

Influência da Resistência Mecânica do Metal de Base Sobre a Resistência à Fadiga de Juntas Soldadas Pelo Processo Semiautomático e Robotizado

Autores

Carpenedo, Marcelo^a. *mcarpenedo@gmail.com*

Reguly, Afonso^a. *reguly@ufrgs.br*

^a Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500 - Setor 4 – Prédio 74 - Sala 211, 91501-970, RS, Brazil.

Contato do autor: Tel.: +55 51-982178461; *E-mail: mcarpenedo@gmail.com*

Resumo

Os processos de soldagem evoluem de acordo com a demanda industrial, disponibilizado atualmente em modernas células robotizadas que aplicam os cordões de forma precisa e otimizada. O processo semiautomático, apesar de ser inferior ao robotizado em relação à qualidade e eficiência, ainda é amplamente utilizado na indústria, embora apresente desafios técnicos que limitam sua aplicação em um mercado cada vez mais exigente e competitivo. A compreensão dos limites de resistência mecânica das juntas impostas pela presença da solda serve de base para o desenvolvimento de soluções que sejam simples, efetivas e aplicáveis às necessidades industriais. Este trabalho demonstra como uma solução recente, aplicada em juntas para soldagem semiautomática com cordões intermitentes permitiu um ganho expressivo em resistência mecânica sob o efeito de cargas flutuantes, comparando os resultados com o uso do mesmo conceito em juntas fabricadas pelo processo robotizado e com materiais de ultra alta resistência mecânica. Os resultados experimentais mostram que as técnicas de soldagem utilizadas possuem um limite de resistência mecânica, delimitado pelo presente da junta soldada, o qual independe das propriedades mecânicas do metal de base.

Palavras Chave

Soldagem semiautomática, soldagem robotizada, resistência mecânica, qualidade.

Abstract

Welding processes evolve according to industrial demand, currently available in modern robotic cells that apply weld beads precisely and optimally. The semi-automatic process, despite being inferior to the robotic process in terms of quality and efficiency, is still widely used in industry, although it presents technical challenges that limit its application in an increasingly demanding and competitive market. Understanding the limits of mechanical resistance of joints imposed by the presence of the weld serves as a basis for the development of solutions that are simple, effective, and applicable to industrial needs. This work demonstrates how a recent solution, applied to joints for semi-automatic welding with intermittent beads, allowed a significant gain in mechanical resistance under the effect of fluctuating loads, comparing the results with the use of the same concept in joints manufactured by the robotic process and with ultra-high mechanical resistance materials. The experimental results show that the welding techniques used have a limit of mechanical resistance, delimited by the presence of the welded joint, which is independent of the mechanical properties of the base metal.

Keywords

Semi-automatic welding, robotic welding, mechanical strength, quality.

1-Introdução

A utilização de juntas soldadas na construção mecânica, independentemente do setor em que são aplicadas, constantemente desafiam os departamentos de desenvolvimento de projetos em relação aos seus efeitos negativos sobre as propriedades mecânicas dos componentes, principalmente a resistência à fadiga. O desenvolvimento tecnológico em todas as áreas correlatas com o processo de soldagem acontece de forma contínua e vem atendendo satisfatoriamente as necessidades industriais e comerciais, porém importantes desafios ainda permanecem sobre as características geométricas e metalúrgicas dos cordões de solda e sua influência sobre a resistência mecânica dos produtos que fazem uso deste processo de fabricação.

Em paralelo ao desenvolvimento de materiais e processos de fabricação avançados está a necessidade de caracterização de aspectos básicos como simples características geométricas tanto macro quanto microestruturais, demonstrando que a presença de cordões de solda acaba, em determinadas situações, anulando os benefícios trazidos por processos de fabricação de elevado grau tecnológico, como a soldagem robotizada ou materiais que apresentam propriedades mecânicas situadas no topo da pirâmide, como os aços microligados de média e alta resistência mecânica.

Este trabalho tem por objetivo descrever o comportamento mecânico de juntas soldadas expostas a carregamentos de fadiga, fabricadas a partir de aços de média e alta resistência mecânica, com alto valor agregado em relação às propriedades mecânicas disponibilizadas, comparando os resultados através do emprego de processos de soldagem semiautomático e robotizado.

