

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

VINICIUS TRAVAIN

**Avaliação da influência do reforço de cordão na resistência
mecânica da junta soldada pelo processo de soldagem MIG/MAG**

Uberlândia

2024

VINICIUS TRAVAIN

**Avaliação da influência do reforço de cordão na resistência
mecânica da junta soldada pelo processo de soldagem MIG/MAG**

Projeto de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de **BACHAREL** em
ENGENHARIA MECÂNICA

Orientador: Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

Uberlândia

2024

VINICIUS TRAVAIN

**Avaliação da influência do reforço de cordão na resistência
mecânica da junta soldada pelo processo de soldagem MIG/MAG**

Projeto de Conclusão de Curso APROVADO
pelo Colegiado do curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Faculdade de
Engenharia Mecânica da Universidade Federal
de Uberlândia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov (FEMEC/UFU) - Orientador;

Eng. MSc Victor Eduardo Silva Alves- (FEMEC/UFU)

Eng. Dra Anna Tokar – (FEMEC/UFU)

AGRADECIMENTOS

Agradeço demais aos meus pais pela confiança creditada a mim, todo apoio e dedicação para minha formação pessoal e profissional;

A minha namorada que sempre me apoiou e incentivou em todos os momentos.

Ao professor Volodymyr Ponomarov, pela paciência, dedicação e pela valiosa orientação que recebi durante o processo de desenvolvimento deste trabalho;

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso;

Ao LAPROSOLDA para disposição do material necessário as experimentações;

A todos meus amigos que tive o prazer de conhecer e durante o curso, que de alguma forma, contribuíram para minha formação e aprendizado.

RESUMO

Palavras-chave: Junta, Reforço, MIG/MAG, Sobremetal

Muitas vezes, associa-se o reforço de solda com uma solução para aumentar a resistência mecânica da solda. Este trabalho tem como objetivo verificar se tal suposição é certa, em particular, para soldagem MIG/MAG. Para isso, foram realizadas soldas de topo de peças de teste recortadas de uma barra chata de maneira a simular falta de enchimento, preenchimento completo e uma solda com sobremetal (reforço). As juntas resultantes foram submetidas ao teste de tração para avaliar sua resistência mecânica. Os resultados mostraram que caso usar um metal de adição com as características mecânicas maiores do que as do metal de base (o que foi o caso neste trabalho), o rompimento da peça de teste vai acontecer pelo metal de base (fora da área da solda) tanto para as peças de teste com o enchimento completo, como para as com reforço. Isto comprova que mesmo se o reforço sim aumentar a resistência mecânica do cordão, uma tal contribuição dele é absolutamente desnecessária, em termos de um aumento ainda maior da resistência mecânica da junta soldada, e acarreta apenas gastos adicionais em vão.

ABSTRACT

Keywords: Joint, Reinforcement, GMAW, Overmetal

Often, weld reinforcement is associated with increased mechanical strength of the weld. This study aims to verify whether such an assumption holds true for GMAW welding. To achieve this, butt welds were performed on test pieces cut from a flat bar to ensure lack of penetration, full penetration, and a weld with overfill (reinforcement). The resulting joints underwent tensile testing to assess their mechanical strength. The results indicated that when using a filler metal with mechanical characteristics greater than those of the base metal (as was the case in this study), the fracture of the test piece occurred in the base metal (outside the weld area) for both fully penetrated and reinforced test pieces. This confirms that even if reinforcement increases the mechanical strength of the weld bead, such a contribution is entirely unnecessary in terms of achieving a further increase in the mechanical strength of the welded joint, and it only results in additional unnecessary expenses.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Distribuição de tensões em uma junta de topo solicitada à tração	14
Figura 2 -	Influência do reforço de solda no fator de concentração de tensões	14
Figura 3 -	Características operacionais do processo MIG/MAG	16
Figura 4 -	Componentes do processo MIG/MAG.....	18
Figura 5 -	Composição química do aço A36.....	19
Figura 6 -	Proposta Experimental	20
Figura 7 -	Serralheira policorte usada na preparação das peças de teste	21
Figura 8 -	Barra cortada – peças de teste	21
Figura 9 -	União das peças de teste por ponteamento	21
Figura 10 -	Marcação do corte com um ângulo de 30°	22
Figura 11 -	Uma abordagem de corte das peças de teste para formar um chanfro em “V”.....	22
Figura 12 -	Corte das Peças de Teste	23
Figura 13 -	Três grupos de peças de teste para soldagem com “sobremetal”, com “falta de enchimento” e “sem reforço”	23
Figura 14 -	Fonte de Soldagem Multiprocessos	24
Figura 15 -	Gás de proteção usado nos testes	24
Figura 16 -	O manômetro de pressão de gás e o medidor de vazão	25
Figura 17 -	Esmerilhamento das peças de teste	25
Figura 18 -	Fixação das peças de teste para confeccionar corpos de prova	26
Figura 19 -	Máquina usada para o teste de tração	27
Figura 20 -	Teste de tração. Posição do corpo de prova	27
Figura 21 -	Registro da Força Aplicada	28
Figura 22 -	Fratura da ZAC para metal de base (corpo de prova 17)	35
Figura 23	Vista geral do corpo de prova 17	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Reforço Máximo Permitido	15
Tabela 2 -	Marcação das Peças de teste	20
Tabela 3 -	Resultados dos Testes de Tração	29
Tabela 4 -	Curvas “tensão – deformação” e a aparência de fraturas	31

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

S	Area da Sessão transversal
ZAC	Zona Afetada pelo Calor
σ_{ESC}	Tensão de Escoamento
σ_{MAX}	Tensão Máxima de Tração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	133
	2.1 SOLDAGEM MIG/MAG.....	16
3	METODOLOGIA.....	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	2929
5	CONCLUSÕES.....	2938
	REFERÊNCIAS.....	4040

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros processos de soldagem a arco elétrico, usando eletrodos não consumíveis de carvão ou grafite e eletrodos de metal nu, surgiram no final do século XIX. Eles rapidamente ganharam destaque na indústria metalmeccânica devido às inúmeras vantagens que ofereciam em relação a outros métodos de união, como rebites e parafusos, a saber, por exemplo, rapidez, baixo custo de operação, alta resistência mecânica da junta. Desde o início, ficou claro que as juntas soldadas apresentavam uma resistência mecânica significativamente superior às juntas rebitadas, mas, naquela época, a junta soldada apresentava a resistência mecânica 10 – 15% mais baixa do que o metal de base (HAMILTON D.T. and OBERG E., 1918).

Atualmente, a soldagem é o método preferido para a união permanente de metais, contando com mais de cinquenta processos distintos empregados na indústria. Isso se deve, em grande parte, aos avanços tecnológicos nos equipamentos utilizados na execução dos procedimentos de soldagem.

Conforme destacado por QUITES (2002), os processos de soldagem que fazem uso do arco elétrico como fonte de calor são os mais proeminentes e amplamente reconhecidos na indústria. Além disso, a soldagem por fusão também é aplicada em revestimentos e na manufatura aditiva.

A obtenção de soldas de alta qualidade depende de diversos fatores, incluindo a seleção criteriosa dos consumíveis, a regulação precisa dos parâmetros de soldagem e a habilidade dos soldadores. Nos dias de hoje, é possível obter soldas com resistência à tração igual ou até maior do que o metal de base (dependendo do metal de adição usado). (CASTRO et al., 2017; CIMM, 2017).

No passado, acreditava-se que ao depositar mais o metal de adição assegurando um reforço maior (reforçar a seção soldada), maior seria a resistência mecânica da junta. No entanto, logo se percebeu que o reforço da solda pode, na verdade, prejudicar a capacidade de resistência mecânica da junta.

O aumento do reforço de solda leva a concentrações de tensão na união devido às descontinuidades geométricas da junta, tornando-a mais susceptível a falhas, especialmente em situações de esforços cíclicos. Por isso, a altura do reforço de soldas está limitada pelas normas de soldagem.

