

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO – Engenharia Mecânica
Disciplina MEC041 - Trabalho Final de Graduação II

ESTUDO DA QUALIDADE DE SOLDAGEM EM UNIÕES DE PERFIL LAMINADO PELO PROCESSO FCAW

Autor 1 – Darlei Renan Talamini

109632@upf.br

Autor 2 – Carlos Edmundo de Abreu e Lima Ipar

ipar@upf.br

Comissão Examinadora – Gustavo Prates Mezzomo, Lucas Zavistanovicz

RESUMO

A busca por melhoria nos processos produtivos das empresas é uma constante, pois é através deles que são gerados os lucros aos seus acionistas. No setor de estruturas metálicas a atenção deve ser maior ainda, devido à dinâmica das geometrias fabricadas. Por isso, conhecer os processos, as técnicas e os parâmetros que podem ser aplicados melhoram a qualidade final do produto, assim como aumentam a vida da estrutura metálica. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo investigar a relação entre os parâmetros de soldagem e a qualidade para juntas de perfil laminado. Para o estudo, foi utilizado o perfil W200x22.5 como corpo de prova, onde avaliaram-se os parâmetros de tensão e de corrente que foram empregados no processo de emenda. Através da utilização de uma metodologia de projeto de experimentos definiu-se o número de corpos de prova, os fatores e os níveis de entrada para a realização do estudo. Após a soldagem, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios visuais e ensaios não destrutíveis de líquido penetrante e de ultrassom, que possibilitaram encontrar as descontinuidades presentes superficialmente e internamente ao local de soldagem. Através das análises de variância e de efeitos principais, foi possível verificar que, quando empregado níveis baixos (tensão 13 V e corrente 90 A) e altos (tensão 28 V e corrente 260 A) de tensão e corrente, o número de defeitos aumentou. Por outro lado, em níveis médios (tensão 20,5 V e corrente 175 A) houve diminuição no número total de defeitos. Com isso, os experimentos ajudaram a verificar o comportamento da qualidade no processo de soldagem em emendas de perfil laminados, através da avaliação do número de defeitos e a presença de cada defeito ocorrido em diferentes níveis de tensão e corrente. A avaliação mostrou que a qualidade de soldagem foi melhor em níveis médios (tensão 20,5 V e corrente 175 A) sendo que para os níveis de tensão e corrente baixo e alto, houve uma queda na qualidade de soldagem.

Palavras chave: Junta, qualidade, descontinuidades, parâmetros.

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço da tecnologia e a crescente busca por processos mais produtivos, muitos setores das indústrias têm-se tornado eficazes na produção de estruturas metálicas. Um exemplo disso é a aplicação nos processos de soldagem, que estão cada vez mais automatizados, garantindo uma alta produtividade com a manutenção da qualidade final do produto.

Para que isso ocorra, é preciso estar atento a possíveis perdas dentro de cada setor da indústria. Perceber oportunidades de melhorias é um papel fundamental de gestores das áreas de produção. A utilização de parâmetros de soldagem que garantam a mesma qualidade, com aumento da taxa de deposição de material, onde a tecnologia pode ser uma forte aliada, quando da utilização de processos automatizados.

Por outro lado, o setor de estruturas metálicas tem alta complexidade na homologação da soldagem automatizada. Alguns fatores como produto não padrão, larga faixa de bitolas e de espessuras, geometrias das peças e dificuldade no acesso a uniões soldadas puxam esse setor para a utilização de processos convencionais, o que diminui a produtividade.

O fator humano no processo de produção foi fundamental para o avanço tecnológico de todos os setores das indústrias. Com o processo de fabricação de estruturas metálicas não é diferente. A dificuldade da automatização demanda ao setor metalmeccânico muita mão de obra humana, trazendo com ela muitas falhas durante a execução das tarefas. Por isso, estar com equipamentos calibrados, estrutura de espaço adequados, preparo das juntas padronizados e parâmetros de soldagem ajustados são fatores que têm fundamental importância na produtividade das indústrias metalúrgicas. Além disso, a utilização de equipamentos que possibilitem alto desempenho, somados a consumíveis de boa qualidade, ajudam a alavancar o processo produtivo.

Nesse sentido, o presente trabalho busca investigar a configuração de tensão e corrente de soldagem para produzir as juntas de perfil laminado, com alto padrão de qualidade e elevação da produtividade de processamento.

1.1 Objetivos Gerais e Específicos

Este trabalho tem como objetivo geral investigar a relação entre os parâmetros de processo e a qualidade de soldagem em juntas de perfil laminado, por meio da alteração de parâmetros de tensão e de corrente, mantendo o controle da qualidade.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Compreender como os parâmetros de soldagem influenciam na qualidade da solda;
- Explicar os defeitos que podem ocorrer durante o processo de soldagem, suas causas e possíveis correções;
- Entender como são feitos os ensaios para verificação de defeitos;
- Promover um experimento de soldagem, a fim de avaliar a qualidade da junta soldada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo apresenta a fundamentação teórica utilizada para o desenvolvimento deste trabalho. Primeiramente, descreve-se a definição da soldagem, juntamente com os principais defeitos ocorridos durante o processo, suas causas e como podem ser evitados. Posteriormente, serão apresentados os tipos de ensaios de qualidade usualmente feitos nas juntas. Por fim, será apresentado, por meio de experimentos realizados, os parâmetros de soldagem que interferem na qualidade da união soldada.

2.1 Definição de soldagem

Com cerca de cem anos, o processo de soldagem é considerado recente e teve, na sua história, um papel importante nas construções de navios e de pontes. No início no século XX surgiu o emprego do eletrodo revestido, patenteado pelo engenheiro Oscar Kjellberg, que possibilitou seu uso em diferentes áreas, desde indústrias alimentícias, até áreas de manutenção. Por ter sua relação custo-benefício alta, acesso fácil aos equipamentos, aliado a simplicidade de transporte, ainda é muito utilizado nas empresas ao redor do mundo (GURGEL, 2015).

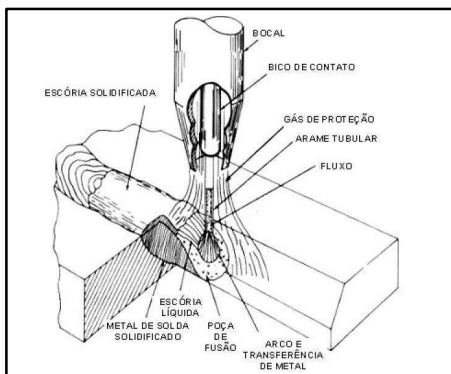
Segundo Mondesi, Marques e Bracarense (MODENESI, MARQUES, & BRACARENSE, 2005), soldagem é um processo de deposição de material, que visa a união de duas ou mais partes, com o uso de uma fonte de calor, que pode ser aplicada em metais e não metais e com ou sem a presença de pressão. A soldagem pode ser entendida também como um processo de recuperação de peças desgastadas, ou um processo que define a forma final de um produto com características especiais.

2.2 O processo de soldagem FCAW (Flux Cored Arc and Welding)

O desenvolvimento do arame tubular, também conhecido como processo FCAW (Flux Cored Arc and Welding), teve início na década de 50 e buscou melhorar a produtividade e a qualidade e reduzir os custos na união das juntas (GURGEL, 2015), baseado na união das características do processo MIG (Metal Inert Gás) / MAG (Metal Active Gás) e eletrodo revestido. Seu uso consiste na alimentação contínua com arame tubular, protegida por Argônio (Ar), Gás Carbônico (CO₂) ou ainda uma mistura dos dois, onde sua soldagem é produzida através de um arco entre o arame e o metal base, possibilitando altas taxas de deposição de metal (BEZERRA, 2018).

O arco elétrico formado entre o eletrodo e o metal base faz com que ocorra a fusão do eletrodo. O arame tubular contém em seu interior os elementos de liga que servem positivamente a resistência da junta. Além disso, o fluxo contido ali ajuda na estabilização e na proteção do arco de soldagem, na formação de escória e na desoxidação da junta soldada (GURGEL, 2015), conforme figura 1.

Figura 1 - Esquema do processo de soldagem por arame tubular (FCAW)



Fonte: ESAB, 2004.

O quadro 1, apresenta algumas vantagens, limitações e aplicações do processo de soldagem por arame tubular.

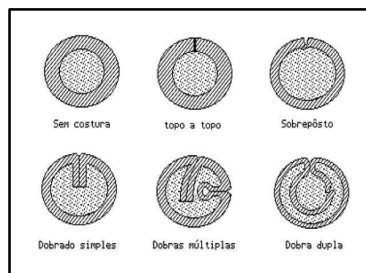
Quadro 1 - Vantagens, desvantagens e aplicações na soldagem com arame tubular.

Vantagens	Limitações	Aplicações
Elevada produtividade	Equipamento relativamente caro	Soldagem de aços carbono
Soldagem em todas as posições	Pode gerar elevada quantidade de fumos	Soldagem da fabricação e de manutenção
Custo relativamente baixo	Necessita limpeza após a soldagem	Soldagem de partes de veículos
Solda de boa qualidade e aparência		Soldagem de montagem em campo

Fonte: Adaptado de Mondesi, Marques e Santos, 2012.

O arame tubular é fabricado geralmente em forma de tubo, onde o fluxo que compõe os metais de adição é mantido no interior do arame. O fluxo contido no interior serve como formador de escória, gerador de gás de proteção, estabilizador de arco e na melhora das propriedades mecânicas. Ainda, o arame pode ser fabricado em diferentes seções, como pode ser visto na figura 2, (JOAQUIM, 2009).

Figura 2 - Seções disponíveis para arames tubulares.



Fonte: Infosolda, 2009.

Segundo a norma AWS (2000), cada grupo de material tem a sua aplicação de arame tubular em função da sua classe de classificação. Por exemplo, para o material de grupo II classe ASTM A572 Grau 50 deve ser utilizado o arame tubular E7X7-X e deve atender uma tensão de tração mínima de 450 MPa, conforme pode ser visto na figura 3.

Figura 3 - Classificação do eletrodo em função do metal base.