2-Revisão Bibliográfica

A influência que a solda possui sobre a resistência mecânica de uma junta é amplamente conhecida e estudada há décadas, atuando em perdas importantes na capacidade de o material suportar carregamentos cíclicos [1]. Todas as principais características de um cordão de solda, desde geométricas até metalúrgicas, possuem algum grau de influência sobre sua resistência mecânica, entretanto algumas são mais pronunciadas do que outras, como por exemplo as imperfeições produzidas durante os ciclos de fusão-solidificação do metal de adição [2, 3]. As mordeduras, rechupes, ângulo do reforço da solda e aberturas na raiz do cordão são algumas das imperfeições visíveis com maior influência sobre as propriedades mecânicas da junta [4], porém são defeitos inerentes ao processo de soldagem e sua presença pode ser caracterizada de forma estatística, tendo sua eliminação dificultada.

Os efeitos que a soldagem tem sobre a resistência à fadiga dos aços são conhecidos e constantemente investigados, havendo grande número de pesquisas que corroboram o fato da solda, pela presença de defeitos originados durante a fusão e solidificação da poça de fusão, atuar na degradação das propriedades mecânicas da junta. Em juntas soldadas a resistência mecânica à fadiga é governada pelas características da zona fundida e não pelo metal de base, implicando que a utilização de aços de maior resistência mecânica não tem efeito significativo sobre o aumento da resistência mecânica da junta [1, 5]. Muitas pesquisas foram conduzidas para caracterizar esta condição, mostrando que a presença da solda produz uma forma de padronização da resistência à fadiga para todos os materiais avaliados dentro de um patamar com amplitude definida e afetado pela característica geométrica da junta avaliada. O assunto possui conhecida relevância tanto no meio acadêmico quanto, principalmente, no industrial [3], sendo que neste último é onde problemas com efeitos reais são experimentados e abordados. Aspectos envolvendo os modos de carregamentos, ambiente de exposição das peças, geometria e variações nos processos de fabricação implicam em variações que usualmente expõem divergências entre resultados de pesquisas acadêmicas e aplicações reais.

O desenvolvimento de soluções que contornem as limitações mecânicas e metalúrgicas impostas pelo processo de soldagem possui relevância fundamental [6], visto que os desafios tanto técnicos quanto econômicos vivenciados pela indústria limitam a capacidade de alguns setores ou instituições de investir todos os recursos necessários na pesquisa e desenvolvimento de métodos e técnicas que aprimorem os resultados do processo de soldagem.

Em estudo comparando o processo de soldagem semiautomático tradicional [7], onde as juntas foram produzidas com o posicionamento dos cordões usando somente a habilidade do operador com o uso de marcações de solda, foram descritos ganhos estruturais importantes ao componente mecânico ensaiado, além de garantir uma melhor uniformidade na abertura do nariz da junta. O ensaio foi conduzido avaliando juntas soldadas de chapas planas e finas de aço microligado, onde foi observado um aumento na resistência mecânica das amostras soldadas com o auxílio das marcações. O aumento se deu em função do melhor controle das condições geométricas da junta, [8], ocasionando ganhos de até 100% na resistência à fadiga.

Em desenvolvimento de práticas aplicáveis ao ambiente industrial a pesquisa deve ser conduzida de forma a prospectar resultados pontuais com técnicas aplicáveis em escala, focando em “melhoria na resistência à fadiga, custo e controle de qualidade” [6], pois quanto mais objetivo for o ajuste no processo de fabricação em relação à visualização dos ganhos, tanto em relação à aplicação quanto à inspeção, mais efetivo é o resultado [3].

3-Procedimento Experimental

Os experimentos foram conduzidos para comparar amostras de material de média e alta resistência mecânica soldadas pelo processo semiautomático, com e sem marcação de solda, e robotizado, tendo como objetivo comparar os ganhos de resistência à fadiga entre ambos.

