

ANÁLISE COMPARATIVA DA QUALIDADE DAS SOLDAS REALIZADAS PELO PROCESSO GMAW NAS PRINCIPAIS POSIÇÕES DE SOLDAGEM

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE QUALITY OF WELDS MADE BY THE GMAW PROCESS IN THE MAIN WELDING POSITIONS

Allan Bismarck Mesquita de Souza¹
Julio Cesar Frantz¹

Resumo: Em um mercado cada vez mais competitivo, onde o sucesso está em uma linha tênue entre o tempo de execução e a qualidade de um produto, os diversos processos de soldagem carecem cada vez mais de atenção. A soldagem está presente na maioria dos projetos, independentemente do tamanho, possui uma grande influência tanto na segurança e qualidade final do projeto como no tempo de execução. Em inúmeras situações da engenharia, facilmente encontra-se um ambiente de difícil acesso em que foi necessário executar um procedimento de soldagem. Nesse tipo de ambiente, normalmente a qualidade da solda cai de acordo com essa dificuldade de acesso. Neste contexto o presente trabalho tem por objetivo analisar pelo processo de soldagem GMAW (Gas Metal Arc Welding) a qualidade de juntas soldadas nas principais posições de soldagem encontradas na indústria utilizando como parâmetro as normas NBR 7438 e American Society of Mechanical Engineers (ASME) Section IX. Com essa finalidade, executaram-se a soldagem de corpos de prova nas posições plana, horizontal, vertical e sobrecabeça, utilizando o aço SAE 1020, de 12,7 mm de espessura como metal de base. Aplicaram-se sobre esses corpos de prova os ensaios mecânicos destrutivos e não destrutivos solicitados pela ASME IX. Dentre as quatro posições de soldagem, destacou-se a posição sobrecabeça como sendo a dos piores resultados e nas posições plana e horizontal apresentaram-se os melhores resultados. Ao término do trabalho, pode-se confirmar a influência da posição de soldagem na qualidade final da solda e a importância da aplicação dos ensaios mecânicos para qualificação das soldas.

Palavras-chave: MIG. MAG. GMAW. ASTM. Tração. Dobramento.

Abstract: *In an increasingly competitive market, where success lies on a straight line between execution time and product quality. The various welding processes need more and more attention, because it is an area present in most projects regardless of size and for having a great influence on both safety and final quality of the project, as well as the total execution time. Anywhere you look, you can easily find a place of difficult access where there was the need to perform a weld, and usually the quality of this falls according to this difficulty of access. In this context the present work has for objective to analyze for the process of welding GMAW (Gas Metal Arc Welding) the quality of welded joints in the main positions of welding found in the industry using as parameter the norms NBR 7438 and American Society of Mechanical Engineers (ASME) Section IX. With this purpose, and through the aid of scientific bases, the welding of specimens was performed in the flat, horizontal, vertical and overhead positions, using SAE 1020 steel, 12.7 mm thick as base metal. On these specimens, the destructive and non-destructive mechanical tests required by ASME IX were applied. Among the four positions to which the tests were applied, the overhead position stood out as the one with the worst results and the flat and horizontal positions presented the best results, being the only approved positions. At the end of the work, it was possible to confirm the influence of the welding position in the final quality of the weld and the importance of the application of the mechanical tests for qualification of the welds.*

Keywords: MIG. MAG. GMAW. ASTM. Traction. Bending.

1. INTRODUÇÃO

Os diversos processos de soldagem aplicam-se em praticamente todas as áreas de construção e estão presentes em larga escala dentro do setor metal mecânico, além disso, vale ressaltar que na maioria dos casos as soldas estão sujeitas a falhas

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem que podem comprometer todo um projeto. Essas falhas acontecem, principalmente decorrentes da falta de qualificação dos profissionais, desconhecimento das normas vigentes, e devido ao grau de dificuldade na aplicação do cordão de solda interferindo na qualidade do produto soldado. Pode-se mencionar como exemplos de aplicação de solda: a fabricação de caldeiras e vasos de pressão. Conforme Oliveira (2012) nesse tipo de projeto, devido as altas pressões envolvidas, uma falha proveniente da execução de uma solda de má qualidade, pode facilmente gerar grandes acidentes e prejuízos.

Dessa forma aumenta-se cada vez mais a necessidade de formação adequada para que profissionais qualificados possam executar as soldas com maior precisão e segurança, além da realização de um projeto adequado que antecipe a aplicação de soldas que podem ser realizadas em bancadas, aumentando a probabilidade de se obter um cordão de qualidade. Para que isso possa ser alcançado, conforme a Norma *American Society of Mechanical Engineers (ASME) Section IX* é necessário que um fabricante padronize as especificações das juntas soldadas, respeitando as normas vigentes. Essa padronização é realizada através do procedimento de soldagem (EPS) que compreende ainda os registros da qualificação do procedimento (RQP), onde estão contidas todas as anotações das variáveis coletadas enquanto os materiais de teste são soldados. Na EPS também estão definidos aplicação de testes mecânicos que validem esses procedimentos, aplicando-os nos mais diversos processos de soldagem, como GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), mais conhecido como *Metal Inert Gas* (MIG) ou *Metal Active Gas* (MAG), processo esse que é objeto de estudo deste trabalho.

De acordo com Oliveira (2012), o processo GMAW, apresenta algumas vantagens quando comparado a outros processos de soldagem, pois permite que sejam soldados a maior parte dos materiais metálicos utilizados na indústria, não acarreta grandes custos para sua implantação, além de oferecer maior produtividade quando comparado a outros processos de soldagem.

Conforme trabalho realizado por Dihlmann (2016), onde realizou-se um comparativo entre os resultados dos ensaios mecânicos no processo de soldagem por eletrodo revestido nas posições plana, horizontal, vertical e sobre cabeça no aço

ASTM A36. Dihlmann (2016), conclui que a posição de soldagem apresenta grande relevância na obtenção de resultados satisfatórios, sendo sugerido inclusive que seja dada preferência na realização das soldas na posição plana e evitado a solda na posição sobre cabeça sempre que for possível.