G r u p o	Steel Specification Requirements					Filler Metal Requirements			
	Steel Specification ^{1, 2}	Minimum Yield Point/Strength		Tensile Range		Process	AWS Electrode Specification ³	Electrode Classification ¹⁰	
		ksi	MPa	ksi	MPa				
II	ASTM A 131	Grades AH32, DH32, EH32	46	315	68-85	470-585	SMAW	A5.1	E7015, E7016, E7018, E7028
		Grades AH36, DH36, EH36	51	350	71-90	490-620			
	ASTM A 441	Grade 70	40-50	275-345	60-70	415-485	SAW	A5.17	F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX
	ASTM A 516	Grade 65	35	240	65-85	450-585			
	ASTM A 537	Class 1	45-50	310-345	65-90	450-620	SAW	A5.23 ⁶	F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX
	ASTM A 570	Grade 50	50	345	65	450			
		Grade 55	55	380	70	480	GMAW	A5.18	ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (Electrodes with the -GS suffix are excluded)
	ASTM A 572	Grade 42	42	290	60 min	415 min			
	ASTM A 572	Grade 50	50	345	65 min	450 min	GMAW	A5.28 ⁶	ER70S-XXX, E70C-XXX
	ASTM A 588 ⁵	(4 in. [100 mm] and under)	50	345	70 min	485 min			
	ASTM A 595	Grade A	55	380	65 min	450 min	FCAW	A5.20	E7XT-X, E7XT-XM (Electrodes with the -2, -2M, -3, -10, -13, -14, and -GS suffix are excluded)
		Grades B and C	60	415	70 min	480 min			
	ASTM A 606 ⁵	Grade 45	45	310	60 min	410 min	FCAW	A5.29 ⁶	E7XTX-X, E7XTX-XM
	ASTM A 607	Grade 50	50	345	65 min	450 min			
		Grade 55	55	380	70 min	480 min	FCAW	A5.29 ⁶	E7XTX-X, E7XTX-XM
	ASTM A 618	Grades I, II, III	46-50	315-345	65 min	450 min			
	ASTM A 633	Grade A	42	290	63-83	430-570	FCAW	A5.20	E7XT-X, E7XT-XM (Electrodes with the -2, -2M, -3, -10, -13, -14, and -GS suffix are excluded)
		Grades C, D	50	345	70-90	485-620			
	ASTM A 709	Grade 50	50	345	65 min	450 min	FCAW	A5.29 ⁶	E7XTX-X, E7XTX-XM
		Grade 50W	50	345	70 min	485 min			
	ASTM A 710	Grade A, Class 2 > 2 in. (50 mm)	55	380	65 min	450 min	FCAW	A5.29 ⁶	E7XTX-X, E7XTX-XM
	ASTM A 808	(2-1/2 in. [65 mm] and under)	42	290	60 min	415 min			
	ASTM A 913	Grade 50	50	345	65 min	450 min	FCAW	A5.29 ⁶	E7XTX-X, E7XTX-XM
	ASTM A 992	Grade 50	50-65	345-450	65	450			
	API 2H	Grade 42	42	290	62-80	430-550	FCAW	A5.29 ⁶	E7XTX-X, E7XTX-XM
		Grade 50	50	345	70 min	485 min			
API 2W	Grade 42	42-67	290-462	62 min	427 min	FCAW	A5.29 ⁶	E7XTX-X, E7XTX-XM	
	Grade 50	50-75	345-517	65 min	448 min				
	Grade 50T	50-80	345-552	70 min	483 min	FCAW	A5.29 ⁶	E7XTX-X, E7XTX-XM	
API 2Y	Grade 42	42-67	290-462	62 min	427 min				
	Grade 50	50-75	345-517	65 min	448 min	FCAW	A5.29 ⁶	E7XTX-X, E7XTX-XM	
	Grade 50T	50-80	345-552	70 min	483 min				
API 5L	Grade X52	52	360	66-72	455-495	FCAW	A5.29 ⁶	E7XTX-X, E7XTX-XM	
ABS	Grades AH32, DH32, EH32	45.5	315	71-90	490-620				
	Grades AH36, DH36, EH36 ⁵	51	350	71-90	490-620				

Fonte: Adaptada de AWS, 2000.

A letra “E” que aparece no início da descrição do arame significa que é um eletrodo. O número 7 seguido da letra “X” indica o valor de tensão de ruptura, multiplicado por 10 em kPsi. O “T” que vem logo após informa que é arame tubular e que possui fluxo e pó de ferro no seu interior. O último dígito, 1 no exemplo, está relacionado a posição da soldagem, a resistência mecânica e a quantidade de passes do cordão de solda que podem ser feitos se a corrente for contínua ou alternada. Para outras numerações deve ser consultado o catálogo do fornecedor (JOAQUIM, 2009).

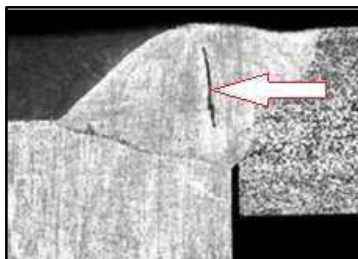
2.3 Defeitos ocorridos pelo processo de soldagem FCAW

Defeitos durante a formação do cordão afetam as propriedades mecânicas da junta. Para Silva (SILVA R. H., 2005), os principais defeitos na soldagem são a presença de falta de penetração, de respingos, de mordeduras, de trincas, de porosidade e de inclusões de escória. Para diminuir esses defeitos, podem ser aplicados treinamentos para os soldadores, roteiros de planos de soldagem, aquisição de equipamentos com tecnologia adequada ao processo, controle da tolerância das juntas a serem soldadas, calibração da máquina de solda, entre outros. As seções a seguir apresenta cada um desses defeitos de forma mais detalhada.

2.3.1 Trincas

As trincas que surgem durante a soldagem ocorrem devido à alta tensão de tração. Elas podem ser separadas em dois grupos: trinca a quente e trinca a frio. A trinca a quente ocorre quando o cordão de solda ainda não está totalmente solidificado, sendo resultado da utilização de arame de solda incorreto, má preparação da junta e de condições não próprias ao processo de soldagem (MODENESI, MARQUES, & BRACARENSE, 2005). Um exemplo de trinca a quente pode ser visualizado na figura 4. Com a presença da trinca, a estrutura perde a resistência inicialmente calculada. Por isso, os ensaios são fundamentais para um bom controle de qualidade.

Figura 4 - Trinca Longitudinal interna a quente formada pela solda de topo.

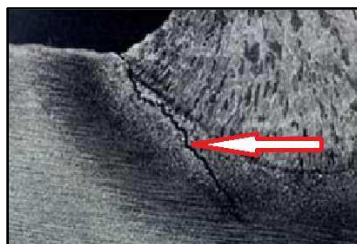


Fonte: Mondesi, 2005.

A trinca ou fissuração a frio é formada em aços de médio e de baixo carbono na zona de fusão (ZF) e, principalmente, na Zona Termicamente Afetada (ZTA) que forma martensita durante o crescimento de grão na soldagem. Esse processo de formação da trinca pode demorar horas, pois cresce lentamente, tornando difícil sua detecção logo após o ensaio. Fatores como presença de hidrogênio, microestrutura sensível, elevada sollicitação mecânica e temperatura ajudam na formação desse tipo de defeito. Esses fatores podem modificar as condições de soldagem e de resistência tornando o material mais suscetível a falhas. Quando o H₂ é absorvido pela solda, a partir de material orgânico, como graxas e óleos, ele penetra na solda e forma uma espécie de

concentrador de tensão ainda no estado líquido da solda. Conforme a solda vai solidificando, a tensão aumenta, nucleando, assim, a trinca, como pode ser visto na figura 5.

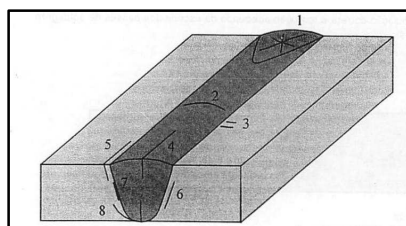
Figura 5 - Trinca a frio causada pela fissuração de hidrogênio.



Fonte: Infosolda, 2018.

Segundo Mondesi, Marques e Bracarense, (Soldagem-fundamentos e tecnologia., 2005), as trincas podem ser classificadas por : 1-Trinca de cratera, 2-Trinca transversal na zona fundida, (ZF), 3-Trinca transversal na ZTA, 4-Trinca longitudinal na ZF, 5-Trinca na margem da solda, 6-Trinca sob cordão, 7-Trinca na linha de fusão e 8-Trinca na raiz da solda, conforme mostra a figura 6.

Figura 6 - Classificação dos tipos de trincas.

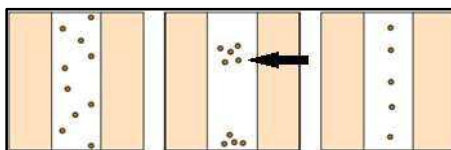


Fonte: Mondesi, 2005.

2.3.2 Porosidade

Outra descontinuidade que é frequente aparecer no cordão de solda é a presença da porosidade que são causadas, geralmente, por presença de óleos, de graxas, de umidade, de ferrugem, de excesso de correntes de ar, de falta de proteção gasosa, entre outros (DE NOVAIS, 2010). Os poros são uma falha formada pelo aprisionamento de gases no processo de soldagem durante a solidificação do cordão. Quando aparece em pequenas quantidades, não afetam significativamente a estrutura do cordão. Contudo, quando se verifica um número elevado de porosidades, compromete-se a seção efetiva da junta (BASTOS, 2018). As inspeções de porosidade podem apontar três classificações quanto ao número de poros, conforme pode ser visto na figura 7.

Figura 7 - Principais tipos de porosidade.



A) Distribuída

B) Agrupada

C) Alinhada

Fonte: Bastos, 2018.

Cuidados como a verificação do fluxo de gás de proteção, a proteção contra o volume de ar incidente, o ângulo de deslocamento da tocha, a redução da velocidade de soldagem são fatores que ajudam a diminuir significativamente a presença de poros (DE NOVAIS, 2010).

2.3.3 Inclusões de escória

As inclusões de escória também são consideradas defeitos de soldagem, pois formam grandes concentradores de tensões. São formadas durante os processos de fusão e de solidificação da poça, gerando pequenas partículas que podem ficar presas quando se têm uma junta preenchida por vários passes (MODENESI, MARQUES, & BRACARENSE, 2005), como pode ser observado na figura 8.

Figura 8 - Formação da inclusão de escória.



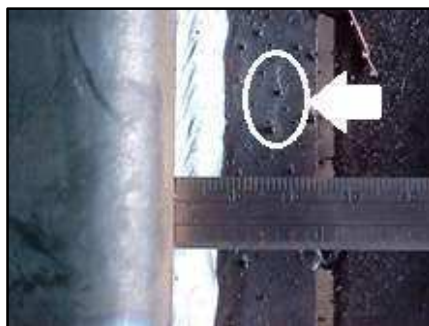
Fonte: Mondesi, 2005.

Cuidados como manter a inclinação correta da tocha, a avaliação durante o projeto nas uniões soldadas, com o objetivo de melhorar os ângulos de chanfros para soldagem e ajuste da corrente e da tensão, ajudam a diminuir a formação desse tipo de defeito (DE NOVAIS, 2010).

2.3.4 Respingos

Os respingos, Figura 9, aparecem como descontinuidades, pois podem indicar uma falha no controle do processo de soldagem. Eles são formados no momento de fusão do material e estão diretamente ligados ao mau contato nos cabos de solda, à vazão de gás inadequada, ao posicionamento da tocha, ao metal base contaminado, à tensão/corrente muito altas, à velocidade de soldagem muito alta, entre outros (DE NOVAIS, 2010).

Figura 9 - Formação de respingos decorrente do processo de soldagem.



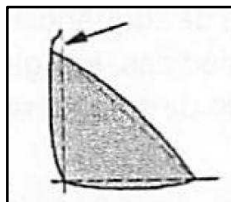
Fonte: De Novais, 2010.

O controle da quantidade de respingos pode ser feito com a limpeza dos tubos de contato, a regulagem do fluxo de gás, a utilização de arames de solda livres de umidade e a diminuição da velocidade de soldagem (DE NOVAIS, 2010).