Além disso, a zona afetada pelo calor, onde o metal sofre alterações em suas propriedades, às vezes apresenta uma ligeira redução na resistência mecânica, influenciando a resistência global da junta soldada.

A evolução contínua da tecnologia de soldagem tem permitido o desenvolvimento de novos materiais e métodos de soldagem mais avançados. Isso inclui a soldagem por arco submerso, a soldagem a laser e a soldagem com plasma, entre outros, cada um com suas próprias aplicações e vantagens específicas.

A automação e a robótica desempenham um papel cada vez mais importante na soldagem industrial, melhorando a precisão e a consistência das soldas, reduzindo custos e aumentando a eficiência da produção. Essas tecnologias avançadas também são cruciais em setores de alta demanda, como a indústria automobilística, aeroespacial e de construção naval.

Além disso, a soldagem é uma técnica essencial na manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D metálica, que permite a criação de componentes complexos e personalizados com alto desempenho. O uso da soldagem nesse contexto é fundamental para a união de camadas de material, garantindo a integridade estrutural dos objetos produzidos. Portanto, a soldagem continua a ser uma área de pesquisa e desenvolvimento vital para atender às demandas das indústrias modernas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma estrutura soldada pode estar sujeita a dois tipos de carregamentos: estático e/ou dinâmico. No carregamento estático, as cargas não variam de forma significativa com o decorrer do tempo. Já no dinâmico, o carregamento varia consideravelmente em um intervalo de tempo e pode ser cíclico (ASM TREINAMENTOS, 2007; MACHADO, 1996).

Qualquer tensão que varie com o tempo pode potencialmente provocar falhas por fadiga, onde estruturas falham mesmo quando são submetidas a tensões com níveis inferiores ao limite de resistência ao escoamento do material. Uma trinca causada por fadiga terá início, tipicamente, em uma descontinuidade no material em que a tensão cíclica é elevada. Em uma junta soldada, tal descontinuidade pode ser a margem da solda (linha entre o metal de base e o reforço da solda), pois é um concentrador de tensões. Neste local, há um pico de tensões, bastante superior à tensão nominal, causada apenas pelo carregamento (Figura 1). (CASTRO et al., 2017; ASM TREINAMENTOS, 2007).

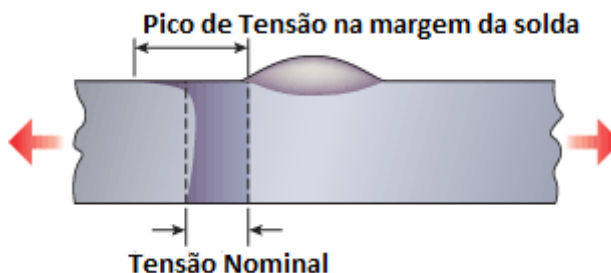


Figura 1 - Distribuição de tensões em uma junta de topo solicitada à tração. Fonte: TWI, 2019

A fim de quantificar tais picos, emprega-se o fator de concentração de tensões geométrico (K_t), o qual pode ser definido como a razão entre a tensão máxima na vizinhança imediata da descontinuidade e a tensão que ocorre na seção total longe da descontinuidade mostrada abaixo (Figura 2). (MACHADO, 1996; CASTRO et al., 2017).

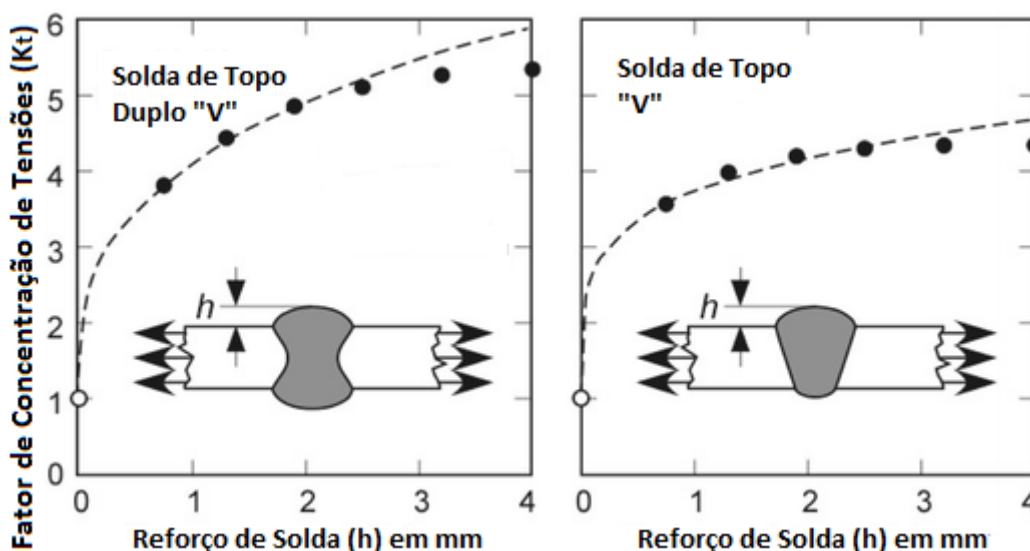


Figura 2 – Influência do reforço de solda no fator de concentração de tensões. Fonte: Kiyak and Madia 2016.

Diante do exposto, é evidente que a concentração de tensões, resultante das descontinuidades geométricas geradas pelo reforço de solda, desempenha um papel crítico na redução da resistência à fadiga da junta soldada, influenciando diretamente as áreas propensas à nucleação e ao subsequente crescimento de trincas causadas pela fadiga (CIMM, 2017; MACHADO, 1996).

É crucial destacar que minimizar a concentração de tensão é fundamental para mitigar os potenciais riscos associados às tensões em uma junta soldada. Portanto, uma abordagem altamente eficaz para eliminar esses concentradores de tensão em juntas soldadas de topo é a remoção do reforço de solda, um procedimento que comumente envolve o uso de esmerilhamento. Essa técnica de remoção do reforço de solda não apenas contribui para a melhoria da integridade estrutural por promover a uniformidade da tensão ao longo da junta

soldada, mas também aumenta a vida útil da junta soldada, reduzindo o risco de falha prematura (CASTRO et al., 2017; CIMM, 2017).

Além disso, é importante ressaltar que a remoção do reforço de solda não apenas melhora a resistência à fadiga e a integridade estrutural, mas também simplifica os processos de inspeção, facilitando a detecção de possíveis defeitos ou trincas superficiais. Isso torna os procedimentos de manutenção mais eficazes e econômicos, uma vez que permite uma avaliação mais precisa do estado da junta soldada, identificando potenciais problemas antes que eles se agravem e causem danos significativos. Portanto, a remoção do reforço de solda é uma prática que não apenas prolonga a vida útil da estrutura, mas também otimiza os custos e recursos envolvidos na manutenção preventiva (MACHADO, 1996; CIMM, 2017).

Na Tabela 1, o “R máx” diz respeito ao reforço máximo permitido. Para uma chapa de 19 mm de espessura, por exemplo, a altura do reforço máximo permitido é de 3 mm. Deve-se limitar a altura deste reforço, pois, caso os valores máximos sejam ultrapassados, tem-se a ocorrência do que chamamos de “reforço excessivo”, considerado um defeito de soldagem (CASTRO et al., 2017; ASM TREINAMENTOS, 2007)..

Tabela 1- Reforço Máximo Permitido Fonte: Structural Welding Code – Steel, na Clause 5

Tabela 5.9			
Programas de Perfil de Solda (ver 5.23)			
Espessura nominal A	(t = espessura da chapa mais espessa unida para PCJ; t = tamanho da solda para PJP)		
	t	R min.	R max.
	≤ 1 em [25 mm]	0	1/8 em [3 mm]
	> 1 em [25 mm]	0	3/16 em [5 mm]
	≤ 2 em [50 mm]	0	1/4 em [6 mm]
	> 2 em [50 mm]	0	1/4 em [6 mm]
*PCJ - Penetração Completa da Junta		PPJ - Penetração Parcial da Junta	

2.1 SOLDAGEM MIG/MAG

Soldagem MIG/MAG é um processo de soldagem a arco que produz a união dos metais pela sua fusão com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo (e consumível) e a poça de fusão (Figura 4). A proteção da região da solda é feita por uma atmosfera protetora de gás inerte (Ar ou He) ou ativo (usualmente CO₂) ou misturas deles (Ponomarov, 2022).