Tendo em vista a vasta aplicabilidade do processo de soldagem e a necessidade de sua utilização em diversos projetos, desde os mais simples como a fabricação de um corrimão, até projetos mais complexos e de grande porte, como a fabricação de embarcações e plataformas offshore. Este trabalho tem por objetivo realizar um comparativo de juntas soldadas nas principais posições de soldagem utilizadas na indústria, através do processo GMAW, realizando os principais ensaios mecânicos descritos nas normas ASME *Section IX* e NBR 7438, apresentar a importância da aplicação dos ensaios mecânicos, tanto destrutivos quanto não destrutivos e demonstrar através dos resultados obtidos nesses ensaios, se o grau de dificuldade proporcionado pela posição de soldagem, influencia na qualidade final da junta soldada. Para que dessa forma seja possível de maneira geral constatar a real necessidade de se proporcionar um ambiente adequado e que permita que a solda seja aplicada com maior facilidade.

O trabalho divide-se da seguinte forma: Primeiro apresenta-se na revisão bibliográfica os conceitos teóricos aplicados, onde se busca fundamentar o trabalho através de uma pesquisa na literatura correspondente ao assunto. Em seguida, nos materiais e métodos, são descritos os procedimentos realizados, iniciando na montagem e soldagem dos corpos de prova e posteriormente apresentando a aplicação dos ensaios destrutivos e não destrutivos, por último em resultados e discussões, são apresentados os resultados dos ensaios aplicados e as conclusões tiradas após análise desses resultados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a elaboração deste trabalho, realizou-se uma pesquisa na literatura visando fundamentar as decisões a serem tomadas ao longo do desenvolvimento do trabalho, esclarecendo e conceituando o processo de soldagem com gás de proteção,

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem os tipos mais comuns de transferência metálica e as principais posições de soldagem utilizadas atualmente no mercado.

2.1. Gas Metal Arc Welding

No processo de GMAW o arco elétrico é formado pela adição de um material, chamado de eletrodo ou arame eletrodo, o gás de proteção e a alimentação de corrente ocorre pelo cabo de corrente elétrica (Fig. 1). O arco elétrico se forma quando ocorre a passagem de elevada corrente elétrica entre dois metais, fazendo com que a corrente salte de um metal para o outro gerando temperaturas que variam em torno de 3300 °C à 4400 °C (Santos, 2015). Podemos entender o conceito de arco elétrico como sendo uma descarga elétrica que passa a existir por intermédio de um gás ionizado que é capaz de manter essa descarga. Isso se inicia através de uma certa quantidade de elétrons provenientes do aquecimento do eletrodo negativo (cátodo) que é por sua vez sustentado pela ionização térmica do gás que foi submetido ao aquecimento gerado no processo (Wainer, Brandi, Mello, 1992).

De acordo com Santos (2015) no processo de soldagem GMAW, o material consumível que é um eletrodo sem revestimento, é depositado no metal base de forma contínua através de um alimentador. A energia para a realização do processo é obtida do arco elétrico gerado como uma fonte de calor e é o próprio eletrodo o responsável por conduzir essa energia até o metal base, conforme ocorre a alimentação. Com essa condição de temperatura elevada a extremidade do eletrodo começa a se fundir e depositar-se em uma poça. A poça de fusão é formada sobre o metal base a ser soldado e através das altas temperaturas envolvidas fundem-se o metal base da peça a ser soldada com o material do eletrodo, formando-se o cordão de solda.

Podemos definir esse processo como automático nos casos em que a condução da tocha se dá de forma mecânica ou automatizada e semiautomática nos casos em que essa condução ocorre por intermédio de um operador (Santos, 2015). Na Figura 1 podemos observar de maneira mais clara como esse processo ocorre, no interior da tocha observam-se os principais componentes responsáveis pelo processo em si, em vermelho observa-se o cabo de corrente, em amarelo o arame que é

alimentado de forma contínua e em verde o duto responsável por transportar o gás de proteção. Conforme a tocha se desloca a poça de fusão vai se solidificando e formando o cordão de solda que pode ser observado na cor marrom, este cordão é o responsável pela união das duas peças a serem soldadas.

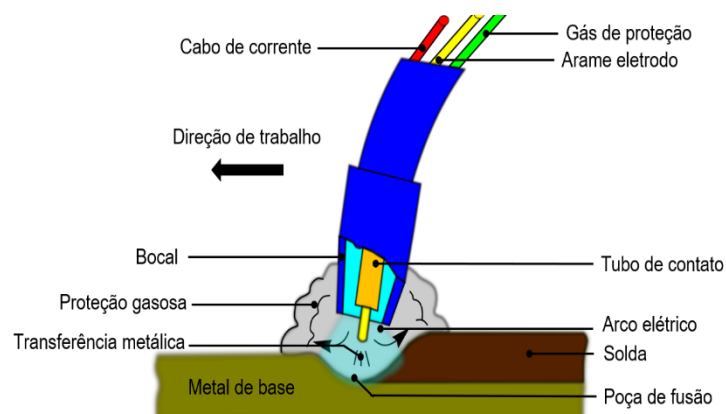


Figura 1. Processo de soldagem GMAW (Adaptado de SANTOS, 2015).

O processo GMAW possui uma grande aplicabilidade e apresenta vantagens quando comparado a outros processos de soldagem como, por exemplo, o Tungstênio Inerte Gás (TIG), eletrodo revestido e arco submerso. Segundo Wink (2015), entre essas vantagens podemos citar: a possibilidade de realizar a solda em todas as posições de soldagem desde que os materiais apresentem uma espessura superior a 0,76 mm, maior deposição do metal na poça de fusão, menor tempo para execução do trabalho podendo chegar a 50% se comparado ao processo de eletrodo revestido, aproveitamento total do arame utilizado no processo ao contrário dos processos TIG e eletrodo revestido, onde se desperdiçam partes do consumível, permite trabalhar com velocidades de soldagem mais elevadas.

2.2. Tipos de transferência metálica

A transferência metálica ocorre quando o metal superaquecido que atinge seu ponto de fusão, se desloca da extremidade do metal de adição até a poça de fusão na superfície do metal base e a forma com que ocorre essa transferência metálica dentro dos processos de soldagem é um assunto amplamente discutido e estudado,

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem devido a grande influência gerada no processo como um todo. Segundo Wink (2015) essa influência ocorre principalmente nos níveis de respingos, estabilidade do processo, aparência do cordão e até mesmo na possibilidade ou não de se aplicar o cordão de solda fora da posição plana. O tipo de transferência está relacionado a fatores como por exemplo, metal de adição, combinação dos valores de corrente e tensão, pressão e gás de proteção. Na Figura 2 podemos visualizar os três principais tipos de transferência metálica: tipo globular, tipo *spray* e tipo curto circuito.