Os corpos de prova foram fabricados a partir de chapas planas de aço com 3 mm de espessura, obtidos a partir dos materiais descritos nas tabelas 1 e 2, as quais descrevem suas composições químicas e propriedades mecânicas, respectivamente. Durante a obtenção das peças para a fabricação dos corpos de prova não foi observada a direção de laminação do material para orientação do corte, visto que a influência da presença de solda possui efeito sobrepujante sobre as propriedades básicas do material.

Tabela 1 - Composição química do aço ASTM A1011 Gr 50 Classe 2 e Hardox 450.

Material	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Cb	Ti	B
ASTM A1011 Gr 50 Classe 2 ¹	0,15	1,35	-	0,04	0,04	0,2	0	0,2	0,1	0,005	0,005	0,005	-
Hardox 450 ²	0,26	1,6	0,7	0,025	0,01	-	2	1,4	0,6	-	-	-	0,005

Fonte: ¹: ASTM A1011 (2008); ²: SSAB.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos metais de base.

Material	Tensão de escoamento Mpa	Tensão máxima MPa	Alongamento mínimo % (50 mm)	Dureza (HBW)
ASTM A1011 Gr 50 Classe 2 ¹	340 (min)	450 (min)	22	-
Hardox 450 ²	1250	-	-	475

Fonte: ¹: ASTM A1011 (2008); ²: SSAB.

A tabela 3 exemplifica as configurações dos diferentes corpos de prova avaliados neste experimento.

Tabela 3: Quantidade de amostras ensaiadas por fadiga para cada configuração de corpo de prova.

Material	Processo de Soldagem	
	Semiautomático	Robotizado
NBR 6656 LNE 380	Com marcação: 9	Não aplicado
NBR 6656 LNE 380	Sem marcação: 9	Sem marcação: 14
Hardox 450	Não aplicado	Sem marcação: 9

As peças foram soldadas de acordo com os parâmetros descritos na tabela 4, para ambos os materiais, finalizando com a obtenção de espécimens conforme ilustrado na figura 1.

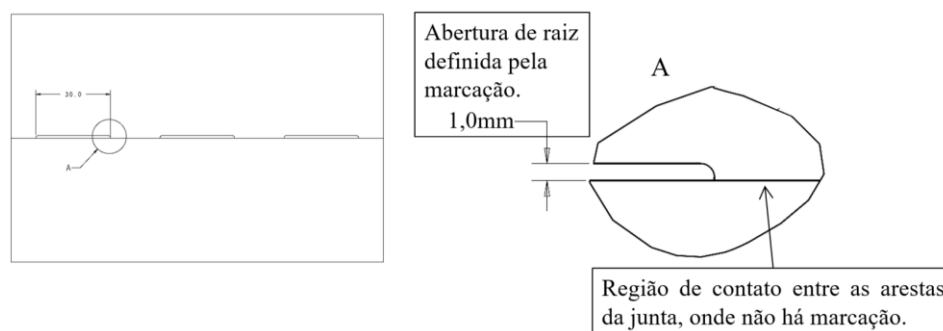
Tabela 4 - Parâmetros de solda para fabricação dos corpos de prova.

Parâmetro	Métrica	Valor
Corrente de soldagem	A	130
Voltagem do arco elétrico	V	18
Velocidade de deslocamento da tocha	mm/s	5
Gás de proteção	-	Ar + 20%CO2
Fluxo de gás de proteção	L/min	18
Tamanho do arame de solda (diâmetro)	mm	0,8
Ângulo de deslocamento da tocha	Graus	70
Distância bico de contato-peça	mm	10
Cobre junta	-	Não
Posição de soldagem	-	1G
Tipo de junta	-	Junta de topo
Preparação da junta	-	Chanfro paralelo

Fonte: O autor.

As amostras foram obtidas através da união de duas placas com largura e comprimento de 50,0 mm x 150,0 mm, respectivamente, conforme mostrado na figura 1, mantendo uma abertura de raiz de 1mm. Para as amostras sem as marcações de solda a abertura de raiz foi definida com o uso de um espaçador de 1mm de espessura, inserido entre as placas durante o posicionamento das peças no dispositivo de solda, sendo removidos para a posterior soldagem. Para as amostras com as marcações de solda a abertura de raiz já é definida pela existência da marcação de solda, sendo ajustada através do simples contato entre as duas metades das placas a serem unidas por solda.