A versão de soldagem MIG (Metal Inert Gas) é quando a proteção gasosa utilizada for constituída de um gás inerte, que não tem nenhuma atividade física com a poça de fusão. Enquanto na versão de soldagem MAG (Metal Active Gas) a proteção gasosa é feita com um gás ativo, ou seja, um gás que interage com a poça de fusão. A abreviatura GMAW (Gás Metal Arc Welding) é mais usada nos EUA e engloba ambas as versões deste processo de soldagem, tanto MIG, como MAG.(Ponomarov, 2022).

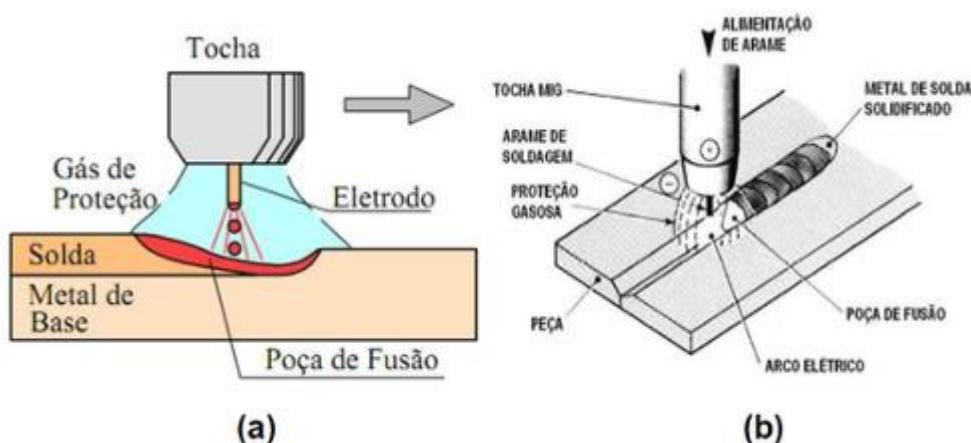


Figura 3 - Características operacionais do processo MIG/MAG. Fonte: Em (a) Balmer (2015) em (b) Fortes (2005)

O processo MIG/MAG pode ser aplicado de forma automática, quando o movimento da tocha é feito por uma máquina ou de forma semiautomática quando a tocha é conduzida por um soldador. (SUMIG, 2017)

A regulação dos parâmetros do processo MIG/MAG influenciará diretamente na geometria do cordão soldado, que é responsável tanto para a resistência mecânica da junta soldada, como para os custos de fabricação. (SUMIG, 2017)

Uma das principais características do processo MIG/MAG é elevada taxa de deposição, o pequeno comprimento da extensão do eletrodo permite o uso de uma alta densidade de corrente sem afetar a rigidez mecânica do eletrodo. Os diâmetros pequenos do arame eletrodo conferem um arco elétrico concentrado de alto poder de fusão. (CIIM, 2017).

Por vez as mais sérias desvantagens deste processo de soldagem seriam alta emissão de calor e luz, dificuldade de manuseio do equipamento e regulagem dos parâmetros mais complicada. Uma outra desvantagem deste processo de soldagem é a tendência de criar faltas de fusão do metal depositado com as bordas do chanfro, quando o arco é muito curto e transferência metálica acontece por curto-circuito. Neste caso a geração de calor pelo arco está comprometida, pois um certo tempo o arco fica apagado. Os resultados obtidos neste trabalho confirmaram esta limitação deste processo de soldagem (veja o Cap. 4). (SUMIG, 2017; (CIIM, 2017).

O equipamento básico para a soldagem MIG/MAG é composto por uma fonte de energia, um alimentador de arame, uma tocha de soldagem e uma fonte de gás de proteção com regulador de pressão e fluxômetro (Figura 4). (CIIM, 2017).

As fontes de energia têm grande influência sobre a qualidade e produtividade de um processo de soldagem e devem ter alguns requisitos como: produzir saídas de correntes de tensão com níveis e características adequadas, permitir regulagem dos valores de correntes e tensão e controlar a variação da densidade e forma dos sinais de corrente. (SUMIG, 2017).

O alimentador de arame é um sistema de motor de corrente contínua e com um drive de controle de velocidade que impulsiona o arame na direção da tocha. (CIIM, 2017).

Todos os componentes das tochas (principalmente o conduíte e o bico de contato) devem ser devidamente dimensionados (conforme o diâmetro do arame usado) para garantir uma alimentação de arame contínua e suave. (CIIM, 2017).

As tochas podem ser refrigeradas à água ou pelo próprio gás de proteção, dependendo de sua capacidade e do fator de trabalho. As refrigeradas à água são mais leves (menores seções transversais dos cabos e das partes da tocha). (SUMIG, 2017).

A classificação dos arames MIG/MAG é realizada de acordo com a norma AWS, que define os testes de qualidade que os arames devem atender. Para este trabalho, utilizaremos as seguintes normas:

AWS A5.18: Especificação para eletrodos e varetas utilizados na soldagem com proteção gasosa, abrangendo arames e varetas para os processos MAG e TIG. Alguns exemplos de arames classificados por essa norma são ER70S-3, ER70S-6 e ER70S-G e AWS A5.32: Especificação para os gases de proteção utilizados na soldagem. (SUMIG, 2024).

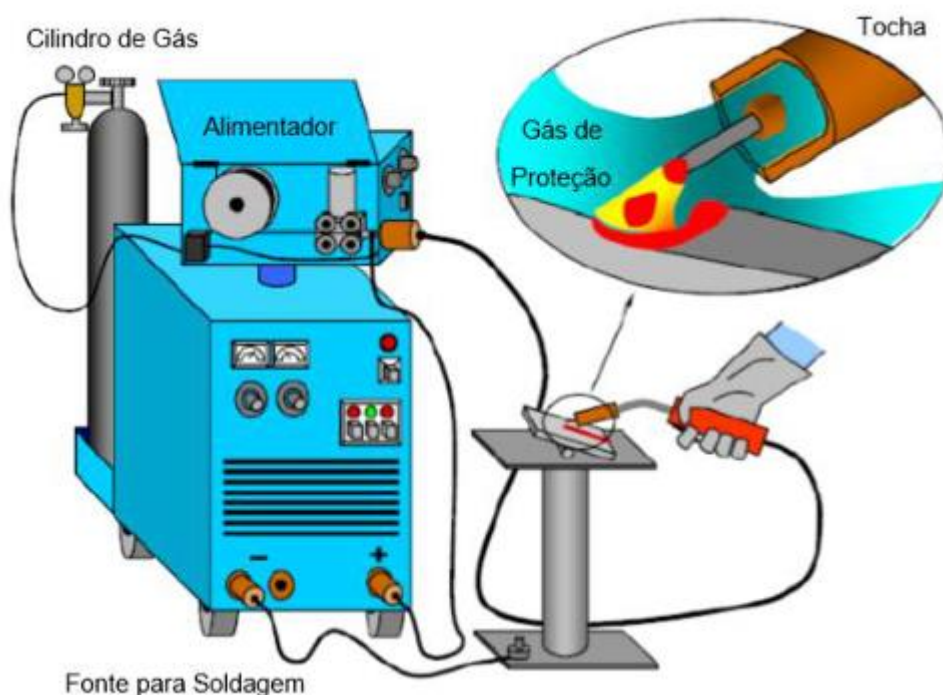


Figura 4 - Componentes do processo MIG/MAG. Material didático a disciplina de Fundição e Soldagem do Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov.