2.3.5 Mordeduras

Por definição, a mordedura é causada pela fusão do metal base que está em contato com a poça de soldagem, formando um entalhe na peça, criando um importante concentrador de tensões. Ocorre pela utilização de parâmetros de soldagem inadequados, como tensão e velocidade de soldagem (MODENESI, MARQUES, & BRACARENSE, 2005), como pode ser visto na figura 10.

Figura 10 - Formação de mordedura no cordão de solda.



Fonte: Mondesi, 2005.

Ajustes como velocidade de soldagem, controle de tensão, diminuição do bocal de solda, equipamentos que permitam ajuste fino, diminuição da velocidade de soldagem melhoram e diminuem significativamente a formação de mordeduras (MODENESI, MARQUES, & BRACARENSE, 2005).

2.3.6 Falta de Fusão

O último entre os principais defeitos de soldagem é a falta de fusão, que é conhecida pela ausência de continuidade metalúrgica entre o metal base e o metal depositado. Esse defeito é muito severo, pois cria um importante concentrador de tensões que propagam trincas ao longo do cordão (MODENESI, MARQUES, & BRACARENSE, 2005), conforme mostra a figura 11.

Figura 11 - Falta de fusão na soldagem.



Fonte: Bastos, 2018.

Dentre as causas da falta de fusão destacam-se os parâmetros de soldagem inadequados, a tocha fora de centro em relação ao chanfro inclinação excessiva, o ângulo de chanfro pequeno, a taxa de deposição alta e a velocidade de soldagem baixa. A correção desse defeito geralmente ocorre com a remoção do cordão de solda. Porém, pode ser evitado diminuindo a velocidade de alimentação do arame e revisando o projeto, com a finalidade de obter um chanfro que permita distribuir melhor o calor para ambos os lados das juntas e de reduzir o nariz do chanfro (DE NOVAIS, 2010).

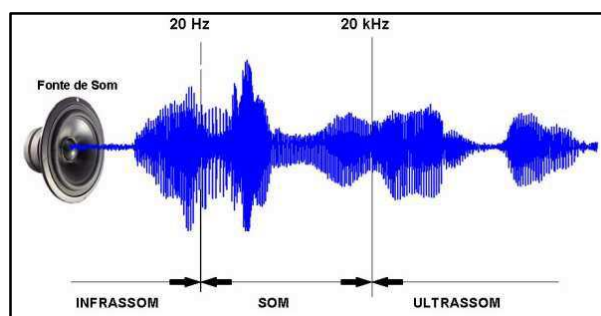
Segundo De Novais (DE NOVAIS, 2010), na prática ainda pode haver descontinuidades combinadas, pois no processo de soldagem ocorrem alterações que aumentam a probabilidade da formação desses defeitos.

2.4 Ensaio de ultrassom

Com o crescimento da aplicação de peças de aço nos mais variados setores do mercado, surgiu também a necessidade do controle da qualidade da peça. Saber identificar discontinuidades é fundamental, pois esse controle mantém a integridade da vida humana e garante uma maior durabilidade da estrutura. Diante dessa necessidade, em 1942, o físico chamado D. O. Sproule desenvolveu o primeiro aparelho de ultrassom. No entanto, o primeiro registro ocorreu ainda em 1929, com Sokolov na Rússia, que utilizou cristais de quartzo que emitiam vibrações ultrassônicas. Os resultados desses registros só mostraram vantagem em materiais fundidos, enquanto que nos forjados não obtiveram sucesso. Já no Brasil a utilização do ensaio de ultrassom ocorreu em 1979 com a fabricação de plataformas de petróleo (BASTOS, 2018).

Ondas ultrassônicas são geradas pelo equipamento emissor, que vibra com uma certa frequência. Dessa forma, o cristal piezelétrico transforma a energia elétrica em energia mecânica, gerando a onda de ultrassom. O ensaio ultrassônico é aplicado em peças que possuem alta responsabilidade é mais sensível, pois emite ondas acima de 20 KHz, como pode ser visto na figura 12. As discontinuidades internas, que não podem ser encontradas aplicando os ensaios de superfície com o líquido penetrante e a partícula magnética, são facilmente detectadas por esse ensaio (ANDREUCCI, 2014).

Figura 12 - Frequência sonora das vibrações mecânicas.

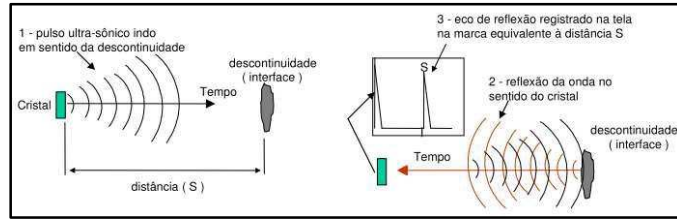


Fonte: Andreucci, 2014.

As ondas têm propagação em meio elásticos e suas partículas atômicas ou moleculares são deslocadas, ocorrendo uma reação de tensão interna para que as moléculas retornem à posição inicial. Esses deslocamentos movem suas moléculas vizinhas, propagando, assim, uma onda elástica que pode ser classificada em longitudinal, transversal e superficial (BASTOS, 2018). Segundo Andreucci, (2014), saber identificar o comprimento da onda é fundamental, pois ela está diretamente relacionada a dimensão da discontinuidade.

O processo de ensaio é feito por um equipamento que emite feixes ultrassônicos (1) para dentro da peça. Ao percorrer uma distância (S) até a discontinuidade, um intervalo de tempo foi decorrido. Quando o feixe ultrassônico encontra a discontinuidade, a onda é então refletida e retorna no sentido do cristal que a emitiu. Dessa forma, origina-se um sinal elétrico que é interpretado e amplificado em forma de um pulso na tela do aparelho de ultrassom. A reflexão do pulso mostrado na tela equivale à distância (S) percorrida pela onda até a discontinuidade, como pode ser visto na figura 13. Por meio disso, discontinuidades como poros, trincas e falta de fusão podem ser facilmente detectadas (TROMBINI, 2015).

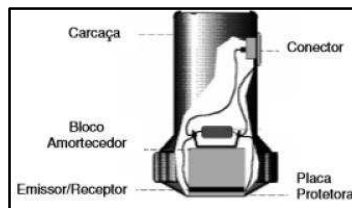
Figura 13 – Princípio básico do ensaio de ultrassom.



Fonte: Andreucci, 2014.

O cabeçote ou transdutor que compõe o equipamento de ultrassom pode ser dois tipos: o normal e o angular. O cabeçote normal, mostrado na figura 14, emite ondas perpendiculares à superfície de acoplamento e são construídos a partir de um cristal piezelétrico. O cristal é colado a um suporte chamado de amortecedor. Esse cabeçote opera emitindo um impulso que percorre o material e rebate nas faces internas do material, gerando os ecos, que retornam ao cabeçote no mesmo sinal elétrico. São muito utilizados em inspeções em que se deseja encontrar descontinuidades na direção perpendicular à superfície da peça e podem ser encontrados em diâmetros de 5 a 24 mm, com frequência na faixa de 0,5/ 1/ 2 / 2,5/ 5/ 6 MHz (ANDREUCCI, 2014).

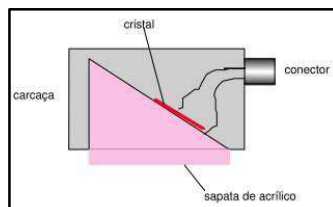
Figura 14 – Cabeçote normal para ensaio de ultrassom.



Fonte: Bastos, 2018.

Já no cabeçote angular é inserida uma cunha de plástico entre o cristal piezelétrico e a superfície do material, formando um ângulo que pode ser de 45, 60, 70 e 80 graus e que só pode ser aplicado em peças de aço. Para outros materiais, deve ser calculado o ângulo pela equação da Lei de Snell. Do mesmo modo, só pode receber ondas que penetram na cunha em direção paralela a onda de emissão, em sentido contrário. Esse tipo de cabeçote é muito utilizado para encontrar descontinuidades que estão perpendiculares à superfície da peça e estão disponíveis em dimensões de 8 x 9 mm até 15 x 20 mm. A figura 15 mostra um cabeçote do tipo angular.

Figura 15 - Cabeçote tipo angular.



Fonte: Andreucci, 2014.

Segundo Andreucci (2014), o tipo de cabeçote a se utilizar deve seguir uma faixa de espessuras, pois a angularidade e frequência dependem das configurações da junta, do material e da espessura em que está sendo feito o ensaio por ultrassom, como pode ser visto quadro 2.

Quadro 2 - Ângulo do cabeçote de ultrassom para diferentes espessuras.

Espessura do material base (mm)	Ângulo do Transdutor (graus)
8 - 15	60 e 70
16 - 25	45 e 60 ou 60 e 70
26 - 40	45 e 60 ou 45 e 70
Maior que 40	45 e 60

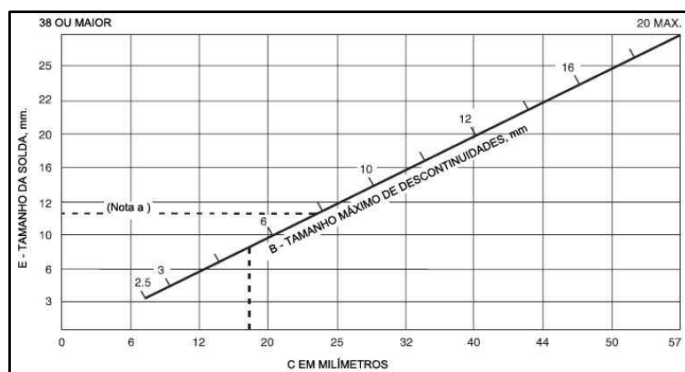
Fonte: Andreucci, 2014.

Antes do ensaio deve ser feito o preparo da superfície com a eliminação de possíveis contaminantes como óleos e graxas. Para evitar defeitos nos cabeçotes, a temperatura das peças deve estar inferior a 60°C, pois, temperaturas acima disso podem danificar os cabeçotes. Durante o ensaio a velocidade de deslizamento do cabeçote não deve ser superior a 150 mm/s para garantir que os sinais sejam percebidos pelo inspetor (ANDREUCCI, 2014).

Para determinar a dimensão da descontinuidade, o cabeçote deve ser posicionado no centro geométrico da descontinuidade, que é onde o eco e a sua altura são máximos. Depois, o cabeçote é deslocado para a esquerda até que a altura do eco reduza a metade e o primeiro ponto deve ser marcado. Ainda, faz-se o mesmo deslocamento à direita e então marca-se o segundo ponto. Por fim, a união dos dois pontos é que determina o comprimento da descontinuidade (ANDREUCCI, 2014).

A figura 16 mostra o critério de aceitação das continuidades para estruturas carregadas estaticamente, considerando somente seções não tubulares. Para determinar o tamanho aceitável da descontinuidade, basta projetar o tamanho da solda “E” horizontalmente a “B”. Já para determinar a mínima folga entre as arestas das descontinuidades de tamanho maior ou igual a 2,5 mm deve-se projetar “B” verticalmente a “C” (AWS-D1.1, 2010).

Figura 16 - Número de descontinuidades para seções não tubulares.



Fonte: AWS, 2010.