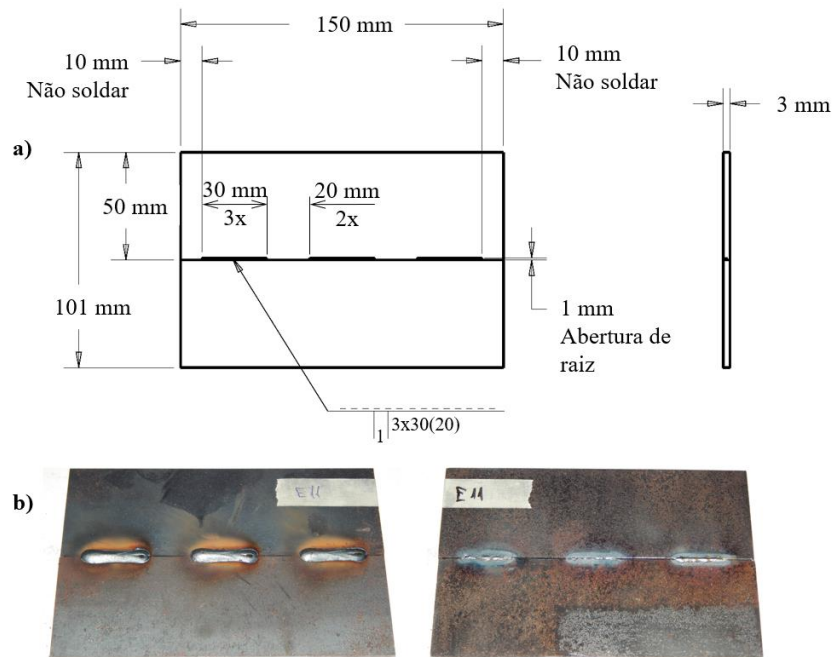
Figura 1 – Abertura de raiz da junta definida pela presença da marcação de soldagem.



As marcações de soldagem são delimitações físicas aplicadas na aresta de solda das peças e têm por objetivo orientar o soldador em relação ao correto posicionamento do cordão, eliminando variáveis do processo que resultam em imprecisão dimensional nos posicionamentos de início e fim dos cordões, melhorando os valores de seu comprimento e espaçamento. Esta marcação fica visível ao soldador mesmo com a presença da luminosidade do arco elétrico, pois é uma limitação física presente no material das peças.

As placas soldadas possuem espessura de 3,17 mm, sendo unidas com três cordões de solda topo com comprimento de 30,0 mm, chanfro reto e espaçamento entre cordões de 20,0 mm. As extremidades dos corpos de prova não receberam solda na região de 10,0 mm da borda lateral, conforme mostrado na figura 2.

Figura 2: a) Desenho para fabricação dos corpos de prova para os ensaios de fadiga¹ e b) Corpo de prova soldado em seu formato final.

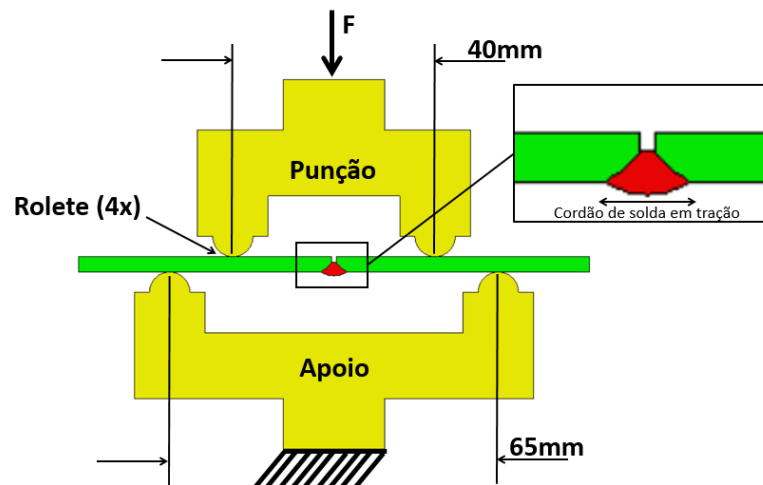


4-Ensaio de Fadiga

As mostras foram ensaiadas em 3 patamares de cargas conforme descrito na tabela 5, com taxa de carregamento de 0,1. O equipamento utilizado para os ensaios de fadiga foi uma máquina servo-hidráulica marca MTS, com capacidade para 100 KN, com a frequência dos ensaios em 16 Hz.