O gás de proteção é caracterizado como uma variável essencial na soldagem MIG/MAG, pois ele tem influência direta sob as características geométricas e a penetração do cordão de solda, ionização, formação e estabilização do arco elétrico além de proteger a poça de fusão dos efeitos do ar atmosférico. A vazão do gás a ser empregada no processo MIG/MAG é diretamente proporcional à intensidade de corrente elétrica utilizada (MOREIRA, 2008).

Com intuito de garantir essas características, três gases são frequentemente aplicados: argônio (Ar), dióxido de carbono (CO_2) e hélio (He), podendo ser aplicados puros ou em combinações entre si formando misturas binárias, ternárias e assim por diante. Contudo, pequenas quantias de oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2) mostraram-se vantajosas em algumas aplicações (ESAB, 2005).

3 METODOLOGIA

Para reduzir ao máximo os custos da etapa experimental, foi proposto cortar as peças de teste de uma barra chata de aço A36 5/8" x 3/16" (15,875 mm x 4,762 mm) utilizando uma Máquina Serralheiro Policorte 12-S (Figuras 6, 7 e 8). Em total foram cortadas 11 peças de teste de comprimento de 285 mm cada a serem posteriormente cortados no meio de maneira oblíqua para formar um chanfro de 60°, como vai ser mostrado a seguir. As 11 peças de teste foram divididas em três tipos conforme a solda a ser realizada, 3 peças com enchimento completo, outras três com falta de enchimento e as terceiras com reforço (veja Figura 6). Elas foram numeradas como indicado na Tabela 3. Em seguida deverão ser realizados testes de tração para comparar entre si esses três tipos de peças de teste assim como com o metal de base que não foi afetado pela soldagem (ou seja, com a barra sem solda) em termos da sua resistência mecânica.

Na Figura 5 podemos ver a composição do aço A36.

</

Figura 5 – Composição química do aço A36

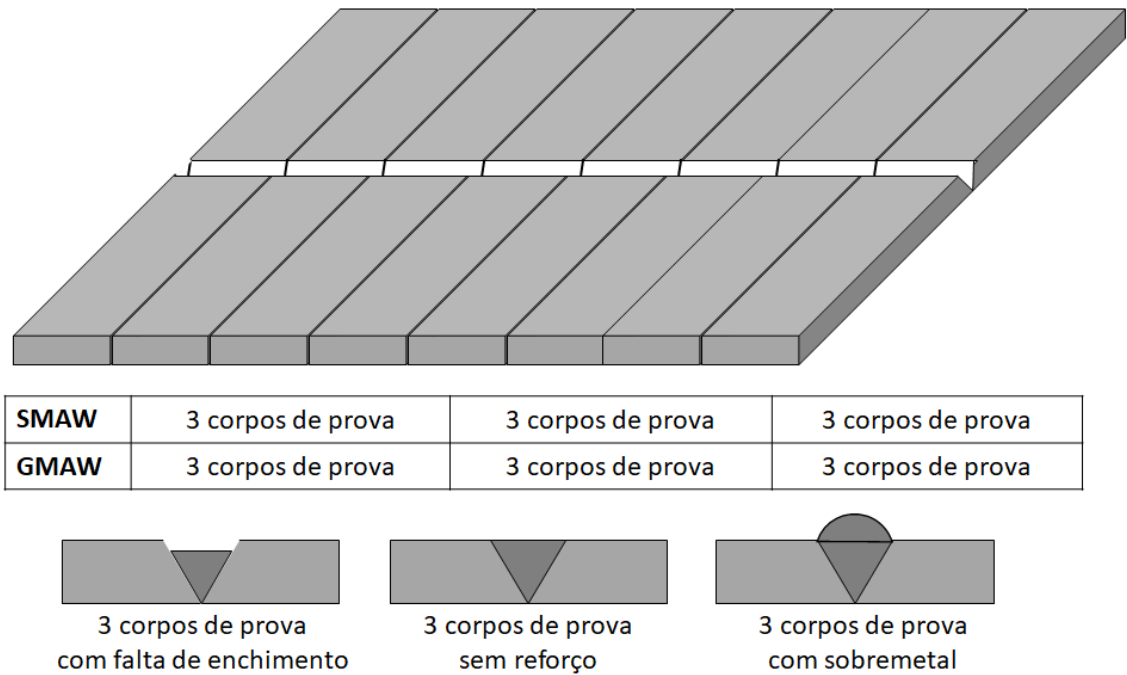


Figura 6 – Proposta Experimental

O corpo de prova utilizado para o teste de tração foi confeccionado a partir de uma barra chata com dimensões de 5 x 15 x 280 mm. Cada corpo de prova apresenta um comprimento total de 280 mm. Além disso, foram confeccionados mais três corpos de prova da mesma barra chata, com dimensões individuais de 30 x 295 mm. Essas amostras foram preparadas para garantir uniformidade nos ensaios e resultados confiáveis durante os testes.

Tabela 2 - Marcação das Peças de Teste

Peça	Solda	Sigla
10, 11 e 12	Sem reforço	PT
13, 14 e 15	Com sobremetal	PR
16, 17 e 18	Com falta de preenchimento	PP
19, 20	Metal de base	MB



Figura 7 - Serralheira Policorte 12-S usada na preparação das peças de teste

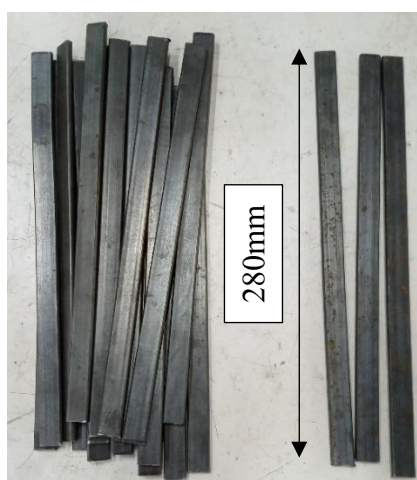


Figura 8 - Barra cortada – peças de teste

Após o corte, as 12 barras foram enumeradas em ambas suas extremidades e em seguida 9 delas foram unidas por ponteamto (Figura 9) de modo a realizar posteriormente o chanfro em “V” com um ângulo de bisel de 30° (Figuras 10 e 11).



Figura 9 - União das peças de teste por ponteamto



Figura 10 – Marcação do corte com um ângulo de 30°

O chanfro em “V” foi confeccionado como mostrado abaixo na Figura 11 utilizando uma máquina Serra de Fita SM 330M para realizar o corte (Figura 12).

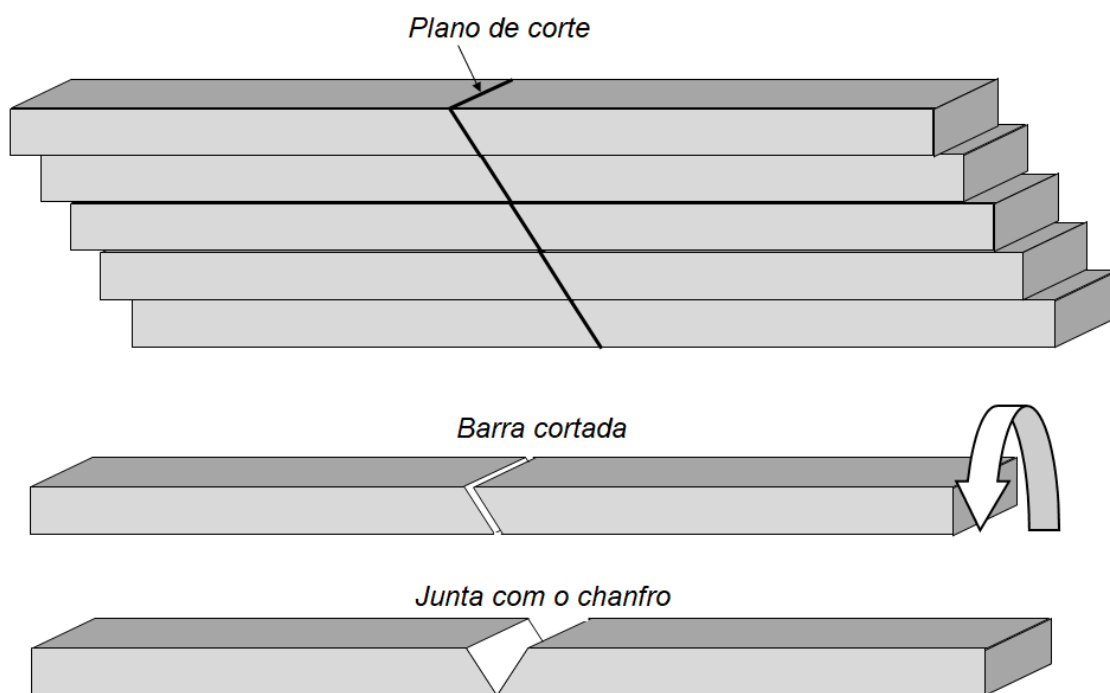


Figura 11 - Uma abordagem de corte das peças de teste para formar um chanfro em “V”