2.5 Ensaio de líquido penetrante

Outro ensaio muito utilizado na indústria é o de líquido penetrante, como pode ser visto na figura 17, que tem por objetivo encontrar descontinuidades na superfície das uniões soldadas, como trincas e poros. Esse modelo teve grande utilização nos Estados Unidos em 1942 com o surgimento de líquidos fluorescentes (MACHADO, 2013).

O ensaio consiste na aplicação de um líquido de cor vermelha que penetra na abertura da descontinuidade. Após, aplica-se o líquido de cor branca, chamado de revelador, que age

absorvendo o líquido penetrante, mostrando, assim, o desenho da descontinuidade na superfície da junta (ANDREUCCI, 2016).

O processo do ensaio de líquido penetrante ocorre em seis etapas descritas a seguir, cuja divisão é feita para todas as aplicações em qualquer tipo de união soldada, tornando o método padrão (ANDREUCCI, 2016).

a) Preparação da superfície;

A superfície deve estar livre de óleo, de graxa ou de outros contaminantes e deve estar limpa e seca.

b) Aplicação do líquido penetrante;

A aplicação deve formar uma pequena camada de líquido que cubra toda a superfície a ser inspecionada. A penetração é feita por um processo chamado de capilaridade. O termo é assim chamado, porque a penetração do líquido ocorre nas regiões onde a descontinuidade está presente e a fenda formada é muito pequena, lembrando um tubo capilar.

c) Remoção do excesso de penetrante;

Após a aplicação do líquido penetrante, é necessário fazer a remoção do excesso do produto depositado na superfície, a fim de evitar que pequenas descontinuidades fiquem escondidas sob a camada de líquido.

d) Aplicação do líquido revelador;

A aplicação do revelador deve formar um pequeno filme na superfície da peça, que preencha toda a área de aplicação do líquido penetrante. Deve ser deixado um tempo depois que a aplicação é feita para que haja completa absorção do revelador.

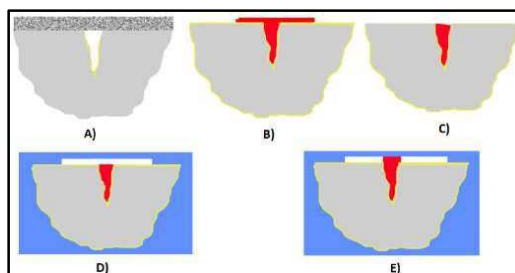
e) Avaliação e inspeção dos resultados;

A inspeção é feita de maneira visual e devem ser observadas as manchas causadas pela absorção do líquido penetrante que foi depositado nas aberturas de descontinuidades.

f) Limpeza depois do ensaio;

Após a finalização do ensaio, a superfície deve ser limpa para que os processos subsequentes, se houver, não sejam afetados em decorrência de resíduos restantes do ensaio. A figura 17 mostra as etapas do ensaio de líquido penetrante (ANDREUCCI, 2016).

Figura 17 - Etapas do ensaio de líquido penetrante.



Fonte: Adaptado de Andreucci, 2016.

2.6 Estudos relacionados

Um estudo efetuado por Borges (2015) analisou o efeito das emendas na resistência à flexão em vigas com uniões soldadas. Os corpos de provas foram preparados com chanfro de 45 graus e o arame de soldagem utilizado na soldagem foi o ASME AWS ER70S-6, com diâmetro de 1,2 mm. Os resultados obtidos por ensaio de tração e de flexão mostraram que os limites de resistência à flexão, à tração e à deformação na ruptura ficaram acima do mínimo exigido pela norma NBR 7007:2011. Os corpos de prova romperam antes da solda, mostrando que o cordão manteve sua propriedade igual ou superior ao metal base, assim como exige a norma AWS A5.18:2005. Os valores de ruptura dos corpos de prova com emendas mostraram que a ductilidade reduziu nos corpos de prova com emenda

De acordo com o estudo de Borges (2015), os corpos de prova que foram soldados obtiveram um ganho no limite de escoamento em torno de 6% e de ruptura, de 4 %. Porém, o material que recebeu solda teve uma diminuição na ductilidade, o que torna o material mais frágil.

Para Silva (2011), o ensaio de ultrassom é muito importante, pois através dele foi possível encontrar descontinuidades, como trincas e poros que não são identificadas por meio de inspeção visual. A inspeção na raiz do cordão de solda para detecção do tipo de descontinuidade se tornou difícil, já que nessa região surgem reflexões que podem ser originárias de diversos tipos de descontinuidades, podendo ter a avaliação comprometida. Por isso, ressalta-se a importância do treinamento e da qualidade do inspetor de ultrassom, a calibração e a manutenção periódica do equipamento. Os cabeçotes inclinados foram fundamentais para a detecção das descontinuidades, pois, devido à inclinação da onda, pode ser encontrada de forma precisa, sendo que com o cabeçote normal não seria possível.

Conforme Pais Filho e Guedes (2016) que realizaram um estudo, o ensaio de líquido penetrante deve ser empregado por inspetor qualificado, dadas as geometrias complexas empregadas em construções metálicas. Em peças que a limpeza não foi feita de forma correta, elas apresentaram falsas descontinuidades, comprometendo análise da inspeção.

Um estudo de caso feito por (LIMA, 2015), que avaliou as falhas no processo de soldagem de arame tubular, em uma embarcação de extração de petróleo. Os pontos avaliados foram as portas de visitas, que são utilizadas na construção da embarcação. O estudo mostrou que a qualidade da solda começa ainda no preparo da junta, com pontos de soldagem bem apresentados, chanfro de deposição do material de acordo com normas, e parâmetros de soldagem adequados as espessuras e materiais utilizados. No estudo, através da utilização da ferramenta de análise de causas e efeitos chamada FMEA, foi possível verificar que a alteração da tensão e corrente tem ligação direta com a formação de descontinuidades tais como poros, trincas, falta de fusão, entre outros. O estudo concluiu mostrando que fazer o controle do preparo de junta antes da soldagem beneficia a qualidade do cordão de solda em relação aos defeitos encontrados, reforçando também a importância do controle nos parâmetros de soldagem.

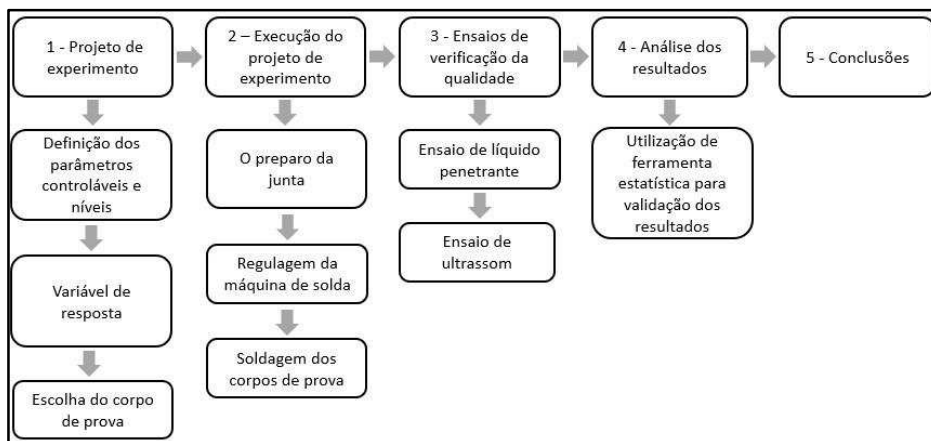
O experimento de soldagem feito por (PEREIRA & FERRARESI) que avaliou as descontinuidades encontradas na soldagem de posição plana para dois tipos de arames diferentes. No experimento as chapas com chanfros de 60°, 90 e 120, foram soldadas na posição plana, variando a tensão e a velocidade de alimentação do arame de solda e utilizando 100% CO₂ como

gás de proteção, com vazão constante de 141 l/min. Após as análises, foi possível identificar que os defeitos de soldagem ocorrem em várias faixas de tensões, associadas a aberturas pequenas em chanfros de solda, indiferente do arame utilizado.

3 METODOLOGIA

Esse capítulo apresenta as etapas de desenvolvimento do projeto do trabalho, que foram utilizados para investigar a influência dos parâmetros de soldagem na qualidade da junta soldada, empregados em emendas de perfil laminado, seguindo as etapas apresentadas na figura 18.

Figura 18 - Fluxograma do procedimento metodológico do estudo.



Fonte: Autor, 2020.

O procedimento metodológico, está dividido em quatro etapas que são: definição dos parâmetros para o estudo, a execução do estudo, os ensaios para as análises de qualidade e por fim, as análises dos resultados.

3.1 Definição dos parâmetros controláveis e níveis

No experimento de soldagem, os parâmetros de interesse a serem controlados serão a tensão e a corrente. A tensão controla a velocidade do arame durante a soldagem. A mudança de tensão será configurada para evitar um aumento significativo na quantidade de corpos de prova. Já a corrente que controla a penetração da solda na poça de fusão, também respeitará a mesma configuração. Assim, para o experimento serão empregadas três faixas de parâmetros de soldagem para tensão e corrente, conforme apresentado na tabela 1.

Tabela 1 - Fatores variados intencionalmente.

Fator de entrada	Nível baixo	Nível intermediário	Nível alto
Tensão (Volts)	13	20,5	28
Corrente (Ampére)	90	175	260

Fonte: Autor, 2020.

Por abrangerem uma faixa de aplicação de espessuras onde ocorre a maior concentração de emendas, deu-se o planejamento da execução do experimento, utilizando-se para isso uma ferramenta estatística, com projeto fatorial 2^k com ponto central, onde k representa o número de fatores. Os parâmetros de tensão e corrente foram alternados de forma a avaliar o efeito que os

níveis apresentam em função da análise de defeitos encontrados. A tabela 2 apresenta a ordem de execução das amostras planejadas para esse experimento.

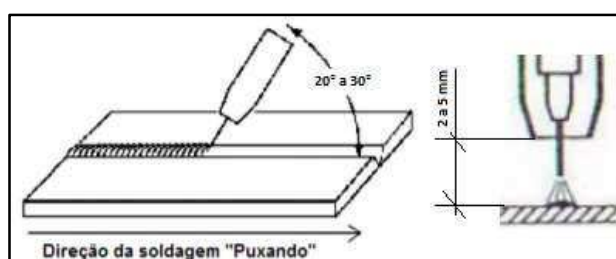
Tabela 2 - Fatores e níveis de entrada variáveis que serão utilizados no experimento.

Ordem de Ensaio	Tensão (Volts)	Corrente (Ampère)
CP1	13	260
CP2	28	260
CP3	20,5	175
CP4	20,5	175
CP5	13	260
CP6	28	260
CP7	13	90
CP8	20,5	175
CP9	28	90
CP10	13	90
CP11	28	90

Fonte: Autor, 2020.

No processo de execução do experimento, alguns parâmetros não serão avaliados e, portanto, serão mantidos fixos. Inicialmente, não será avaliado o efeito do gás de proteção na formação das descontinuidades, pois o objetivo desse trabalho não é avaliar o efeito do gás de proteção e sim a qualidade da solda baseado em diferentes faixas de tensão e corrente. O gás de proteção utilizado será o Gás Carbônico (CO_2), que vai ser regulado com a ajuda do fluxometro pelo próprio soldador. O fluxo de gás será mantido constante a uma vazão de 22 litros por minuto. Da mesma forma, a distância da tocha de soldagem em relação ao cordão, não será avaliada. Devido à dificuldade de controlar sua distância, até a poça de soldagem, a tocha ficará posicionada a uma distância entre 2mm e 5mm, com inclinação entre 20 e 30 graus, conforme mostra a figura 19.