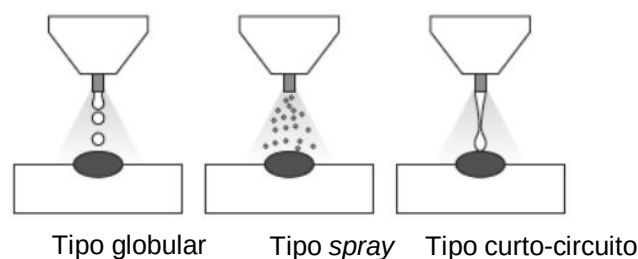


Figura 2. Principais tipos de transferência metálica (SILVEIRA, 2016).

De acordo com Marques *et al.* (2005), a transferência do tipo curto-circuito geralmente é aplicada em soldas com posições diferentes da posição plana ou em soldagem de peças de pequena espessura onde não se utilizam altas energias de soldagem. Na transferência por curto circuito a ponta do eletrodo começa a mudar de fase se tornando uma gota de metal derretido, essa gota aumenta até o ponto de atingir a poça de fusão, então é atraída para a poça de fusão devido a ação da tensão superficial. Esse tipo de transferência ocorre ao serem usados valores baixos de corrente e tensão. Nele percebe-se um elevado nível de respingos, porém esse problema pode ser minimizado através de uma seleção adequada dos parâmetros de soldagem e ajuste da indutância na fonte de energia, controlando os curtos-circuitos para que ocorram da forma mais suave possível, fazendo com que parte da ponta do eletrodo fique mergulhada na poça de fusão, tornando o arco mais estável.

A transferência metálica tipo globular, quando comparada a transferência do tipo curto-circuito, resulta em uma maior estabilidade do arco devido aos valores intermediários de tensão e corrente, porém a transferência metálica ocorre de forma imprevisível e desordenada. Normalmente as gotas que se formam apresentam um diâmetro maior do que o diâmetro do eletrodo, o tamanho dessas gotas está

relacionado com a corrente que está sendo utilizada e irá variar com essa corrente. Conforme Wink (2015) a transferência metálica do tipo globular, apresentará um desprendimento das gotas de metal líquido, similar ao gotejamento em uma torneira parcialmente aberta. Primeiramente, devido as altas temperaturas, a ponta do arame inicia o processo de fusão formando a gota metálica, porém esse metal líquido permanece ligado ao arame devido a ação da tensão superficial, até que, por ação da gravidade, a gota de metal líquido que se formou se desprende devido ao seu peso e é dessa forma depositado na poça de fusão. Devido a essa dependência da gravidade, arco instável e grande volume de respingos, a transferência do tipo globular apresenta uma utilização limitada na soldagem GMAW.

Conforme Marques *et al.* (2005), existe uma faixa de valores entre os modos de transferência metálica globular e spray que é chamada de corrente de transição, conforme a corrente de soldagem aumenta, as gotas de metal líquido que se formam na extremidade do arame diminuem, até que, ao se ultrapassar a faixa de corrente de transição, o modo de transferência passa de globular para spray de maneira repentina. A transferência do modo spray, apresenta uma grande quantidade de pequenas gotas de metal que são menores do que o diâmetro da extremidade do arame, devido a esse tamanho e facilidade de locomoção dessas pequenas gotas, a transferência por spray praticamente não gera respingos e apresenta um cordão regular e suave resultando em um arco com boa estabilidade. Essa transferência não ocorre com todas as proteções gasosas, na Tab. 1 podemos observar melhor os tipos de gases e valores da corrente de transição.

Segundo Guimarães (2016), quanto mais facilmente ocorrer a transferência metálica, maior estabilidade terá o arco elétrico, permitindo obter melhores resultados com relação a regularidade da geometria do cordão de solda. Em seu trabalho, coletam-se os valores de tensão e corrente ao longo do processo de soldagem e analisa-se a regularidade e facilidade de transferência metálica a partir da ocorrência e regularidade de curto-circuito e transferência da gota, os dados coletados são compilados e analisados com o auxílio do software Matlab®, comparando os valores de corrente de 200 e 230A, permitindo finalmente a avaliação da estabilidade do arco elétrico. Após esta análise Guimarães (2016) constata que os ensaios soldados com

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem a corrente de 200A, foram os que apresentaram maior facilidade de transferência metálica e consequentemente maior estabilidade do arco.

Tabela 1. Gases e correntes de transição (MARQUES *et al.* 2005).

Material	Diâmetro do arame (mm)	Gás de proteção	Corrente de transição (A)
Aço carbono	0,8	Argônio 2% Oxigênio	150
	1	Argônio 2% Oxigênio	165
	1,2	Argônio 2% Oxigênio	220
	1,6	Argônio 2% Oxigênio	275
Aço inoxidável	0,8	Argônio 2% Oxigênio	170
	1,2	Argônio 2% Oxigênio	225
	1,6	Argônio 2% Oxigênio	285
Alumínio	0,8	Argônio	95
	1,2	Argônio	135
	1,6	Argônio	180

2.3. Posições de soldagem

Conforme Marques *et al.* (2005) em um processo de soldagem, duas peças são unidas através do cordão de solda ou de vários cordões, a região onde esse cordão é aplicado, denomina-se junta e o que vai determinar o tipo de posição em que será realizada a solda, é justamente a forma com que essas duas peças são unidas. Chiaverini (1986), apresenta as juntas de topo, sobreposta, de canto, e juntas em T, como sendo os principais tipos de juntas soldadas. O que as diferencia é a forma com que as partes do metal de base são soldadas, onde nas juntas de topo as partes são soldadas em suas superfícies externas, nas sobrepostas as partes ficam uma sobre a outra sendo que esta largura de contato deve ser de 3 a 5 vezes sua espessura, as juntas em canto também são soldadas em suas superfícies externas porém as partes se posicionam perpendicularmente uma a outra, finalmente as juntas em T onde as partes soldadas formam um ângulo de 90° entre elas. Chiaverini (1986) salienta ainda que é de extrema importância que as extremidades estejam chanfradas, sendo isso dispensado somente em casos de aplicação de baixas cargas estáticas.

Para Marques *et al.* (2005) as formas de união entre as partes podem ser divididas em cinco tipos básicos de junta, conforme ilustrado na Fig.3

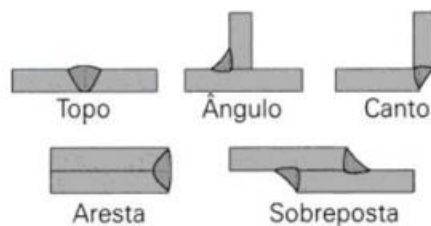


Figura 3. Tipos básicos de junta (MARQUES *et al.* 2005).