Figura 12 - Corte das peças de teste

Após o corte de bisel, as barras, foram novamente reunidas em três grupos por três pares, sendo ponteadas em suas extremidades, como pode ser visto na Figura 13 para a realização das soldagens com “sobremetal”, “falta de enchimento” e “sem reforço”.



Figura 13 – Três grupos de peças de teste para soldagem com “sobremetal”, com “falta de enchimento” e “sem reforço”

Para realizar a soldagem MIG/MAG foi utilizada uma fonte de soldagem multiprocessos, do fabricante IMC, modelo Inversal 450 (Figura 14) com os seguintes parâmetros: tensão do arco – 18 V, corrente de soldagem – 100 A com a velocidade de alimentação de 6,3 m/min. O arame eletrodo usado foi do tipo ER 70S-6 do 0,8 mm de diâmetro,

que oferece as seguintes propriedades mecânicas do metal de solda: a tensão de escoamento (σ_{ESC}) e a tensão máxima à tração (σ_{MAX}) por volta de 420 MPa e 500 MPa respectivamente (conforme à página de Internet <https://www.heavyduty.com.br/arames-de-solda/arame-de-solda-mig-er70s-6>).

Para o preenchimento parcial foi realizado um passo de solda e para os demais dois passos de solda.



Figura 14- Fonte de Soldagem Multiprocessos

O gás de proteção usado foi de Ar-8% CO₂ com uma vazão de 10 l/min, como evidenciado nas Figuras 15 e 16.



Figura 15 - Gás de proteção usado nos testes



Figura 16- O manômetro de pressão de gás e o medidor de vazão

Após a soldagem, as peças foram esmerilhadas em suas extremidades para a remoção de rebarbas (Figura 17) e excessos do metal depositado (para as peças de testes “sem reforço”). Então as peças são separadas e recebem acabamento no esmeril de bancada.



Figura 17 - Esmerilhamento das peças de teste

Em seguida foi etapa de usinagem para confeccionar os corpos de prova para o ensaio de tração. Com as barras prontas, foi utilizada uma Fresadora, modelo 5KVIG, para a remoção de material da sessão útil. Primeiramente foi feito um gabarito para a padronização do processo de corte da fresa. Em seguida foi feita a fixação do corpo de prova na mesa utilizando: porca T, Porca flange, parafuso prisioneiro, presilha de fixação e bloco escada (Figura 18).

Vale destacar que os possíveis defeitos laterais do corpo de prova, como a falta de fusão, foram removidos durante o fresamento. Devido ao desgaste da fresa, o terceiro corpo de prova do metal base não foi usinado.



Figura 18 - Fixação das peças de teste para confeccionar corpos de prova

Em seguida foi realizado o fresamento com uma fresa de topo de 24 mm HSS com rotação de 1015 RPM para preparar os corpos de prova para o teste de tração. Que foi realizado logo em sequência usando uma máquina Losenhausenwerk de fabricação da Alemanha Oriental no ano 1968 (Figuras 19 e 20). A força aplicada foi registrada em unidades kgf (Figura 21).

O teste de tração segue algumas normas ISO, como: ISO 6892-1: Método de ensaio a temperatura ambiente ISO 6892-2: Método de ensaio em temperatura elevada ISO 6892-3: Método de ensaio a temperaturas baixas ISO 6892-4: Método de ensaio em hélio líquido

Para este experimento, utilizaremos apenas a ISO 6892-1.



Figura 19 – Máquina usada para o teste de tração



Figura 20 - Teste de tração. Posição do corpo de prova

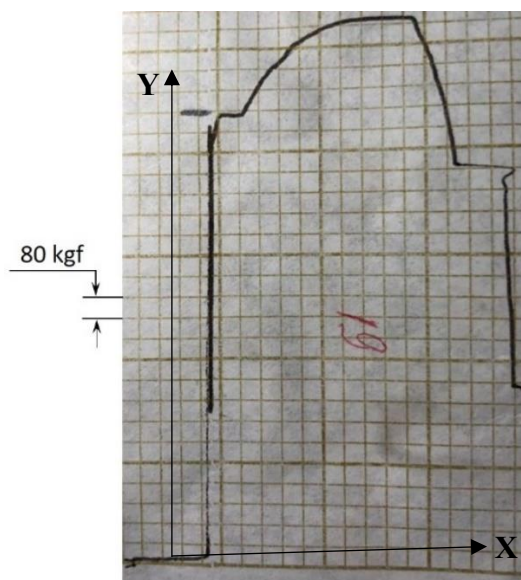


Figura 21 - Registro da Força Aplicada

As forças de escoamento (F_{ESC}) e máxima (F_{MAX}) foram obtidas por meio do teste de tração, que gerou um gráfico da força com seus respectivos valores, sendo que o eixo X seria a deformação e o Y o valor da força. Para determinar as tensões de escoamento e máxima, os valores das forças foram divididos pela seção transversal (S) de cada corpo de prova. Em seguida, os resultados foram convertidos considerando a relação de 1 kgf/mm^2 equivalente a $9,8067 \text{ MPa}$, obtendo-se, assim, os valores finais das tensões de escoamento (σ_{ESC}) e máxima (σ_{MAX}).

4 RESULTADOS E DISCUSÕES

Os resultados dos testes de tração são apresentados nas Tabelas 3 e 4. Percebe-se que no caso a fratura acontecer fora da região da solda (solda + Zona Afetada pelo Calor, ZAC), a tensão de escoamento (σ_{ESC}) e a tensão máxima de tração (σ_{MAX}) são próximos aos valores típicos para o metal de base (compare os resultados dos testes 11, 14 e 15 para barras soldadas com os dos testes 19 e 20 para o metal de base), o que é bem explícito. Os diagramas tensão – deformação para estes cinco testes também são semelhantes.