Figura 19 - Configurações do posicionamento da tocha durante a soldagem.



Fonte: Adaptado de (RODRIGUES, 2010)

Durante a preparação dos corpos de prova, não será feito o pré-aquecimento da junta para o passe de raiz, ou seja, a mesma estará a temperatura ambiente do dia da realização da soldagem. Por fim, não será avaliado o fator de qualidade de solda em função do tipo de mão de obra (humana ou automatizada), pois a soldagem será executada por um único soldador, ou seja, será utilizado somente a mão de obra humana. O arame tubular de solda utilizado no experimento será da marca ESAB, e será o mesmo para todos os ensaios, com diâmetro da 1,2 mm.

3.1.1 Variável de resposta

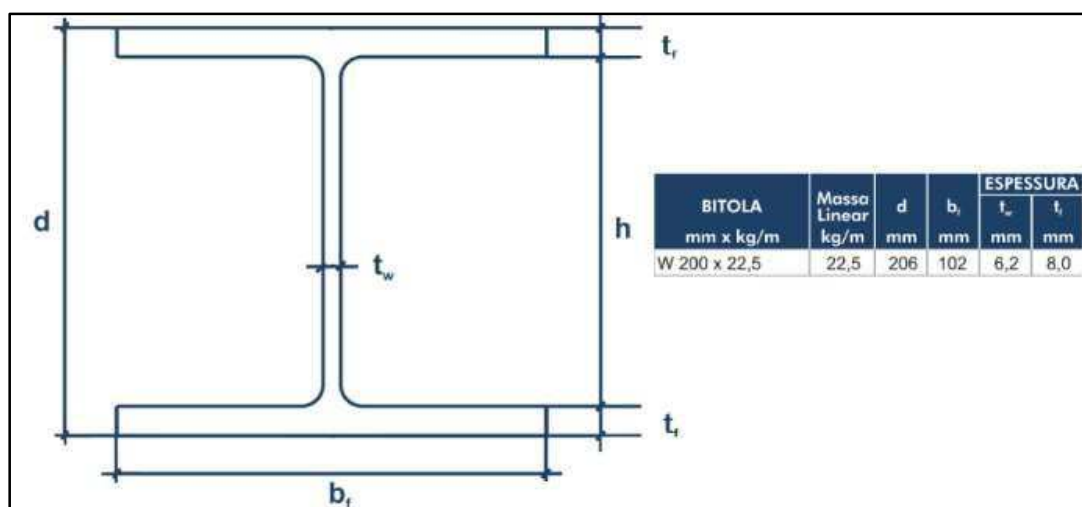
No experimento, os corpos de provas podem apresentar diversos tipos de defeitos, como já citado no capítulo anterior. Com isso, os defeitos avaliados após os ensaios serão a falta de fusão,

porosidade, mordedura, trincas, respingos, inclusão de escória. Por se tratar de defeitos que podem comprometer severamente a peça ou conjunto, os corpos de provas serão avaliados quanto a qualidade final, através do **número total de defeitos presentes, o número de defeitos para cada tipo de defeito e comprimento do defeito de mordedura** em cada ensaio e para cada nível de parâmetro estudado. Para isso, os defeitos serão contados, numerados e avaliados através da quantidade que cada corpo de prova apresentou e o comprimento (em mm) que o defeito de mordedura apresentou. A qualidade será medida pelo número de defeitos apresentado em cada nível, sendo que quanto maior o número de defeitos, menor será a qualidade de soldagem.

3.1.2 Escolha do perfil para o corpo de prova

Para a fabricação das estruturas metálicas são utilizadas diversas bitolas de perfil laminado. Em estruturas primárias e secundárias de perfis laminados algumas faixas de bitolas são utilizadas com maiores frequências, em função das solicitações que ocorrem. Devido ao alto uso, são geradas muitas emendas para o aproveitamento da matéria prima. Por isso, o atendimento as solicitações, e as funcionalidades de cada projeto devem garantir a qualidade e a segurança final para qualquer bitola de perfil utilizado. Dessa forma, buscando verificar a qualidade da solda nas uniões soldadas, e por se tratar de um perfil da ampla utilização, o perfil selecionado para o corpo de prova será o W200x22.5, conforme visto na figura 20.

Figura 20 - Informações técnicas do perfil W200x22.5 Gerdau.



Fonte: Adaptado de Catálogo Gerdau, 2020.

Como pode ser visto na figura 20, tem-se as dimensões do perfil em milímetros que é formado pelo processo de laminação e que são descritas por:

d – Altura do perfil;

b_f – Largura do perfil;

t_f – Espessura das mesas do perfil;

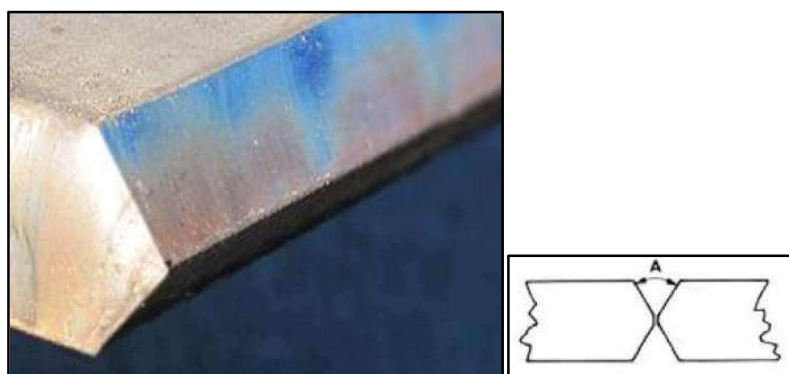
t_w – Espessura da alma do perfil.

3.2 Execução do experimento

3.2.1 O preparo do corpo de prova

A confecção da junta é executada com o posicionamento da lixadeira em um ângulo de 45° na aresta em que será feito o chanfro, movimentando a lixadeira no sentido da altura do perfil e em movimentos uniformes, em ambos os lados da alma e das mesas do perfil. As mesas devem ser lixadas com a mesma angulação nos dois lados, tanto na parte interna, quanto na parte externa do perfil. Dessa forma, se obtém o preparo da junta em todo o contorno do perfil, formando o chanfro tipo “X” como pode ser visto na figura 21.

Figura 21 - Forma final do chanfro no corpo de prova.



Fonte: Autor, 2020.

Fonte: ESAB

Durante a preparação do chanfro, o controle do ângulo é feito por um instrumento chamado de transferidor de grau e que deve estar calibrado pelo inspetor da qualidade responsável. O controle do ângulo é feito pelo próprio preparador e a tolerância admissível para o ângulo de chanfro é de 3 graus para mais ou para menos. Não deve ser deixado nariz para penetração do passe de raiz, pois as espessuras de mesa e alma do perfil são pequenas, o que dificulta o controle do nariz durante a preparação. Com isso, evita-se defeitos na execução do chanfro e também não compromete a execução da soldagem no experimento.

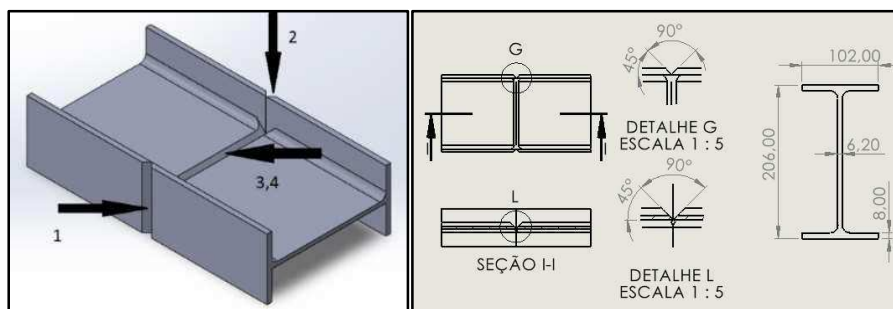
3.2.2 Regulagem da máquina de solda

No experimento a máquina de solda utilizada é do fabricante Sumig. O gás de proteção utilizado será o Gás Carbônico (CO_2). Depois, com o auxílio de um aparelho de medição, serão calibrados a tensão e a correntes iniciais do experimento. O aterramento da máquina de solda ficará disposto com o polo negativo fixado na bancada em que o corpo de prova estará posicionado e próximo ao local da soldagem.

3.2.3 Soldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova serão cortados por uma serra fita onde é possível executar o corte no esquadro, com comprimento de 200 mm. O soldador então fará o preparo da junta, conforme descrito na seção (3.2.1). No processo de soldagem, o corpo de prova será soldado em toda a sua extensão de emenda. Após a execução da soldagem no primeiro lado, será feita a abertura do passe de raiz em todo o perímetro soldado. A figura 22 ilustra o formato final do corpo de prova.

Figura 22- Forma final do corpo de prova.



Fonte: Autor, 2020.

No primeiro lado a ser soldado será feito o passe de raiz em todos os lados do corpo de prova. Dessa forma, após o enchimento do primeiro lado, deverá ser feita a abertura do passe de raiz da solda. A abertura da raiz da solda será executada utilizando uma lixadeira, com disco de desbaste, posicionando verticalmente o disco em relação à raiz da solda, com movimentos uniformes para um lado e para outro, até que a raiz do cordão esteja completamente livre de contaminantes. Em locais em que a lixadeira não tem o alcance desejado, será utilizada a retífica com a ponta de metal, que possibilita a abertura do passe de raiz.

Durante a soldagem, o local que receberá a deposição de material estará sempre em posição plana e ambos os lados do corpo de prova serão apoiados na bancada e presos por gatilhos, que impossibilitem a movimentação ou a vibração. Por fim, após a soldagem completa do corpo de prova, o soldador deverá anotar com sinete os parâmetros que foram utilizados em cada corpo de prova, para que não ocorra desvios na análise da qualidade dos parâmetros estudados.

3.3 Ensaios não destrutivos de verificação da qualidade dos corpos de prova

Com os corpos de prova já finalizados e em temperatura ambiente, será iniciada a avaliação da qualidade dos parâmetros de soldagem por meio de ensaios não destrutivos, de líquido penetrante e de ultrassom.

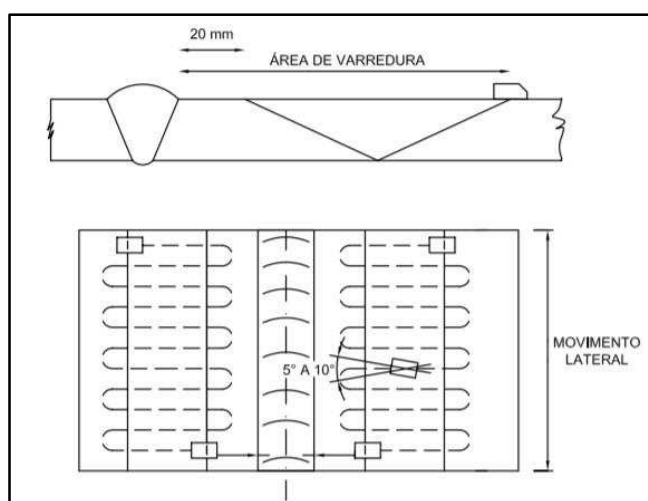
Os corpos de prova deverão estar isentos de quaisquer tipos de contaminantes e de impurezas que possam alterar os ensaios e os resultados obtidos. Com isso, após a soldagem, será feita a limpeza em todos os corpos de prova, com o auxílio de escova de aço acoplada a uma lixadeira, antes dos ensaios.