Conforme Marques *et al.* (2005), as posições de soldagem são identificadas através de um número e uma letra, para as soldas de topo e soldas circunferenciais, que são aplicadas em chanfro, se utiliza a letra G que se refere a Groove, quando as peças que serão soldadas se encontram perpendiculares uma a outra, se utiliza a letra F que se refere a Fillet ou filete. Sendo assim podemos definir as posições de soldagem como sendo: Plana 1G e 1F, horizontal 2G e 2F, vertical 3G e 3F e sobrecabeça 4G e 4F, conforme apresentado na Fig. 4.

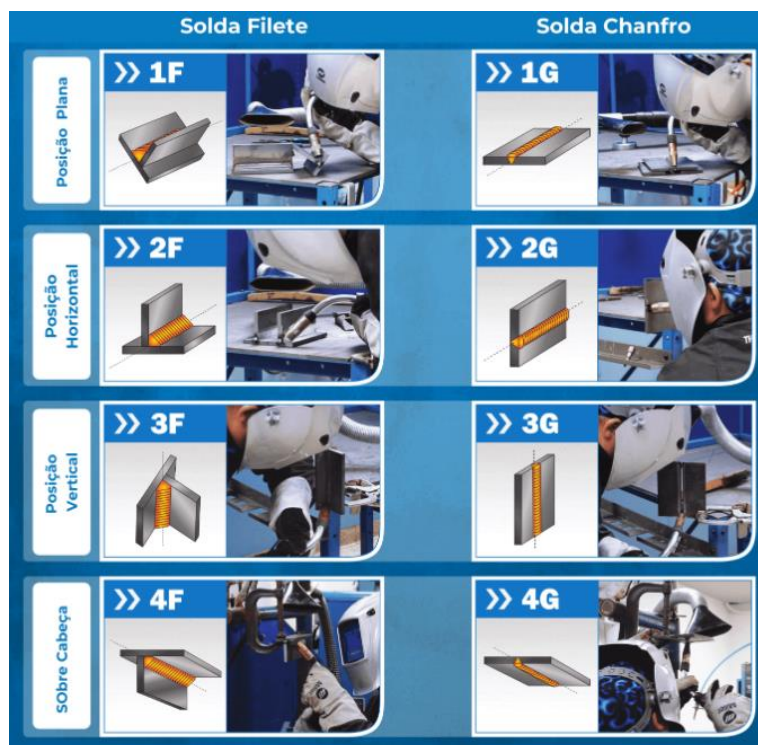


Figura 4. Principais posições de soldagem (AVENTA, 2021).

A posição em que a solda é aplicada é um fator relevante, pois conforme Júnior (2015), a produtividade e o nível de dificuldade da solda são diretamente influenciados por esse fator, para Júnior (2015) apud SENAI (1998), os diferentes posicionamentos

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem
de soldagem são fatores relevantes sobre a resistência mecânica da junta soldada, pois possuem diferentes níveis de dificuldade o que interfere na qualidade da solda.

Silva *et al.* (2012) utilizando o processo de soldagem GMAW para soldar o material AA5052, realizou um comparativo entre as posições 1G plana e 4G sobrecabeça, onde as variáveis eram apenas a posição de soldagem e a distância entre o bico de contato e a peça (DBCP). Após a realização do processo de soldagem, os corpos de prova foram submetidos a um ensaio metalográfico para medição dos parâmetros geométricos (largura, penetração e reforço), os resultados mostraram que, ao contrário da influência ocasionada pela alteração da posição de soldagem, a DBCP não foi um parâmetro de grande influência na qualidade do cordão, pois, ao aumentar-se a DBCP a tensão utilizada também é aumentada trazendo equilíbrio ao processo.

Silva *et al.* (2012) conclui que as soldas realizadas na posição plana, apresentaram maiores valores de largura, penetração e reforço do que na posição sobrecabeça. Isso deve-se principalmente pela ação da gravidade, pois, a posição plana tende a facilitar a deposição de material na poça, por estar atuando no mesmo sentido da deposição do material, ao passo que na posição sobrecabeça ocorre o contrário.

Após realizar um comparativo entre as principais posições de soldagem, Dilhmann (2016) também destaca a posição plana como sendo a melhor posição para se realizar uma solda e a posição sobrecabeça como a posição que deve ser evitada sempre que possível pelo fato de seu grau de dificuldade interferir diretamente nos resultados obtidos nos ensaios.

A Fig. 5 apresenta um comparativo entre a qualidade das soldas nas posições plana e sobre cabeça, realizadas através do processo de soldagem por eletrodo revestido, onde fica evidente após um teste por líquido penetrante que na posição sobre cabeça, Fig. 5(b) ocorrem falhas decorrentes da dificuldade de execução da soldagem nessa posição, ao passo que a posição plana Fig. 5(a) não apresenta falhas.

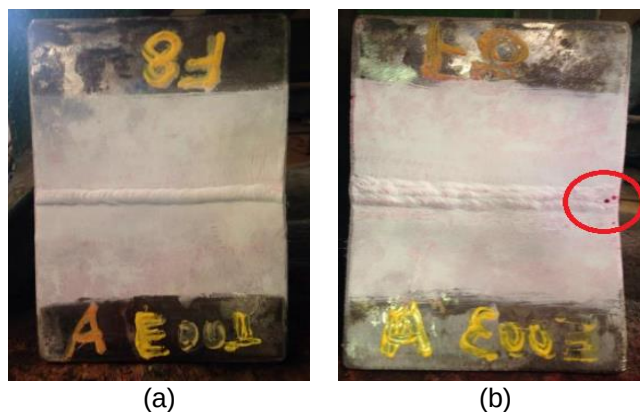


Figura 5. Qualidade da solda nas posições: (a) plana e (b) sobre cabeça (Adaptado de DIHLMANN, 2016).

2.4. Ensaios mecânicos

A aplicação da solda em uma peça, implica em alterações nas propriedades mecânicas da região próxima à junta soldada, (Chiaverini 1986), além disso, a qualidade de uma junta soldada está consideravelmente relacionada a utilização correta dos parâmetros de soldagem tais como: ângulo da tocha em relação a peça, velocidade do arame, corrente aplicada, composição do material de adição, etc. (Wainer et al. 2011).

Quando algum desses parâmetros é selecionado de maneira incorreta ou dependendo da posição e dificuldade de execução da solda, ocorrem defeitos na junta soldada que podem comprometer todo um projeto. Por isso é de extrema importância que após finalizado o processo de soldagem, sejam aplicados testes que comprovem que a qualidade da junta soldada atende aos limites preestabelecidos no projeto.