Tabela 3- Resultados dos Testes de tração

Peça	Solda	S(mm ²)	F _{ESC} (kgf)	F _{MAX} (kgf)	σ_{ESC}		σ_{MAX}		Along %	Comentários
					Kg/mm ²	MPa	Kg/mm ²	MPa		
10	PT	53,25	0	0	0	0	0	0	0,71	Fratura na solda, falta de fusão.
11	PT	47,11	1600	2060	33,97	333,10	43,73	428,86	4,29	Fratura fora da solda.
12	PT	52,50	1480	1500	28,19	276,45	28,57	280,19	0,36	Fratura na solda, falta de fusão.
13	PR	48,38	1880	2140	38,86	381,06	44,23	433,76	1,78	Fratura pela ZAC.
14	PR	43,54	1640	2180	37,67	369,37	50,07	491,00	5,00	Fratura fora da solda.
15	PR	45,18	1680	2340	37,18	364,64	51,79	507,89	4,27	Fratura fora da solda.
16	PP	43,20	1400	2160	32,41	317,83	50,00	490,37	0,71	Fratura pela ZAC, falta de enchimento e falta de fusão.
17	PP	44,02	1760	2200	39,98	392,07	49,98	490,14	2,49	Fratura pelo metal de solda; falta de enchimento.
18	PP	33,44		0	0	0	0	0	0,72	Fratura pela ZAC; falta de enchimento e falta de fusão
19	MB	49,39	1760	2080	35,63	349,46	42,11	412,99	4,45	Fratura dúctil do material base
20	MB	52,51	1920	2260	36,57	358,61	43,04	422,11	4,75	Fratura dúctil do material base

Foi também observado que caso uma solda com enchimento completo ou com um reforço não tiver defeitos, a fratura aconteceu fora da região da solda, o que foi esperado pois o metal de adição usado (arame do tipo ER70S-6) é caracterizado pelos valores dos σ_{ESC} e σ_{MAX}

do metal de solda maiores do que os do metal de base. Os testes de tração de barras sem solda (testes 19 e 20) mostraram os valores dos σ_{ESC} e σ_{MAX} em torno de 355 MPa e 415 MPa respectivamente, enquanto conforme ao site <https://www.heavyduty.com.br/arames-de-solda/arame-de-solda-mig-er70s-6>), os valores dos σ_{ESC} e σ_{MAX} para o metal de solda devem alcançar 420 MPa e 500 MPa respectivamente.

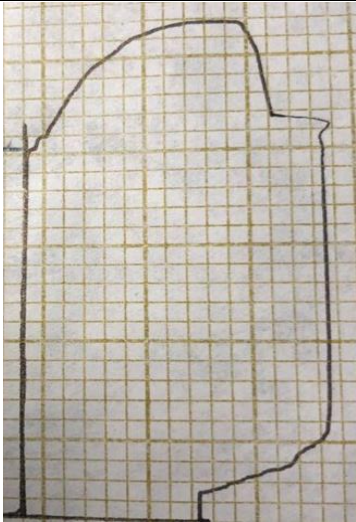
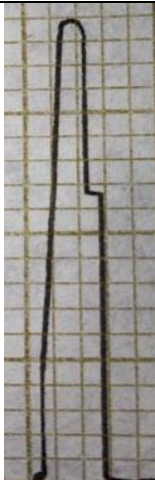
No caso da comparação inicial entre as peças 10, 11 e 12, que tiveram um preenchimento completo de solda (sem reforço), podemos observar que os corpos de prova 10 e 12 tiveram uma fratura na região da solda devido à falta de fusão. O corpo 12 suportou uma carga maior do que o corpo 10, mas mais baixa do que o corpo 11, que se fraturou pelo metal de base perto da solda (pode ser que a ruptura aconteceu ainda dentro da ZAC).

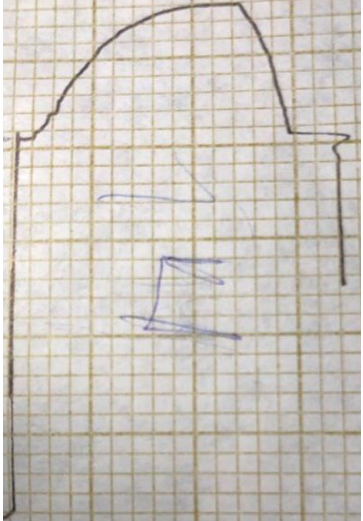
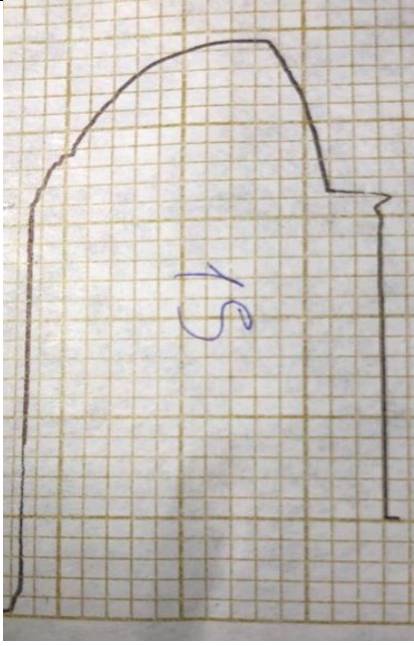
No que diz respeito às peças 13, 14 e 15, que foram soldadas com sobremetal, observamos que elas apresentaram uma resistência mecânica semelhante. A fratura da peça 13 ocorreu na zona termicamente afetada (ZAC), talvez por causa de uma pequena falta de fusão na parede do chanfro, enquanto as peças 14 e 15 sofreram fraturas fora da zona de solda. Vale a pena destacar que mesmo com uma pequena falta de fusão na parede do chanfro, a peça de teste 13 apresentou uma maior tensão de escoamento, mas, no mesmo tempo, uma tensão de rompimento mais baixa do que as peças 14 e 15 conforme mostrado na Tabela 3.

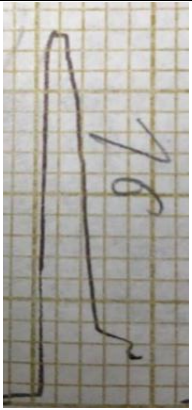
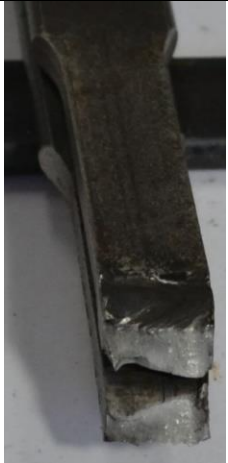
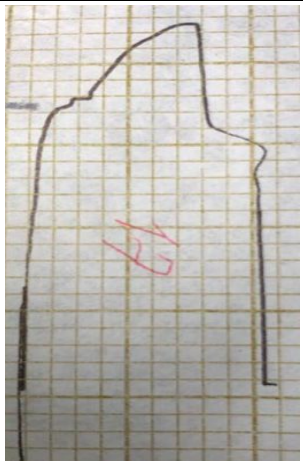
Quanto às peças 16, 17 e 18, que apresentaram falta de preenchimento, seus resultados foram semelhantes. Todas elas sofreram fraturas na zona termicamente afetada, sendo que apenas a peça 18 apresentou uma falta de fusão, o que levou à sua quebra prematura.

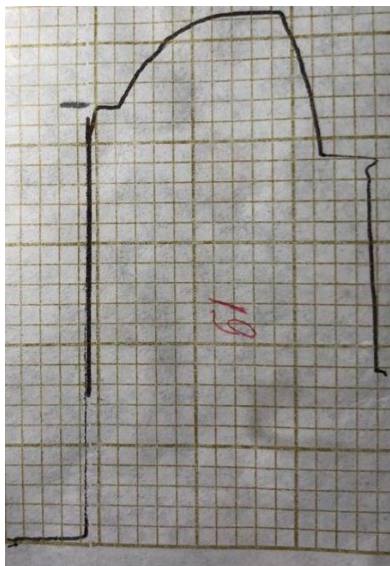
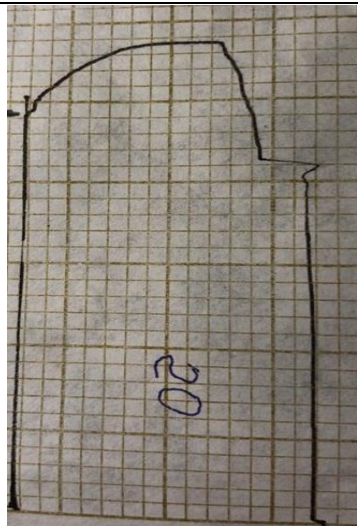
Essa análise dos resultados do teste de tração oferece uma visão crítica das influências da geometria da solda e das condições de soldagem sobre as propriedades mecânicas das uniões. Ela ressalta, ainda, a necessidade de seguir diretrizes de soldagem de maneira rígida e ainda realizar inspeções de qualidade de juntas para garantir a integridade das estruturas soldadas.