Para a realização do ensaio de líquido penetrante, será utilizada a marca Metal-Chek para o penetrante e a marca Metal-Chek para o revelador. A aplicação do penetrante deve ser feita posicionando o recipiente de spray perpendicularmente a uma distância de aproximadamente 200 mm, e em movimentos de vai-e-vem, até que a superfície esteja homogeneamente coberta. Em seguida, utilizando a mesma técnica, deve ser aplicado o líquido revelador. Decorrido o tempo de 3 minutos, os pontos de discontinuidades estarão visíveis e possíveis de serem avaliados.

A realização do ensaio de ultrassom será processada através da superfície do metal base, em uma área paralela ao cordão de solda. Como os resultados obtidos pelo ensaio são diretamente dependentes do preparo da superfície, ela deverá estar isenta de impurezas que dificultem a entrada do feixe sônico no interior da peça. Para isso, irá se utilizado uma escova de aço acoplada a uma lixadeira, onde será realizado movimentos com a escova em toda a extensão do cordão de solda,

até que a superfície esteja livre de impurezas que possam danificar o cabeçote de ensaio de ultrassom. Após a limpeza, será aplicado o gel de proteção, que é composto por uma mistura de álcool e carboximetilcelulose, e que será aplicado em toda a área de realização do ensaio. Depois dessa aplicação, é executado o ensaio de ultrassom, utilizando para o ensaio o cabeçote de 60 graus. O cabeçote deve estar inicialmente posicionado a uma distância de 20 mm do cordão da solda. Em seguida, promovendo movimentos de afastamento e aproximação do cordão e deslocando o cabeçote lateralmente, com espaçamento compreendido da largura do cabeçote, faz-se a varredura do cordão de solda em todo o contorno soldado, ou seja, em 100% da aplicação de solda, como pode ser visto na figura 23.

Figura 23 - Técnica de varredura por ultrassom.



Fonte: Petrobrás N-1594, 2004.

É importante estar atento ao ângulo formado pelo cabeçote durante o ensaio, evitando que faixas do cordão de solda não sejam ensaiadas, alterando, assim, os resultados obtidos.

3.4 Análise dos resultados

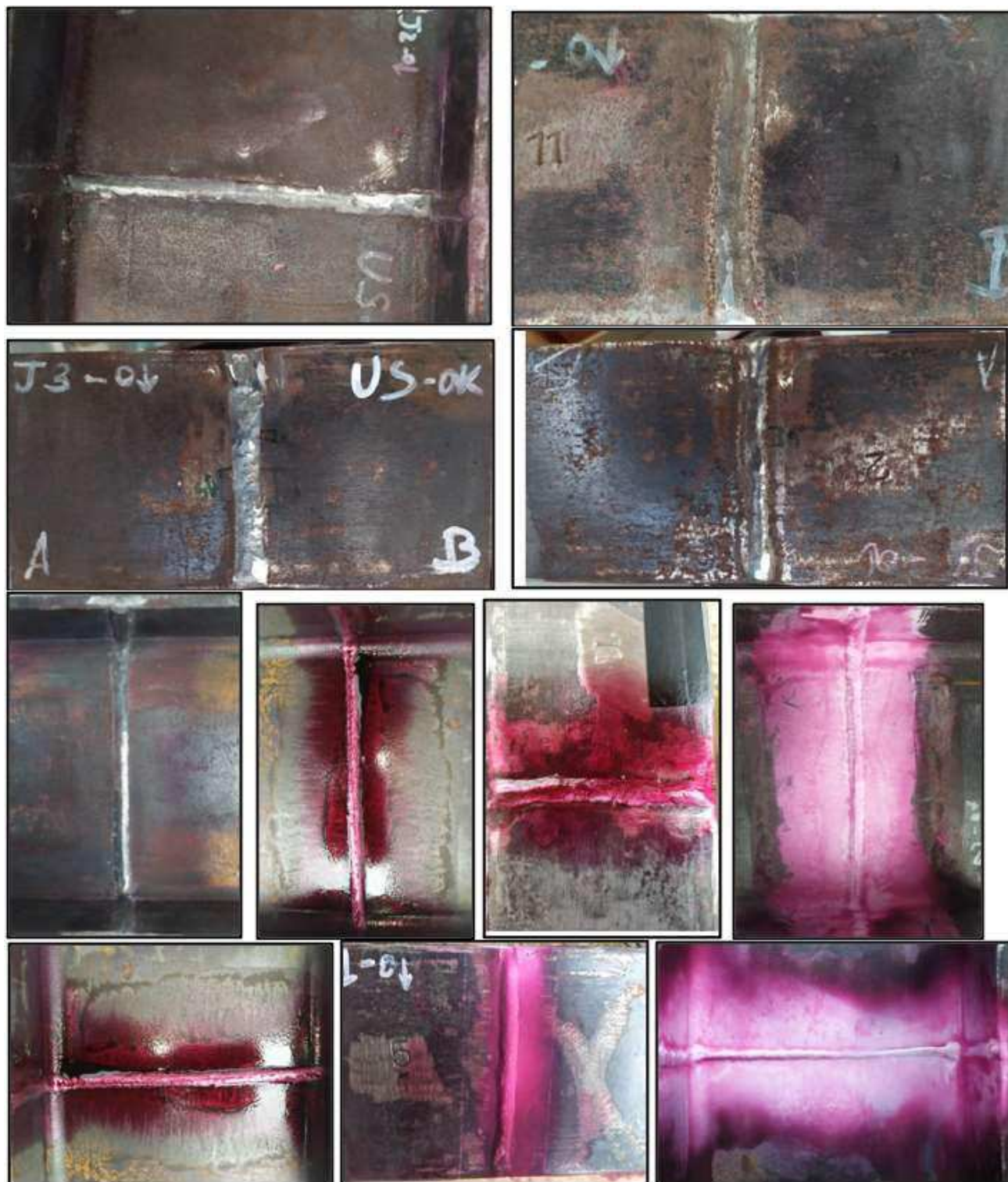
Nessa etapa se descreve-se a metodologia de execução usada durante a coleta, organização, análises dos ensaios. A coleta dos ensaios de ultrassom será feita no momento em que o inspetor responsável pelo ensaio for efetuar a varredura no corpo de prova. Ao finalizar a varredura, o equipamento emite um relatório, contendo os defeitos (se houverem) possibilitando a análise para posterior estudo. Os defeitos de respingos, póro, falta e fusão, inclusão de escória serão avaliados contando-se a quantidade de pontos que estão presentes no entorno do cordão de solda. Após a coleta, os dados serão organizados em uma planilha eletrônica, por nível de parâmetro, números do corpo de prova e tipo de defeito.

Após a organização dos dados, será então feita a análise de variância (ANOVA), que utilizará um *software* de análise estatística (MINITAB), onde os dados serão avaliados com um nível de significância de 95%. No primeiro momento será avaliado o efeito da tensão e da corrente no número total de defeitos e será verificado qual parâmetro tem influência no número total de defeitos. Da mesma forma, será aplicada a avaliação para cada tipo de defeito encontrado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentadas algumas imagens dos corpos de provas após a soldagem e ensaios de líquido penetrante e ultrassom através da figura 24 e os resultados dos ensaios aos quais os corpos de prova foram submetidos. Também são apresentados em forma de gráficos, as análises estatísticas feitas em *software* e as tabelas com os valores coletados em cada ensaio. Ainda, ocorre a etapa de discussão dos resultados e das análises estatísticas.

Figura 24 - Corpos de provas após a soldagem.



Fonte: Autor, 2021.

Inicialmente, a tabela 3 mostra o número total de defeitos encontrados em cada corpo de prova, para os níveis de tensão e corrente variados intencionalmente, com os cálculos das médias e dos desvios padrão para cada nível de tensão e corrente.

Tabela 3 - Número total de defeitos para cada corpo de prova por nível de tensão.

Análise do número total de defeitos					
Nº do CP	Tensão	Corrente	Total de defeitos	Média	Desv.Pad
CP 7	13	90	38	43,00	5,00
CP 10	13	90	48		
CP 1	13	260	84	81,00	3,00
CP 5	13	260	78		
CP 3	20,5	175	20	19,00	2,16
CP 4	20,5	175	16		
CP 8	20,5	175	21		
CP 9	28	90	41	42,50	1,50
CP 11	28	90	44		
CP 2	28	260	64		
CP 6	28	260	59	61,50	2,50

Fonte: Autor, 2021.

A análise baseada no número total de defeitos mostrou que o número de defeitos aumentou para parâmetros de níveis baixos, tensão 13 V e corrente 90 A. Quando o valor da corrente foi aumentado para 260 A e foi mantida a tensão, o número de defeitos aumentou, concluindo que o aumento da corrente influencia na formação dos defeitos. Em níveis médios, ou seja, utilizando a tensão de 20,5 V e corrente de 175 A, observou-se que a quantidade total de defeitos diminuiu significativamente. Por outro lado, ao elevar a tensão para a faixa de 28 V e a corrente 90 A, novamente surgiram mais defeitos. O mesmo ocorreu em níveis de tensão de 28 V e corrente 260 A, com a elevação no número de defeitos.

A partir dos resultados dos ensaios, foi realizada a análise de variância para o número total de defeitos, mostrado tabela 4.

Tabela 4 - Análise de variância para o número total de defeitos.

Análise de Variância					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	5148,68	1287,17	86,29	0
Linear	2	1806,25	903,13	60,54	0
TENSÃO	1	210,12	210,12	14,09	0,009
CORRENTE	1	1596,13	1596,13	107,00	0
Interações de 2 fatores	1	171,12	171,12	11,47	0,015
TENSÃO*CORRENTE	1	171,12	171,12	11,47	0,015
Curvatura	1	3171,31	3171,31	212,60	0
Erro	6	89,50	14,92		
Total	10	5238,18			

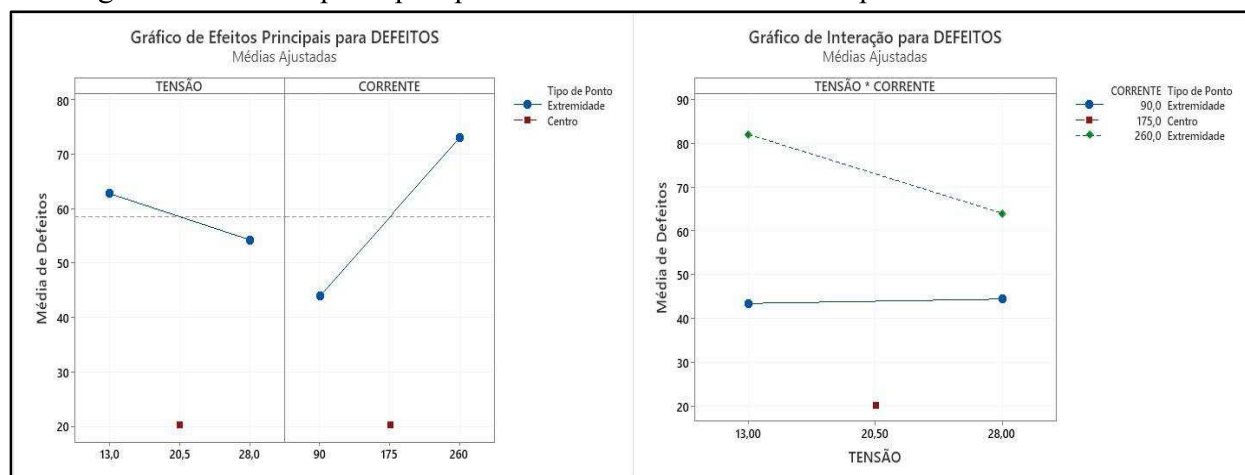
Fonte: Autor, 2021.