De acordo com Dihlmann (2016) os ensaios mecânicos visam justamente confirmar se a junta soldada está dentro desses limites, isso porque ensaios desse tipo são capazes de expor importantes propriedades mecânicas dos materiais, bem como simular situações que revelem como a junta soldada se comportará.

De acordo com Garcia (2012), esses tipos de ensaios podem ser classificados através da integridade geométrica e dimensional ou através da velocidade de aplicação da carga:

Integridade geométrica e dimensional:

- Ensaio destrutivos: Provocam danos permanentes na peça inutilizando a mesma, como por exemplo: ensaio de tração, impacto, dobramento, compressão etc.;
- Ensaio não destrutivos: São chamados assim justamente pelo fato de não inutilizar a peça, como por exemplo: ensaio visual, partícula magnética, raio-x, líquido penetrante etc.

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

Velocidade de aplicação da carga:

- Carga estática: É chamado dessa forma pois o corpo de prova é submetido a uma carga que é adicionada de maneira lenta, isso leva a uma série de estados de equilíbrio, por exemplo ensaios de flexão, tração e compressão.
- Dinâmicos: Neste tipo de ensaio, aplica-se a carga de maneira cíclica, como por exemplo o ensaio de fadiga.
- Carga constante: Em ensaios de carga constante, aplica-se a carga por um longo período como exemplo pode-se citar o ensaio de fluência.

Nesse trabalho apresenta-se, de forma breve, a inspeção visual, por líquido penetrante, dobramento e tração, os quais foram utilizados durante os procedimentos experimentais.

2.5. Inspeção visual

De acordo com Oliveira (2012) apud Chiaverini (1986), a inspeção visual apresenta algumas vantagens como por exemplo a agilidade e o baixo custo na aplicação do mesmo, através dela é possível detectar falhas importantes que são visíveis a olho nu, como por exemplo porosidades, mordeduras, falta de fusão, respingos, etc.

Oliveira (2012) realiza um comparativo através de ensaios mecânicos entre as posições de soldagem 2G, 3G e 4G no aço ASTM A36, pelo processo de eletrodo revestido, em corpos de prova soldados por três diferentes soldadores, neste trabalho após aplicar a inspeção visual, reprovam-se os três corpos de prova de um dos soldadores sendo possível observar a influência exercida também pela experiência destes na qualidade final da junta soldada.

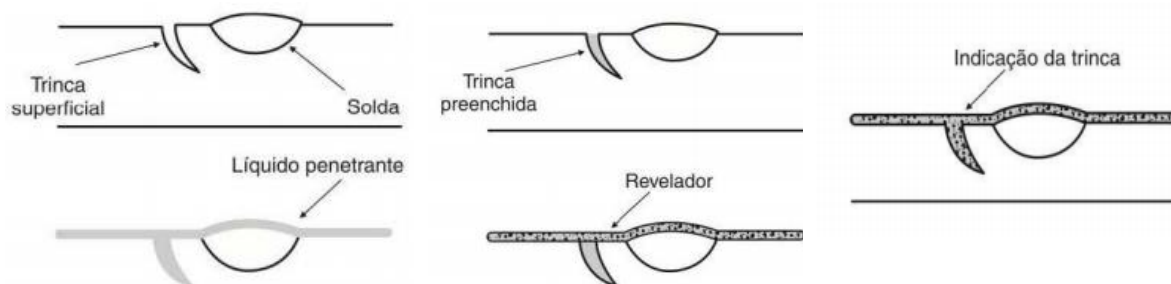
2.6. Ensaio por líquido penetrante

Dependendo da aplicação do material soldado, uma simples inspeção visual a olho nu, apesar de ser capaz de detectar falhas como falta de fusão, porosidade e inclusão de escória, trincas aparentes, não é suficiente para aprovar uma junta soldada. Uma vez que, pequenos poros imperceptíveis a olho nu podem revelar uma falha considerável na solda, capaz de condenar a junta, é necessário utilizar outros tipos de ensaios.

Dessa forma ainda na etapa de inspeção visual é possível aplicar um teste por líquido penetrante, que é um teste relativamente barato e eficaz. Conforme Chiaverini (1986), o ensaio por líquido penetrante também pode ser considerado um ensaio visual, esse método é capaz de revelar pequenas e grandes descontinuidades através de uma pequena falha na superfície.

Para a realização desse tipo de ensaio são necessários dois elementos que são utilizados em duas etapas distintas ao longo do ensaio. O primeiro deles é o líquido penetrante que como o próprio nome diz, tem a função de penetrar nas descontinuidades da peça, ou seja, sua função é exatamente ocupar qualquer espaço vazio do corpo de prova, desde que possua uma entrada na superfície. O segundo elemento é o revelador que é aplicado após o penetrante, este recebe esse nome por tratar-se de uma substância absorvente que drena o penetrante alojado nas descontinuidades, tornando visíveis estas falhas e dando inclusive noções de grandezas dimensionais, é importante que se aguarde a reação de absorção do revelador para que se obtenha sucesso no ensaio, em seu trabalho, De Andrade e Dantas (2018) aguardam um tempo de aproximadamente 15 min.

De acordo com Garcia (2012), o absorvente é de cor branca e pode ser um líquido volátil ou pó revelador e a aplicação do ensaio se dá da seguinte forma: primeiro a peça deve ser limpa para que as entradas das falhas fiquem desobstruídas permitindo a penetração do líquido conforme mostrado na Fig. 6(a), após isso deve-se realizar uma limpeza superficial do corpo de prova removendo o excesso de líquido penetrante, o objetivo aqui é que permaneça líquido apenas dentro das descontinuidades como é mostrado na Fig. 6(b), por fim deve ser aplicado o revelador que absorve o líquido alojado nas trincas tornando-as facilmente visíveis conforme Fig. 6(c). Os procedimentos adotados por Garcia (2012) e De Andrade e Dantas (2018), estão de acordo com o que determina a ABENDI Associação Brasileira de ensaios não destrutivos.



Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

(a)

(b)

(c)

Figura 6. Etapas do processo de ensaio por líquidos penetrantes (GARCIA, 2012)

Conforme Andreucci (2018) que utiliza as normas ASME SEC. VIII DIV.1 AP.8 e ASME SEC.I, as falhas que devem ser consideradas como relevantes são chamadas de indicações e devem apresentar dimensões de no mínimo 1,5 mm, essas indicações são separadas em 2 categorias:

- Arredondada – cujo comprimento é igual ou menor que três vezes a largura;
- Linear - cujo comprimento é maior que três vezes a largura;

Sendo que, de acordo com Andreucci (2018), para que o teste seja aprovado, as superfícies examinadas não podem conter: nenhuma indicação relevante linear, nenhuma indicação relevante arredondada superior a 5 mm e não devem conter mais do que três indicações relevantes arredondadas, distribuídas na mesma linha e com uma distância menor ou igual a 1,5 mm.

2.7. Ensaio de dobramento

Conforme a norma ASME IX, o ensaio de dobramento é qualitativo e visa simplesmente constatar a presença de defeitos visíveis a olho nu, dessa forma, após a realização do dobramento, a superfície convexa deve ser examinada visualmente a fim de detectar qualquer descontinuidade, sendo que as descontinuidades encontradas não podem ultrapassar 3mm. A solda deve ser reprovada caso seja encontrada qualquer descontinuidade que exceda 3mm, a soma destas descontinuidades com comprimento cujos valores estejam entre 1 e 3 mm devem ser somados e não podem ultrapassar 10 mm, entretanto a norma recomenda que não sejam consideradas as trincas que forem constatadas nos cantos do corpo de prova ensaiado a menos que essa trinca seja oriunda de algum defeito interno da solda.

Conforme Dihlmann (2016), a severidade do ensaio de dobramento está diretamente relacionada ao ângulo utilizado, sendo que os ângulos aplicados nesse tipo de ensaio geralmente são de 90° , 120° ou 180° , podendo considerar 90° como o menos severo e 180° como o mais severo.

2.8. Ensaio de tração

Segundo Garcia (2012), para realizar um ensaio de tração, é necessário que o corpo de prova seja submetido a uma carga de tração uniaxial que deve ser aplicada de maneira crescente até que o corpo de prova seja levado a ruptura. É um ensaio muito utilizado pois é capaz de fornecer importantes dados referentes as características mecânicas do corpo de prova que está sendo testado, como por exemplo: módulo de elasticidade, coeficiente de encruamento, coeficiente de resistência, limite de escoamento, limite de resistência a tração. Além disso, o ensaio de tração pode indicar o comportamento do material ensaiado no que se diz respeito a ductilidade através da estricção e do alongamento (Garcia, 2012; Chiaverini, 1986).

Para aplicação do teste o corpo de prova deve ser fixado pelas extremidades e então realiza-se a carga de tração F , conforme ilustrado na Fig. 7, esse corpo de prova possui um comprimento inicial l_0 e área inicial A_0 , conforme a carga é aplicada ocorre a estricção ou empescoçamento do corpo de prova que passa a ter uma redução nessa área da seção transversal e aumento do comprimento.

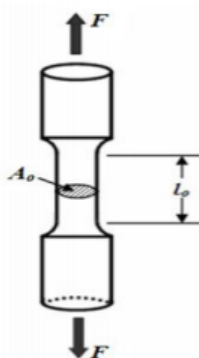


Figura 7. Corpo de prova sob ensaio de tração (DIHLMANN, 2016, apud CALISTER, 2002).

Através destas medidas de comprimento e área coletados antes e após a aplicação da carga, é possível plotar o gráfico Tensão x Deformação que nos mostra as características mecânicas desse material ensaiado, conforme ilustra Fig. 8.

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

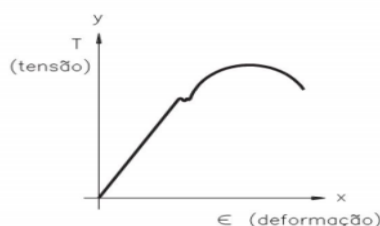


Figura 8. Diagrama Tensão x Deformação (DIHLMANN, 2016, *apud* CALISTER, 2002).

Bulla (2018) realiza em seu trabalho um ensaio de tração no aço SAE1020 utilizando a norma NBR ISO 6892-1:2013 Versão Corrigida 2: 2018 que estabelece as condições para o ensaio de tração à temperatura ambiente. Para fabricar o corpo de prova, a chapa é cortada em formato de um retângulo com o auxílio de uma guilhotina e ficando com as dimensões de 200 mm x 20 mm, após isso utiliza-se uma fresadora ferramenteira para usinar o corpo de prova deixando o mesmo com formato ilustrado pela Fig. 9.

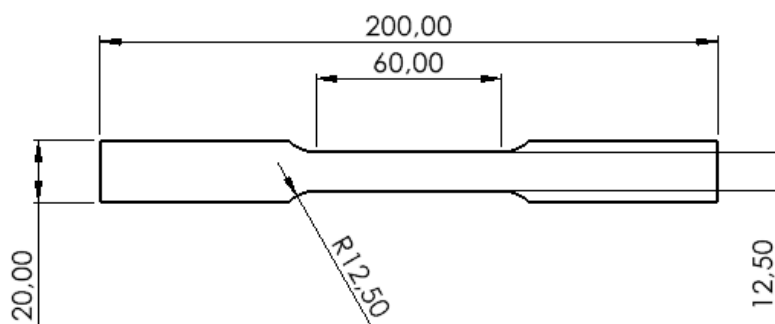


Figura 9. Corpo de prova para ensaio de tração com unidade em mm (BULLA, 2018).

2.9. Ensaio de tração para corpos de prova soldados

Em seu trabalho, Dilhmann (2016), realiza o ensaio de tração conforme orientações da norma ASTM A370, sendo que esta é utilizada para ensaios com os corpos de prova CP a temperatura ambiente, o corpo de prova é cortado de forma a deixar o cordão de solda posicionado perpendicularmente à direção em que a força de tração é aplicada. Os ensaios são realizados em corpos de prova fabricados a partir de

chapas de aço ASTM A36 e soldadas através de eletrodo revestido nas posições horizontal, plana e sobrecabeça. Após análise dos resultados obtidos nos ensaios, Dilhmann (2016) obtém os valores apresentados na Tab. 2.

Tabela 2. Resultados obtidos no ensaio de tração em aço A36 (DIHLMANN, 2016).

Posição	Limite de escoamento(Mpa)	Limite de resistência a tração (Mpa)	Alongamento
Plana	311	515	33%
Horizontal	280	491	34,8%
Sobrecabeça	358	509	52,2%

Apesar de o CP soldado na posição sobrecabeça apresentar um bom resultado no ensaio de tração, Dilhmann (2016) conclui que a posição sobrecabeça deve ser evitada, pois a dificuldade operacional na parte de aplicação da solda facilita a ocorrência de falhas, como inclusão de escórias e descontinuidades, essa afirmação é validada pelos resultados obtidos por exemplo no ensaio de dobramento onde são constatadas descontinuidades que ultrapassam os limites determinados pela norma ASTM A370.