Tabela 4 – Curva “tensão – deformação” e aparência de fraturas

Peça	Solda	σ_{ESC} , MPa (kg/mm ²)	σ_{MAX} MPa (kg/mm ²)	Aparência da Fratura	Curvas “tensão – deformação”
10	PT	0	0		
11	PT	333,10 (33,97)	428,86 (43,73)		
12	PT	276,45 (28,19)	280,19 (28,57)		

13	PR	381,06 (38,86)	433,76 (44,23)		
14	PR	369,37 (37,67)	491,00 (50,07)		
15	PR	364,64 (37,18)	507,89 (51,79)		

16	PP	317,83 (32,41)	490,37 (50,00)		
17	PP	392,07 (39,98)	490,14 (49,98)		
18	PP	0	0		

19	MB	349,46 (35,63)	412,99 (42,11)		
20	MB	358,61 (36,57)	422,11 (43,04)		

Os valores dos σ_{ESC} e σ_{MAX} só se tornam inferiores aos 355 MPa e 415 MPa (valores típicos para o metal de base), caso a solda apresentar alguns tipos de defeitos, como a falta de fusão (corpos de prova 10, 12, 16 e 18).

Os resultados obtidos para o corpo de prova 17 merecem uma análise mais detalhada. A peça de teste foi confeccionada propositadamente com uma falta de enchimento. Conforme evidenciado nas Figuras 22 e 23, a fratura teve início na zona termicamente afetada pelo calor (o que é típico para juntas soldadas, pois a ZAC é o ponto mais crítico das soldas devido a algumas mudanças microestruturais indesejáveis do metal de base) e se propagou para o metal de base.



Figura 22- Fratura da ZAC para metal de base (corpo de prova 17)

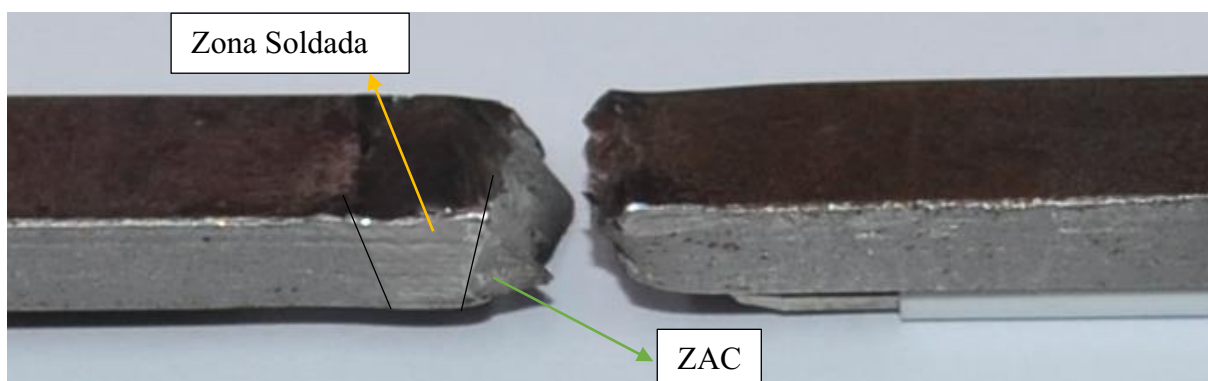


Figura 23- Vista geral da fratura do corpo de prova 17

A seção da solda que sofreu o rompimento é menor do que a seção do corpo de prova na região do metal de base (compare o valor deste parâmetro para o corpo de prova 17, que é de $44,02 \text{ mm}^2$, com o dos corpos de prova 19 e 20, que é em torno de $50,00 \text{ mm}^2$). Mas a força de rompimento é quase igual (1760 kgf para o corpo de prova 17 e 1760 kgf e 1920 kgf para os corpos de prova 19 e 20 respectivamente). Logo os valores dos σ_{ESC} e σ_{MAX} para o corpo de prova 17 se tornam bem maiores ($392,07 \text{ MPa}$ e $490,14 \text{ MPa}$) mas ainda esperados para o metal depositado que, como já foi notado, tem a resistência mecânica mais alta (veja acima, 420 MPa e 500 MPa , respectivamente).

Notavelmente, a fratura se estendeu pelo metal de base, indicando áreas de menor resistência. Isso é confirmado pelo valor da resistência mecânica de $31,8 \text{ kg/mm}^2$, que se aproxima consideravelmente do valor da resistência do metal de base, que é de 35 kg/mm^2 . Portanto, a análise confirma que o metal depositado apresenta sim uma resistência mecânica superior à do metal de base (como já era esperado uma vez que o metal de adição é caracterizado por uma resistência mecânica maior que a do metal de base).

Em geral, nenhuma das soldas não sofreu fratura pelo metal de solda, pois em juntas soldada sujeitas a esforços estáticos de tração a fratura acontece pelas zonas mais fracas. O que foi inesperado é que a zona afetada pelo calor também apresentou uma resistência mecânica maior do que o metal de base embora ela (ZAC) apresenta o metal de base com a microestrutura alterada.

Na análise geral dos resultados, fica evidente que a qualidade da soldagem desempenha um papel fundamental nas propriedades mecânicas das peças. A falta de fusão, como observada em algumas peças, pode comprometer a resistência e a capacidade de suportar cargas, mesmo em situações em que a seção transversal é maior. Portanto, isso ressalta, mais uma vez, a importância de rigorosos padrões de soldagem e inspeções de qualidade para garantir o desempenho adequado das estruturas.

Esses resultados reforçam a necessidade de um entendimento abrangente do comportamento das soldas e a importância da seleção adequada de materiais e parâmetros de soldagem para garantir a integridade estrutural. Com base nessas observações, futuros esforços de pesquisa e melhorias nos procedimentos de soldagem podem ser direcionados para otimizar a resistência e a confiabilidade das estruturas soldadas.

Vale ressaltar que a análise dos resultados não se limita apenas às propriedades mecânicas das peças. Ela também desencadeia uma reflexão sobre as implicações econômicas e de segurança associadas a soldagens inadequadas.

Defeitos de soldagem podem levar a falhas prematuras em componentes críticos, resultando em perdas financeiras substanciais e, em alguns casos, representando riscos para a segurança dos operadores e para o público em geral. Portanto, a pesquisa contínua e o desenvolvimento de melhores práticas de soldagem desempenham um papel vital na mitigação dessas preocupações.

A análise das peças 11, 14 e 15, que sofreram fratura fora da solda, pode ser considerada como um teste do metal de base, e uma comparação justa pode ser feita com as peças 19 e 20, que representam os corpos de referência sem qualquer solda.

Os gráficos, deformações sofridas e os valores das tensões de escoamento e resistência mecânica dessas peças se mostram notavelmente semelhantes. Essa semelhança entre as peças não soldadas e aquelas que fraturaram fora da zona de solda é um indicativo de que o metal de base mantém sua integridade estrutural.

Em geral, nenhuma das soldas sofreu fratura na região do metal de solda. No entanto, o que surpreendeu foi o fato de que a zona termicamente afetada pelo calor (onde não ocorreram defeitos de fusão) também apresenta uma resistência maior do que o metal de base. Isso realça a importância de controlar as condições de soldagem, especialmente nas áreas afetadas termicamente, para garantir uma junta soldada robusta e confiável.

A análise das peças 11, 14 e 15, que sofreram fratura fora da solda, pode ser considerada como um teste do metal de base, e uma comparação justa pode ser feita com as peças 19 e 20, que representam os corpos de referência sem qualquer solda. Os gráficos, deformações sofridas

e os valores das tensões de escoamento e resistência mecânica dessas peças se mostram notavelmente semelhantes.

Um outro aspecto a observar é o alongamento dos corpos de prova, onde os corpos que sofreram ruptura fora da área de solda e os corpos sem solda tiveram alongamentos semelhantes, situando-se em torno de 4% a 5%.