Com base nos dados obtidos através da análise de variância da ANOVA, mostrado na tabela 3, é possível verificar que a tensão e a corrente são parâmetros significativos para o número de defeitos sendo que a corrente foi o parâmetro que teve mais influência no número total de defeitos. Também foi possível verificar que houve interação entre os parâmetros de tensão e corrente no surgimento dos defeitos, ou seja, a utilização de níveis de tensão baixo, médio e alto

(13 V, 20,5 V, 28 V respectivamente) mostrou que a alteração do nível de corrente afeta o efeito causado pela tensão no número de defeitos.

Através do tratamento dos dados coletados foi possível determinar a distribuição média do número total de defeitos em cada nível de tensão e corrente estudados, sumarizados em gráficos de efeitos principais, mostrados na figura 25. Ainda é possível verificar a interação que os parâmetros de tensão e corrente têm no número de defeitos.

Figura 25 - Efeitos principais para o número total de defeitos para cada nível de estudo.



Fonte: Autor, 2021.

Através da análise dos gráficos da figura 23, foi possível verificar que a tensão em nível baixo 13 V teve maior influência no surgimento dos defeitos. Em níveis médios de tensão e corrente (20,5 V e 175 A respectivamente), encontrou-se tanto para a tensão quanto para a corrente uma média menor da quantidade de defeitos, o que representa que a qualidade foi maior nesses parâmetros. Quando utilizados níveis altos de tensão e corrente 28 V e 260 A, os valores médios aumentaram significativamente, o que indica que para esses níveis a qualidade de soldagem não é suficiente. Portanto, concluiu-se que o aumento dos níveis de corrente influenciou a qualidade da solda.

4.1 Avaliação de cada tipo de defeito encontrado

Da mesma forma fez-se o levantamento da quantidade de cada tipo de defeitos encontrados em cada corpo de prova. Em cada nível calculou-se a média e desvio padrão, conforme apresentado na tabela 5.

Tabela 5 - Número de defeitos por tipo de defeito e níveis com médias e desvio padrão.

Nº DO CP	Tensão	Corrente	Falta de Fusão			Póro		
			Qtd defeitos	Média	Desv.Pad.	Qtd defeitos	Média	Desv.Pad.
CP 10	13	90	3	2,50	2,29	0	3,00	3,67
CP 7	13	90	6			9		
CP 1	13	260	0			3		
CP 5	13	260	1			0		
Nº DO CP	Tensão	Corrente	Falta de Fusão			Póro		

Tabela 6 - Número de defeitos por tipo de defeito e níveis com médias e desvio padrão. Continuação.

			Qtd defeitos	Média	Desv.Pad	Qtd defeitos	Média	Desv.Pad.
CP 3	20,5	175	0	0,33	0,47	5	1,67	2,36
CP 4	20,5	175	1			0		
CP 8	20,5	175	0			0		
CP 11	28	90	0	1,25	1,64	2	4,50	4,72
CP 9	28	90	4			0		
CP 2	28	260	1			0		
CP 6	28	260	0			7		
Nº DO CP	Tensão	Corrente	Mordedura			Respingos		
			Comp. Defeito (mm)	Média	Desv.Pad.	Qtd defeitos	Média	Desv.Pad.
CP 10	13	90	0	5,75	5,76	45	59,00	21,68
CP 7	13	90	12			31		
CP 1	13	260	11			83		
CP 5	13	260	0			77		
CP 3	20,5	175	48	16,00	22,63	19	18,33	2,49
CP 4	20,5	175	0			15		
CP 8	20,5	175	0			21		
CP 11	28	90	184	67,25	68,33	42	50,00	10,79
CP 9	28	90	11			37		
CP 2	28	260	32			63		
CP 6	28	260	42			58		

Fonte: Autor, 2021.

Através da tabela 5 da quantidade de defeitos, média e desvio padrão, foi possível verificar que em níveis baixos de tensão (13 V) e corrente baixo e alto (90 A e 260 A respectivamente), os defeitos de falta de fusão e póro apresentaram média baixa, o que indica uma elevada qualidade na soldagem, visto que o número de defeitos foi baixo para esses níveis. O defeito de respingo, por apresentar uma média e desvio padrão altos, implica em perda da qualidade de soldagem nesse nível de soldagem, considerando também que há uma elevada presença no número de defeitos encontrados para esses níveis.

Em nível médio, de tensão e corrente (20,5 V e 175 A), a média de defeitos para os defeitos de falta de fusão e póro, apresentaram médias e desvio padrão baixos, indicando boa qualidade de soldagem, considerando que o número de defeitos não foi elevado. Por outro lado, os defeitos de mordedura e respingos, apresentaram médias elevadas, o que implica em queda da qualidade, principalmente no defeito de mordedura. Quando utilizado nível de tensão alto (28 V) e corrente em nível baixo e alto (90 A e 260 A), os defeitos de falta de fusão e póro, apresentaram boa qualidade, visto que a média para esses defeitos foi baixa. Os defeitos de mordedura e respingos, apresentaram média altas, indicando um descontrole no processo de soldagem.

Na tabela 6 mostra-se a análise de variância feita para cada tipo de defeito encontrado nos ensaios.

Tabela 7 - Análise de variância para cada tipo de defeito.

Análise de Variância Falta de Fusão					
Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	26,561	6,64	2,81	0,124

Tabela 8 - Análise de variância para cada tipo de defeito. Continuação.

Linear	2	18,25	9,125	3,86	0,083
TENSÃO	1	3,125	3,125	1,32	0,294
CORRENTE	1	15,125	15,125	6,41	0,045
Interações de 2 fatores	1	3,125	3,125	1,32	0,294
TENSÃO*CORRENTE	1	3,125	3,125	1,32	0,294
Curvatura	1	5,186	5,186	2,2	0,189
Erro	6	14,167	2,361		
Total	10	40,727			

Análise de Variância Póro

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	26,97	6,7424	0,28	0,883
Linear	2	17	8,5	0,35	0,72
TENSÃO	1	4,5	4,5	0,18	0,683
CORRENTE	1	12,5	12,5	0,51	0,501
Interações de 2 fatores	1	0,5	0,5	0,02	0,891
TENSÃO*CORRENTE	1	0,5	0,5	0,02	0,891
Curvatura	1	9,47	9,4697	0,39	0,557
Erro	6	146,667	24,4444		
Total	10	173,636			

Análise de Variância Mordedura

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	12141,9	3035,5	1,09	0,439
Linear	2	9425	4712,5	1,69	0,261
TENSÃO	1	7564,5	7564,5	2,72	0,15
CORRENTE	1	1860,5	1860,5	0,67	0,445
Interações de 2 fatores	1	1800	1800	0,65	0,452
TENSÃO*CORRENTE	1	1800	1800	0,65	0,452
Curvatura	1	916,9	916,9	0,33	0,587
Erro	6	16683	2780,5		
Total	10	28824,9			

Análise de Variância Respingos

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	4	5220,9	1305,22	49,05	0
Linear	2	2146,5	1073,25	40,33	0
TENSÃO	1	162	162	6,09	0,049
CORRENTE	1	1984,5	1984,5	74,57	0
Interações de 2 fatores	1	220,5	220,5	8,29	0,028
TENSÃO*CORRENTE	1	220,5	220,5	8,29	0,028
Curvatura	1	2853,9	2853,88	107,24	0
Erro	6	159,7	26,61		
Total	10	5380,5			

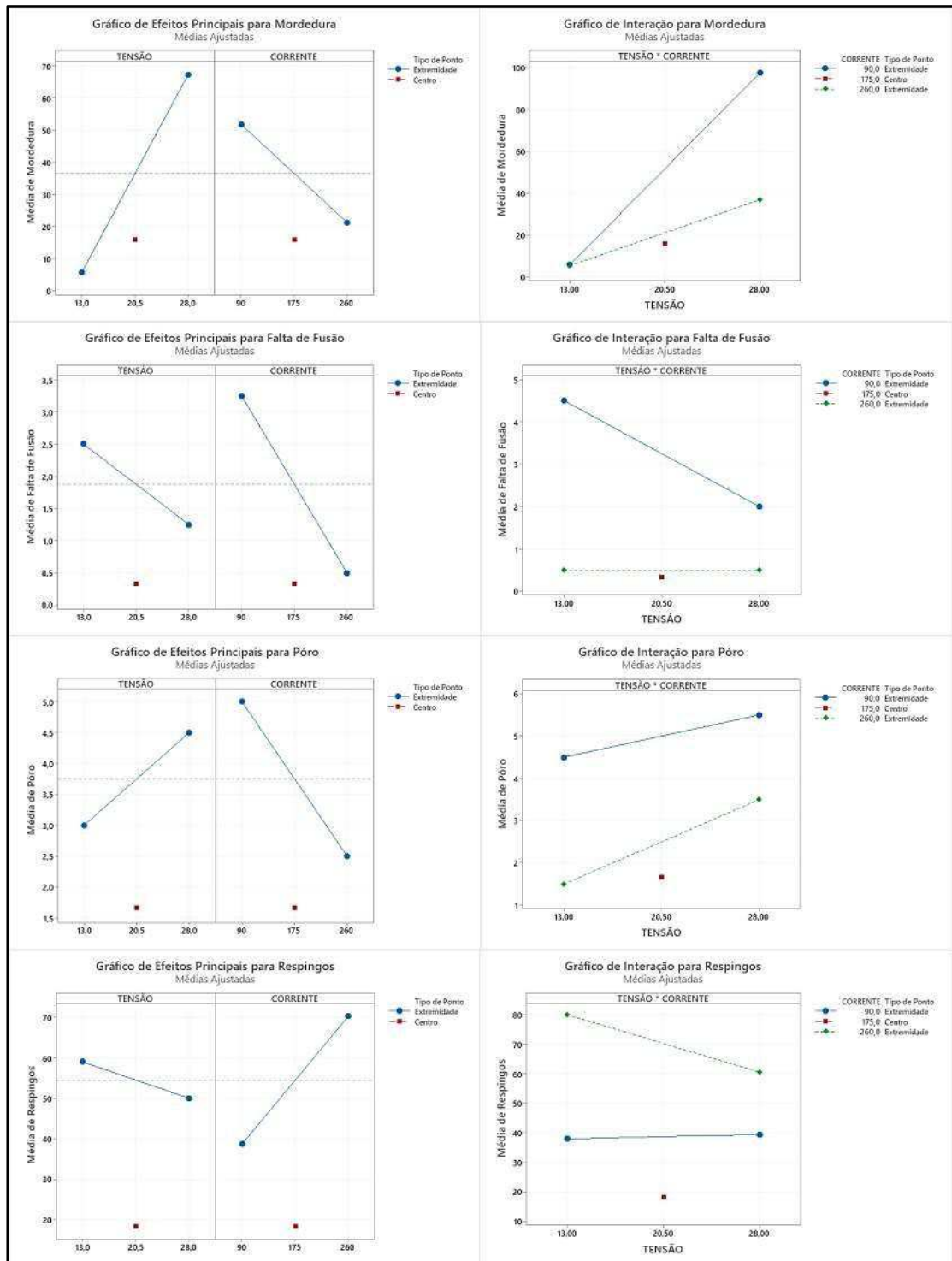
Fonte: Autor, 2021.