Os corpos de prova foram designados para avaliar a fadiga por flexão em 4 pontos, sendo este o modo de carregamento esperado para o tipo de solda a ser avaliada. A figura 3 mostra a esquematização do ensaio, ilustrando a configuração do dispositivo para aplicação da carga e o posicionamento dos cordões de solda em relação à forma como serão solicitados durante os ensaios.

Figura 3 - Dimensões de posicionamento dos elementos utilizados nos ensaios de vida em fadiga.



¹ As dimensões gerais entre os corpos de prova com e sem a marcação de solda são as mesmas.

Os cordões de solda foram posicionados na parte inferior do dispositivo de aplicação de carga com o objetivo de submeter a região do reforço do cordão a esforços de tração, sendo que o punção de aplicação da força está posicionado no lado oposto da solda.

4-Resultados e Discussões

Os resultados dos ensaios de resistência à fadiga de juntas fabricadas com os materiais LNE380 e Hardox 450 são comparados na figura 4 e na tabela 5, onde pode ser observado que a diferença de resistência mecânica mínima entre os materiais de base, que é superior a 200% no Hardox em relação ao LNE 380, não possui efeitos no aumento da resistência à fadiga quando há presença de solda, neste caso solda de topo. Na comparação entre duas soldas robotizadas, mas utilizando materiais de base diferentes – LNE380 e Hardox 450 – o material LNE 380 apresentou resultados superiores ao Hardox 450, onde o LNE 380 apresentou aumento de resistência à fadiga em 28% e 16% para o menor e maior nível de carregamento, respectivamente.

Comparando as soldas realizadas de forma semiautomática, avaliadas somente com o material LNE380, as amostras com marcação apresentaram aumento de resistência à fadiga em 70% e 38% para o menor e maior nível de carregamento, respectivamente, em comparação com as amostras sem marcação das juntas.

Quando a comparação é feita entre a solda entre a solda semiautomática e robotizada a diferença resultante é superior em todos os aspectos. Comparando a resistência à fadiga somente do material LNE 380, a soldagem robotizada apresentou aumento de resistência de 226% e 1017% para o maior e menor nível de carregamento, respectivamente, em relação à soldagem semiautomática sem marcação. Com o uso da marcação para a soldagem semiautomática a diferença diminuiu para os níveis de 104% e 235%, considerando o maior e menor nível de carregamento, respectivamente.

Figura 4 – Resultados dos ensaios de fadiga para as amostras fabricadas com soldagem semiautomática e robotizada.