2.10. Aço SAE 1020 e a zona termicamente afetada (ZTA)

Conforme definição de Padilha (1997), materiais podem ser considerados como importantes substâncias que detém uma série de propriedades e de acordo com essas propriedades define-se sua aplicação na fabricação de diversos produtos. A descoberta de diferentes classes de materiais é um fator relevante na história da humanidade, principalmente no que se diz respeito ao desenvolvimento econômico e avanço tecnológico, nesse contexto pode-se dizer que dentro da classe de materiais metálicos, as ligas de ferro e aço são os tipos de materiais de maior aplicabilidade nas mais diversas áreas, essa importância pode ser constatada por exemplo através do período da idade do ferro (Askeland, 2008).

Segundo Dilhmann (2016) apud Askeland (2015), os aços de baixo carbono possuem boa usinabilidade e soldabilidade, essa classe de aço possui um limite máximo de cerca de 0,2% de carbono em sua composição o que resulta em um material com alta tenacidade e ductilidade e com baixa dureza e resistência mecânica.

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

Para Askeland (2008), a soldabilidade do aço é uma propriedade de extrema importância, uma vez que para a fabricação de diversos projetos como estruturas metálicas por exemplo, é necessário realizar a junção de partes do material, o que implica na necessidade de ter-se uma junta soldada que ofereça uma resistência adequada. Esse grau de soldabilidade está relacionado a alterações nas propriedades do material, que ocorrem dentro da zona termicamente afetada (ZTA).

Conforme Chiaverini (1986), a ZTA situa-se no metal de base, imediatamente após a junta soldada e nesta região, apesar de não ocorrer uma alteração na composição química do material, o aquecimento e resfriamento ocorrem de maneira consideravelmente rápida, o que acaba ocasionando alterações na estrutura do metal, pois, de acordo com Askeland (2008), ocorre nessa região a possibilidade de formação de martensita, o que resulta em baixa tenacidade na junta soldada. Segundo Chiaverini (1986), a dimensão da ZTA está relacionada a combinação entre o processo de soldagem aplicado e o tipo de material do metal-base, sendo que no processo GMAW, essa região estende-se por cerca de 20 a 25 mm.

De acordo com Barbosa (2018) apud Callister (2008), o aço 1020 apresenta vantagens relacionadas a custo-benefício quando comparado a outros tipos de aços, como os ligados por exemplo, classifica-se como aço carbono comum devido ao fato de possuir baixo teor de carbono, é um material de vasta aplicação, entre as quais pode-se mencionar: pino-guia, virabrequins, engrenagens, etc. Conforme Barbosa (2018) apud Luz (2016) o aço SAE 1020 apresenta uma resistência a tração de aproximadamente 420 MPa, limite de escoamento de aproximadamente 350 MPa e um módulo de elasticidade de 205 GPa

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção apresenta-se o processo de desenvolvimento da pesquisa. As etapas de todo o processo estão descritas na Fig. 10. Para isso, realizou-se a fabricação de corpos de prova com chapas de aço carbono, os mesmos foram soldados pelo processo GMAW em diferentes posições de soldagem. Em seguida realizaram-se os

ensaios, não destrutivos e destrutivos, coletando dados e finalmente realizando-se a análise dos resultados.

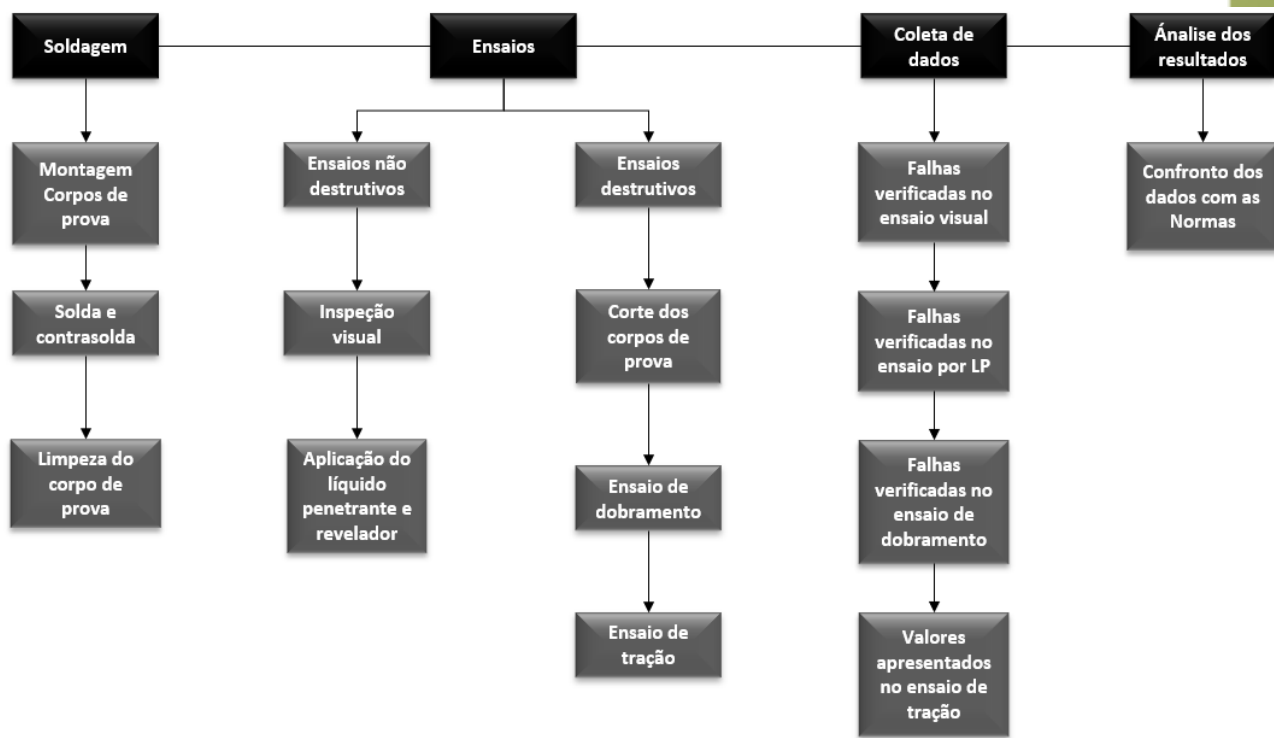
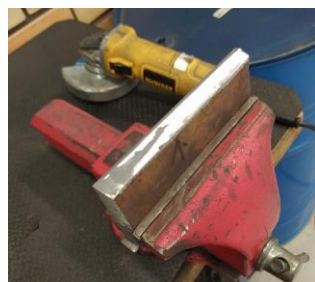


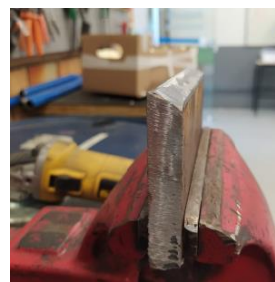
Figura 10. Etapas do processo de realização do trabalho (OS AUTORES).