Os corpos 13 e 17, que sofreram fratura na zona termicamente afetada, demonstraram um maior alongamento, com destaque para o corpo 17, que iniciou a fratura na zona termicamente afetada e depois se propagou para o metal base, resultando em um aumento significativo no alongamento em comparação à peça 13.

Isso sublinha a importância de compreender não apenas a resistência, mas também a ductilidade dos materiais e sua capacidade de deformação antes da ruptura, aspectos cruciais na avaliação do desempenho estrutural em condições de carga variável.

Além disso, é essencial notar que a análise das fraturas revela informações valiosas sobre os modos de falha predominantes. Nas peças que fraturaram na zona termicamente afetada, observa-se um padrão de fratura mais complexo, com a propagação da trinca iniciando em uma área com características microestruturais distintas devido ao aquecimento durante a soldagem.

Isso ressalta a importância de considerar não apenas a resistência mecânica, mas também a análise metalúrgica, para compreender o comportamento das juntas soldadas em situações de carga real. A compreensão dos modos de falha permite o desenvolvimento de estratégias de projeto e métodos de soldagem que visam aprimorar a integridade estrutural e minimizar a suscetibilidade a falhas.

Além disso, a análise dos alongamentos até a fratura é crucial para avaliar a capacidade de absorção de energia das juntas soldadas. O maior alongamento observado em corpos de prova que fraturaram na zona termicamente afetada, como o corpo 17, sugere uma maior capacidade de deformação antes da ruptura.

Isso pode ser um fator determinante na absorção de energia em situações de choque ou cargas, o que é especialmente relevante em aplicações onde a resistência a impactos é fundamental. Portanto, essas observações ressaltam a importância de levar em consideração não apenas a força máxima suportada, mas também a capacidade de absorção de energia ao projetar e avaliar juntas soldadas em cenários do mundo real.

5 CONCLUSÕES

Foi confirmado que uma solda com preenchimento completo e sem defeitos (como no caso do corpo de prova 11, por exemplo), apresenta uma resistência mecânica maior do que o metal de base, se o metal de adição usado também é caracterizado por uma resistência mecânica mais alta, como no caso deste trabalho quando barras de aço A36 (com os valores dos σ_{ESC} e σ_{MAX} em torno de 355 MPa e 415 MPa respectivamente) foram soldadas com um arame eletrodo do tipo ER70S-6 que assegura os valores dos σ_{ESC} e σ_{MAX} para o metal de solda em torno de 420 MPa e 500 MPa.

Foi observado que o reforço não melhora e nem piora a resistência estática de solda e a junta soldada manteve sim a mesma resistência que as soldas com o preenchimento completo. Além disso, depositar mais material significa encarecer a soldagem, ou seja, o reforço não se mostra eficaz na soldagem.

As fraturas precoces nas soldas de preenchimento completo, assim como com um reforço se devem a seus defeitos internos como falta de fusão, como aconteceu com o corpo de prova 12, por exemplo.

O que foi inesperado, como dito anteriormente, é que a ZAC apresentou uma resistência mecânica maior do que o metal de base embora sendo o mesmo metal de base com a microestrutura alterada e supostamente enfraquecida. Foi presumido que os corpos de prova com soldas sem defeitos iriam sofrer as fraturas pela ZAC, o que não se concretizou.

Os resultados mostraram que a tecnologia moderna de soldagem pode assegurar a resistência mecânica de solda igual e até maior do que metal de base, dependendo das propriedades mecânicas do metal de adição.

Foi confirmado que a solda de boa qualidade (preenchimento completo, como no corpo de prova 11, por exemplo), apresentou uma resistência maior do que o metal de base, devido ao uso do metal de adição 70S com um limite mínimo de resistência à tração de 490 MPa, enquanto o metal de base A36 possui um limite de resistência à tração de 400 MPa.

Ao comparar a peça 13 (sobremetal) com as peças 16 e 17 (preenchimento normal), podemos observar que as tensões de ruptura e máxima são quase equivalentes. Isso demonstra que, em termos de resistência mecânica, o uso de reforço não prejudicou o desempenho da junta soldada, mas apenas resultou em um consumo adicional de material de solda para alcançar o mesmo efeito.

A análise dos resultados também apontou que as fraturas precoces nas soldas de preenchimento completo e reforço podem ser atribuídas a defeitos internos, como falta de fusão, nas peças 10, 12, 13, 14 e 15, por exemplo.

Além disso, o rompimento do material base fora da área de solda ocorreu devido ao material do arame de solda, que reforçou a área soldada, fazendo com que a peça se comportasse como se não tivesse solda.

Por outro lado, caso haver uma falta de fusão e/ou uma falta de preenchimento, tais peças de teste sofreram fraturas na região da solda. Essas observações destacam a importância de um controle de qualidade rigoroso durante o processo de soldagem e da escolha adequada dos materiais de adição para garantir a integridade das juntas soldadas.

No geral, os resultados evidenciam a capacidade da tecnologia moderna de soldagem em assegurar resistência mecânica igual ou até mesmo superior à do metal de base, dependendo das propriedades mecânicas do metal de adição. No entanto, essa melhoria na resistência deve ser acompanhada por um controle rigoroso e uma compreensão profunda das nuances do processo de soldagem, a fim de evitar fraturas prematuras e garantir a confiabilidade das estruturas.

REFERÊNCIAS

Wainer, E. **Soldagem Processos e Metalurgia**. São Paulo: Blucher, 1992.

Quites, A. M. **Introdução à soldagem a arco voltaico**. Florianópolis: Soldasoft, 2002.

Villani, M. P. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

HAMILTON D.T. and OBERG E. **Electric Welding**, New York, The industrial press, 1918.

Autodesk. Limites de resistência para juntas soldadas, **Autodesk** 20 de abril de 2021.

Disponível em <<https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/inventor/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/PTB/Inventor-Help/files/GUID-C3B39381-8E37-4288-B0E7-C6844E0D2A44-htm.html>>. Acesso, 12 agosto de 2022.

Autodesk. Resistência à fadiga em juntas de solda, **Autodesk** 20 de abril de 2021. Disponível

em <<https://knowledge.autodesk.com/pt-br/support/inventor/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/PTB/Inventor-Help/files/GUID-C7F93345-294A-4D5B-8991-0DDDF962CB20-htm.html>>. Acesso, 12 agosto de 2022.

LAMET; ET ALL, **Metals HandBook VOL 6 - Welding, Brazing and Soldering**, 1993.

Disponível em <<https://metallurgymaterials.files.wordpress.com/2014/03/vol-6-weldingbrazing-and-soldering.pdf>>. Acesso, 12 agosto 2022.

Scotti, A.; Ponomarov, V. **S. Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho**, São Paulo: Artliber Editora, 2008.

Campos, J. P. M. **Estudo dos efeitos dos parâmetros de soldagem nas características metalúrgicas e propriedades mecânicas de juntas de aço carbono soldadas por arco elétrico**, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/337>. Acesso em 12 de agosto de 2022.

Carpenado, M. **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**, 2021. Disponível em:

<<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/219138%3E>>. Acesso em 12 de agosto de 2022.

SILVA, R.R. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO II. Apostila. Rio de Janeiro: Santa Ursula 2014.

CASTRO, N. L. B.; et al. Ensaaios para determinação de resistência em juntas soldadas. *Revista Construindo*, v. 9, n. 2, p. 57-67, jul./dez. 2017.

CIMM. Normas e ensaios em soldagem. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/>. Acesso em: 9 dez. 2024.

ASM TREINAMENTOS. Soldagem e ensaios não destrutivos. Disponível em: <https://www.asm.org.br/>. Acesso em: 9 dez. 2024.

MACHADO, M. L. Soldagem: processos e aplicações. São Paulo: Editora X, 1996.

SUMIG. *Processo MIG/MAG*. Disponível em: <https://www.sumig.com>. Acesso em: 9 dez. 2024.