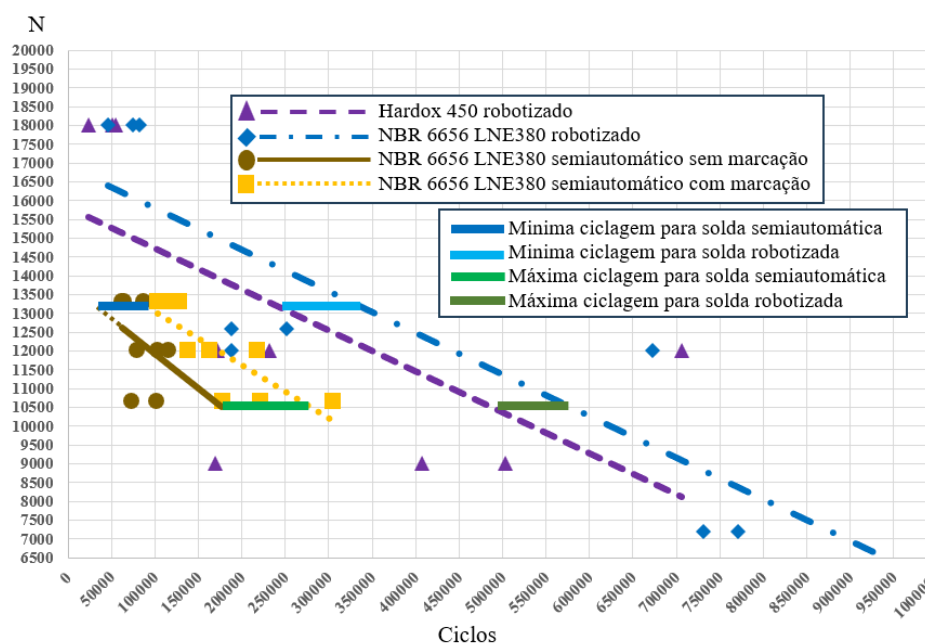


Tabela 5 - Parâmetros de solda para fabricação dos corpos de prova.

Amostra	Carga de teste (N)	Material do Corpo de Prova e Método de Soldagem			
		Hardox 450 robotizado M1	NBR 6656 LNE 380 robotizado M2	NBR 6656 LNE 380 semiautomático sem marcação M3	NBR 6656 LNE 380 semiautomático com marcação M4
		Número de Ciclos resistidos para cada corpo de prova			
C1	7200	-	1000000	-	-
C2	7200	-	771202	-	-
C3	7200	-	731323	-	-
C4	9000	168999	-	-	-
C5	9000	503692	-	-	-
C6	9000	407306	-	-	-
C7	10660	-	-	102085	221668
C8	10660	-	-	176497	305249
C9	10660	-	-	73490	177458
C10	12000	706513	672923	102946	137571
C11	12000	231337	187909	80021	162989
C12	12000	172214	-	116155	218305
C13	12600	-	251387	-	-
C14	12600	-	188167	-	-
C15	13300	-	-	65000	128186
C16	13300	-	-	86411	103175
C17	13300	-	-	62260	120809
C18	18000	50614	74478	-	-
C19	18000	55164	45863	-	-
C20	18000	23421	81405	-	-

Ao observar os valores absolutos das variações entre os diferentes tipos de soldagem para os máximos e mínimos níveis de carregamento, conforme descrito na tabela 6, é possível verificar que as variações se mantêm dentro da faixa de 70000 a 105000 ciclos. Para a soldagem robotizada esta variação fica precisamente delimitada entre 90000 e 95000 ciclos, o que corrobora o controle dimensional da junta na eficácia estrutural mediante carregamentos flutuantes.

Tabela 6 - Parâmetros de solda para fabricação dos corpos de prova.

Material	Tipo de Soldagem	Presença de Marcação	Máximo Nível de Carregamento (N)	Variação Absoluta (Ciclos)	Mínimo Nível de Carregamento (N)	Variação Absoluta (Ciclos)
NRB 6656 LNE 380	Semiautomática	Não	175000	105000	30000	70000
NRB 6656 LNE 380	Semiautomática	Sim	280000		100000	
NRB 6656 LNE 380	Robotizada	Não	570000	90000	335000	95000
Hardox 450	Robotizada	Não	480000		240000	

5-Conclusão

Os ganhos de resistência mecânica à fadiga alcançados para as amostras fabricadas pelo processo de soldagem semiautomática com marcação de solda e com a solda robotizada, em comparação com a soldagem semiautomática sem marcação, deve-se à padronização geométrica da junta que ambos os processos possibilitam em comparação com o processo semiautomático tradicional. Nesta situação não é a padronização por si própria que traz os benefícios à resistência mecânica, mas a redução da probabilidade

de problemas como falta de penetração, redução ou aumento excessivo da abertura de raiz da junta, além da variação no comprimento e espaçamento dos cordões. Estes parâmetros são diretamente influenciados pela manuseabilidade da tocha de solda, situação que é impactada, nestes casos positivamente, pela adição de controles externos para minimizar as imperfeições causadas pelo posicionamento relativo das peças que compõem a junta soldada. Na soldagem semiautomática este controle é realizado de forma manual pelo soldador. Na soldagem robotizada este controle é realizado pelos comandos computadorizados.

