultados e escrita original do trabalho. As principais contribuições do Prof. Dr. IGM: idealização e proposição do tema da pesquisa; facilitação dos equipamentos e consumíveis para o desenvolvimento da pesquisa, além da supervisão, validação e revisão final do trabalho. Ambos também foram responsáveis pela metodologia de desenvolvimento do presente trabalho.

Agradecimentos

À UFRGS/PROMECC e UFRGS/DEMEC pelo empréstimo da câmera de alta velocidade. Para a Física Laboratório de Ensino do Instituto de Física/UFRGS para emprestando os sensores de deslocamento. Um dos autores (AUH) agradece à Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) por apoiar seu envolvimento nesta pesquisa.

Referências

- [1] Kwan YK, Gomez IR, Grondin GY, Kanvinde AM. Strength of welded joints under combined shear and out-of-plane bending. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2010;37(2):262-272. <http://dx.doi.org/10.1139/L09-150>.
- [2] Plumier A. General report on local ductility. *Journal of Constructional Steel Research*. 2000;55(1-3):91-107. [http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00079-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00079-6).
- [3] European Comitee for Standardization. EN 1993-1-8:2005. Eurocode 3: Design of Steel Structures - Part 1-8: Design of Joints. Europe: ECS; 2005.
- [4] Ligtenberg FK. International Test Series Final Report, IIW Doc. Xv-242-68. Genoa: International Institute of Welding; 1968.
- [5] Dawe JL, Kulak GL. Welded connections under combined shear and moment. *Journal of the Structural Division*. 1972;100(4):727-741.
- [6] Dal Mollin A, Machado IG. Weldments with fillet joints submitted to “In-Plane” quasi-static and impact torsion loads. *International Journal of Developmental Research*. 2020;10(6):36407-36416.
- [7] Dal Mollin A. Conjuntos soldados com juntas de filete submetidos a cargas de torção quase estática e de impacto estrutural “No Plano” [Tese de doutorado]. Porto Alegre: Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2020.
- [8] Tide RHR. Eccentrically loaded weld groups-aisc design tables. *AISC Engineering Journal*. 1980;17(4):90-5.
- [9] American Society for Testing and Materials. ASTM A36/A36M-19: standard specification for carbon structural steel. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2019.
- [10] American Society for Testing and Materials. ASTM A572/A572M-18: standard specification for high-strength-alloy columbium-vanadium structural steel. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2019.
- [11] Elektriska Svetsnings - Aktiebolaget. Certificado de qualidade dos consumíveis. ESAB; 2021 [acesso em 17 out. 2021]. Disponível em: <https://www3.esab.com.br/certificado.asp>
- [12] American Institute of Steel Construction. Welded connections: a primer for engineers. Chicago: AISC; 2006.
- [13] American Society for Testing and Materials. ASTM E384 – 17: standard test method for microindentation hardness of materials. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2017.
- [14] ImageJ. [página da internet]. USA: National Institutes of Health; 2021 [acesso em 17 out. 2021]. Disponível em: <https://imagej.nih.gov/ij>
- [15] Andrade LGC, Machado IG. Efeitos do carregamento de impacto em perfis soldados de aço. *Soldagem e Inspeção*. 2017;22(4):389-400. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2204.10>.
- [16] Andrade LGC. Impacto estrutural em membros soldados de aço [Dissertação de mestrado]. Porto Alegre: Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2018.
- [17] Kulmann MAR Fo. Resistência ao impacto estrutural de perfis soldados em aços de alta resistência mecânica [Dissertação de mestrado]. Porto Alegre: Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 2021.
- [18] Machado IG. Falhas de estruturas de aço soldadas devido à reduzida ductilidade. *Soldagem e Inspeção*. 2013;18(4):391-403. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-92242013000400011>.