A análise de variância mostrou que para o defeito de falta de fusão, apenas o parâmetro de corrente foi significativo na formação do defeito. Ainda foi possível verificar que não houve interação entre a tensão e a corrente, ou seja, os níveis de corrente baixo, médio e alto (90 A, 175 A, 260 A respectivamente), que influenciaram no defeito de falta de fusão. No defeito de póro e mordedura, ambos os fatores (tensão e corrente) não apresentaram significância quanto ao surgimento desse defeito, assim como não houve interação entre os fatores, apontando que esse defeito pode ter ocorrido por outros fatores. Quanto ao defeito de respingos, ambos os fatores

apresentaram significância no surgimento desse defeito, assim como houve interação entre os fatores de tensão e corrente.

Como os níveis de tensão e corrente não foram significativos na formação do defeito de mordedura, a presença pode estar ligada aos parâmetros inadequados no processo de soldagem, como por exemplo o diâmetro de bocal da tocha. O mesmo ocorre na figura 26, onde foi feito o estudo que os níveis avaliados tem na ocorrência de cada tipo de defeito. Também foi feito a análise de interação que esses níveis apresentaram sobre os tipos de defeitos.

Figura 26 - Efeitos principais para cada nível em função do tipo de defeito.



Fonte: Autor, 2021.

Com base nos gráficos da figura 24, foi possível verificar que tanto a tensão quanto a corrente exercem influência direta no surgimento dos defeitos. É possível verificar também que nos gráficos de Falta de Fusão, Póro e Respingos, a corrente exerce uma ação maior do que a tensão no número de defeitos.

Nos gráficos de efeitos principais para cada tipo de defeito, apresentado na figura 25, foram obtidas as confirmações abaixo:

➤ O defeito de falta de fusão apresentou um comportamento distinto para os níveis de corrente avaliados (baixo 90 A, médio 175 A e alto 260 A). O fato de haver uma quantidade maior desse defeito em nível baixo, pode estar ligado a baixa velocidade de soldagem.

➤ A avaliação da presença de respingos mostrou que conforme aumentou-se a tensão, diminuiu a presença desse defeito. Por outro lado, o número aumentou conforme o valor da corrente foi aumentado. A avaliação em níveis médios, mostrou que os níveis foram escolhidos corretamente, sendo que o ponto médio indica um ponto de mínimo no intervalo dos níveis considerados, mostrando que o processo se mostrou adequado a qualidade de soldagem.

➤ O defeito de póro pode ter sido originado pela baixa velocidade de solda, visto que os níveis de tensão e corrente não apresentaram efeito significativo nesse tipo de defeito.

A avaliação do ponto central permitiu avaliar melhor o comportamento do modelo nas análises de variância e interação entre os parâmetros de soldagem, sendo que a sua ausência levaria a uma análise distorcida da interpretação dos resultados estatísticos tanto para o número total de defeitos quanto para cada tipo de defeito ocorrido. Assim, a avaliação do ponto central confirma a hipótese de que os níveis que foram selecionados se tornaram adequados para a avaliação da qualidade e melhoria do processo. Através dessa análise foi possível confirmar que há uma faixa de parâmetros que pode ser utilizada para a soldagem de emendas em estruturas metálicas e que uma alteração desses parâmetros afeta significativamente a qualidade de soldagem nas uniões soldadas de perfil laminado.

5 CONCLUSÕES

Através desse experimento, foi possível concluir os objetivos esperados para esse estudo. O primeiro, compreender a formação dos defeitos de soldagem que ocorrem quando utilizado parâmetros de tensão e corrente em níveis baixos (13 V e 90 A), médios (20,5 V e 175 A) e altos (28 V e 260 A). Também, foi possível compreender como a utilização não correta deles, pode levar ao surgimento de grandes concentradores de tensões, como as trincas e as mordeduras. Além disso, foi possível estudar quais são os ensaios necessários para a verificação e garantia da qualidade da soldagem em juntas soldadas. Assim, compreender os comportamentos e os efeitos que esses parâmetros apresentam quando empregados diferentes faixas de tensão e corrente, reflete na qualidade de soldagem. Por fim, a execução do experimento de soldagem, ajudou a compreender como os níveis de tensão e corrente empregados no estudo refletiram na formação do número de defeitos gerados e na qualidade da soldagem.

Com base nos ensaios e análises realizados, foi possível verificar que os parâmetros de soldagem se comportam de diferentes formas quanto a presença de discontinuidades. Uma característica presente na formação das discontinuidades é quanto a regulagem dos parâmetros de tensão e corrente. Nos ensaios pode-se verificar que quando foram utilizados parâmetros de

corrente altos (260 A), apresentaram maior número de descontinuidades, sendo que a mordedura foi o defeito mais presente. O defeito de mordedura está ligado também a utilização de tensão alta, com a baixa velocidade de arame.

Dentre os parâmetros analisados, pode-se verificar que em níveis baixos de tensão e corrente, houve presença do defeito falta de fusão, ocorrido pela baixa taxa de fusão do material depositado. Quando utilizados níveis altos, houve pouca presença desse defeito, que pode ser justificado pelo aumento da tensão do arco. Por outro lado, houve presença de mordeduras, causadas pela alta tensão e pouca velocidade de arame, causando grandes concentradores de tensões na região da junta, comprometendo a qualidade da emenda. Com isso, os níveis altos e baixos de tensão e corrente mostraram impróprios para a utilização nesse tipo de junta.

A presença de respingos em todos os corpos de prova pode estar ligada ao posicionamento da tocha, fluxo de gás de proteção e mau contato dos cabos de soldagem, que podem ocorrer durante a soldagem em ambiente fabril. Para o presente trabalho, esses parâmetros não foram avaliados, o que pode ter aumentado a presença de respingos. Em níveis médios, tensão 20,5 V e corrente 175 A de soldagem, a presença de descontinuidades diminuiu, o que mostra uma conformidade nos parâmetros empregados.

Em função das características de cada defeito e como eles afetam as propriedades mecânicas das juntas e do cordão de solda, os defeitos de mordeduras e falta de fusão são considerados como defeitos mais críticos e por isso devem ser evitados.

6 TRABALHOS FUTUROS

A fim de melhorar ainda mais as análises de qualidade dos parâmetros de soldagem, o processo pode ser avaliado de forma a executar mais experimentos nessa mesma faixa (nível intermediário), com o objetivo de melhorar a compreensão do comportamento da curva, otimizar o processo de soldagem, e avaliar a presença dos defeitos que podem ocorrer nesses novos níveis de experimento.

Com o objetivo de ampliar o impacto dos parâmetros de soldagem, sugere-se avaliar a influência do fluxo de gás em cada parâmetro, com o objetivo de verificar se esse parâmetro tem influência significativa quanto a presença de defeitos. Fica também a sugestão de avaliar para esses níveis, as características microestruturais dos cordões de solda, ZTA (Zona Termicamente Afetada). Ainda, estudos baseados nos ensaios de dureza, dobra e tração, ajudam caracterizar melhor o emprego desses parâmetros na soldagem em juntas de perfil laminados quanto as propriedades mecânicas após a soldagem.

7 REFERÊNCIAS

- ANDREUCCI, R. (2014). *Livro, Ensaio por Ultrassom*. São Paulo: Abendi.
- ANDREUCCI, R. (2016). *Livro, Líquidos Penetrantes*. São Paulo: Abendi.
- AWS, A. W. (2000). *Livro, Structural Welding Code Steel*. Washington, DC: AWS.
- AWS-D1.1. (2010). *Livro, AWS D1.1-Código de Soldagem Estrutural*. Miami: AWS.

- BASTOS, G. d. (2018). *Importância do ensaio por ultrassom para garantia da qualidade da solda.*
- BEZERRA, J. R. (2018). Efeitos de tratamentos térmicos na propriedade de dureza do aço SAE 4340 na soldagem pelos processos FCAW e Laser: uma revisão.
- BORGES, R. S. (2015). *Análise experimental da resistência à flexão simples de vigas de aço tipo "I" compostas de perfis laminados dotadas de emendas soldadas.*
- DE NOVAIS, P. R. (2010). *Avaliação das principais descontinuidades encontradas nas juntas soldadas, causas e possíveis soluções.*
- GURGEL, R. D. (2015). ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS DE SOLDAGEM COM ELETRODO REVESTIDO E ARAME TUBULAR APLICADOS NA SOLDAGEM DE AÇO CARBONO ASTM-A36.
- JOAQUIM, R. (2009). *Processo de soldagem por arame tubular. Artigo publicado em INFOSOLDA.*
- LIMA, E. M. (2015). Análise de falhas em processo de soldagem com arame tubular na indústria naval utilizando FMEA.
- MACHADO, S. C. (12 de junho de 2013). *Avaliação de Emendas Soldadas Em Perfis Laminados Sujeitos à Flexão Estática.*
- MODENESI, P. J., MARQUES, P. V., & BRACARENSE, A. Q. (2005). Em *Soldagem-fundamentos e tecnologia*. Editora UFMG.
- PAIS FILHO, E. F., & GUEDES, A. E. (2016). *ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS POR LÍQUIDOS PENETRANTES: INSTRUÇÕES ESPECÍFICAS PARA PEÇAS SOLDADAS USADAS.*
- PEREIRA, G., & FERRARESI, V. A. (s.d.). *AVALIAÇÃO DA PRESENÇA DE DEFEITOS EM SOLDAS REALIZADAS PELO PROCESSO DE SOLDAGEM FCAW NA POSIÇÃO PLANA.*
- RODRIGUES, E. R. (2010). Influência de parâmetros do processo FCAW-G nas características da solda do aço ASTM A-36. *Influência de parâmetros do processo FCAW-G nas características da solda do aço ASTM A-36.*
- SILVA, F. L. (2011). *INSPEÇÃO POR ULTRA-SOM PARA VERIFICAR A QUALIDADE DE UNIÃO DE SOLDA.*
- SILVA, R. H. (2005). *Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicada ao passe de raiz.*
- TROMBINI, M. e. (2015). *Avaliação da técnica de ultrassom 'phased array' para a otimização do controle de qualidade em aços laminados e forjados.*