O efeito que a padronização geométrica da junta tem sobre sua resistência mecânica é corroborado com a comparação entre a solda semiautomática e robotizada, ocasionando ganhos de até 1017% para esta última. Esta constatação fornece dados para classificar as juntas soldadas com a presença das marcações ou com processo robotizado em um patamar acima do processo de soldagem semiautomática comum, sem as marcações.

Quando as juntas com materiais de diferentes faixas de resistência mecânica são comparadas com o uso de solda robotizada para sua fabricação, percebe-se que as propriedades mecânicas do metal base são anuladas, estando a resistência da peça governada pela resistência mecânica da junta soldada.

Neste trabalho são apresentados os resultados de dois grupos distintos de ensaios: amostras fabricadas com solda semiautomática e com solda robotizada. Embora sejam feitas comparações entre as amostras de cada grupo, a avaliação entre os grupos exemplifica uma alternativa técnica e economicamente viável para o aumento da resistência mecânica de juntas soldadas que é o uso das marcações para delimitar o posicionamento de início e fim do cordão de solda. O uso deste recurso não possui utilidade em soldas robotizadas, embora não haja limitações que o impeçam de ser usado, sendo seu uso integralmente dedicado à soldagem que faz uso das habilidades do operador para o manuseio da tocha de soldagem e aplicação da solda.

O uso da soldagem robotizada é um objetivo e um desejo comum no setor mecatrônico, porém desafios técnicos e econômicos limitam sua aplicação, impondo a necessidade de continuar com o uso da soldagem semiautomática. Esta condição persistirá na indústria por tempo indefinido e o desenvolvimento de soluções que ofereçam resultados factíveis e perceptíveis ao setor são fundamentais para o aprimoramento contínuo dos produtos manufaturados.

Este trabalho contribui na comprovação do efeito negativo que a solda possui sobre a resistência à fadiga de juntas soldadas, descrevendo o comportamento mecânico de materiais com diferenças de resistência mecânica, fazendo com que a presença de solda uniformize seu comportamento estrutural. Este conhecimento vem sendo reforçado a cada nova pesquisa, porém este trabalho relata uma situação em que uma mudança nos parâmetros do processo de fabricação modifica os resultados de uma forma importante, somando para o ganho de resistência mecânica. A mudança em questão não envolve a utilização de recursos com alta tecnologia ou soluções que agreguem custo sem valor ao produto, mas uma pequena mudança na configuração geométrica das peças que serão soldadas, a qual é definida durante o desenvolvimento gráfico do componente, passando a incorporá-lo ao longo de sua vida útil, sem mais aumento de custos.

Referências

- [1] MADDOX, Stephen John. Fatigue strength of welded structures. Woodhead publishing, 1991.
- [2] BJORK, T., Samuelsson, J. & Marquis, G. The Need for a Weld Quality System for Fatigue Loaded Structures. *Weld World* **52**, 34–46 (2008).
- [3] JONSSON, B., Samuelsson, J. & Marquis, G.B. Development of Weld Quality Criteria Based on Fatigue Performance. *Weld World* **55**, 79–88 (2011).
- [4] NIRLAULA, A., Remes, H. & Lehto, P. Local weld geometry-based characterization of fatigue strength in laser-MAG hybrid welded joints. *Weld World* **67**, 1527–1544 (2023).
- [5] BRAUN, Moritz et al. Comparison of local fatigue assessment methods for high-quality butt-welded joints made of high-strength steel. *Forces in Mechanics*, v. 6, p. 100056, 2022.
- [6] SMITH, Ian FC; HIRT, Manfred A. A review of fatigue strength improvement methods. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 12, n. 1, p. 166-183, 1985.
- [7] CARPENEDO, Marcelo. Variação Dimensional do Comprimento e espaçamento de Cordões de Solda Com a utilização de Análise Fatorial em Três Níveis. *Infosolda*, 2023.
- [8] CARPENEDO, Marcelo. Efeitos Que a Marcação na Junta de Solda Tem na Vida em Fadiga de Chapas Soldadas Com Cordões Intermitentes Pelo Processo de Soldagem MAG no Aço ASTM A1011 Gr50 Classe 2. UFRGS, 2021.