3.1. Fabricação e preparação dos corpos de prova

Para a elaboração deste trabalho, inicialmente foram cortadas chapas de aço SAE 1020 utilizando uma máquina de plasma, formando as partes a serem soldadas com as dimensões de 12,7mm x 75mm x 150mm. Para montagem dos corpos de prova realizou-se a união de duas partes através do processo de soldagem. As dimensões finais do corpo de prova são 12,7mm x 152,5mm x 150mm. Para a junção das partes, devido a espessura de 12,7mm utilizou-se como parâmetro uma junta de topo em “V”.



(a)



(b)

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

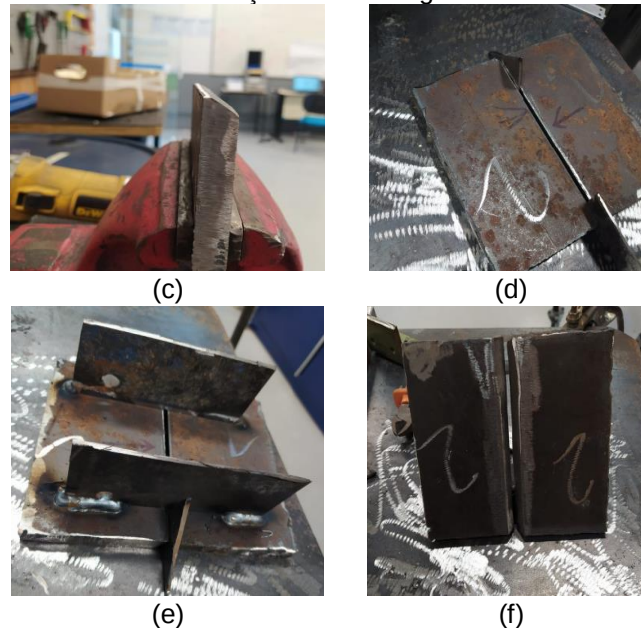


Figura 11. Montagem dos corpos de prova (OS AUTORES).

A Figura 11 ilustra a montagem dos corpos de prova, as extremidades das partes a serem soldadas foram desbastadas com o auxílio de uma esmerilhadeira deixando uma face de raiz de aproximadamente 2mm e um bisel de aproximadamente 30°, conforme apresentado nas Figs. 11 (a), (b) e (c). Com a ajuda de um gabarito as partes biseladas são montadas deixando uma abertura com aproximadamente 2,5mm Fig. 11(d). Para finalizar a montagem dos corpos de prova é necessário colocar travas na parte de traz dos corpos de prova, foram utilizadas chapas do mesmo material e essas travas foram soldadas para que a abertura não sofra nenhum desalinhamento Fig.11 (e). Após isso, para remover as contaminações da superfície a ser soldada, aplicou-se uma escova rotativa de aço com o auxílio de uma esmerilhadeira, deixando os corpos de prova prontos para se iniciar o processo de soldagem Fig. 11 (f).

3.2. Soldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram fixados nas posições preestabelecidas no projeto, com o auxílio de uma bancada.

O arame utilizado foi o ER70S-6 com diâmetro de 0,8 mm, utilizando-se uma mistura de 25% de Dióxido de Carbono em Argônio (Ar/CO₂) como proteção gasosa.

A máquina utilizada para o processo é da marca ESAB, modelo Smashweld 266 X, conforme ilustra a Fig. 12. Esse equipamento permite a utilização de arames com bitola de até 1,0 mm, seu funcionamento é bastante simples e seu painel permite que a tocha seja ligada diretamente na máquina, dispensando o uso de um cabeçote em operações de soldagem em bancadas.



Figura 12. Máquina de solda ESAB modelo Smashweld 266X (ESAB, 2019).

Os parâmetros exatos de corrente e tensão selecionados, não foram coleados uma vez que se utiliza uma máquina de solda que não dispõe de um indicador digital de corrente e tensão e devido a falta de instrumentos adequados de medição de corrente e tensão no local de execução das soldas.

Conforme ESAB (2019), o modelo Smashweld 266X permite a utilização de corrente entre 150A~250A e tensão entre 21,5V~26,5V, dependendo do fator de trabalho, sendo que este relaciona-se com o percentual de tempo de arco aberto em um período de dez minutos. Neste trabalho executaram-se os cordões de solda com um tempo máximo de dois minutos de arco aberto, compreendendo neste caso a faixa de 35% do fator de trabalho, utilizando-se uma tensão entre 24 V ~ 26 V e corrente entre 180 A ~ 200 A, valores estes que foram estimados relacionando-se os parâmetros selecionados na máquina aos dados técnicos do fabricante, ficando dentro dos parâmetros recomendados. Na Fig 13 apresentam-se os dados do fabricante.

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

Dados Técnicos		
Fonte de energia	Smashweld® 266X	
Fonte de energia	RETIFICADOR	
Tensão da rede	220V - 3 Φ / $\pm 10\%$	380V - 3 Φ / $\pm 10\%$
Frequência da rede (Hz)	3~50/60Hz	
Seção do cabo de alimentação (cobre) para comprimento até 5 metros	4x6mm ²	
Seção do cabo	35mm ²	
35% do fator de trabalho	250A / 26,5 V	
60% do fator de trabalho	200A / 24V	
100% do fator de trabalho	150A / 21,5V	

Figura 13. Dados técnicos da máquina de solda ESAB Smashweld 266X (ESAB, 2019).

A Figura 14 apresenta o processo de soldagem passo a passo na posição 3G, o mesmo processo se repete para as demais posições de soldagem, a mudança está no posicionamento do corpo de prova. Posicionou-se o corpo de prova na bancada, aplicando-se então o passe de raiz Fig. 14(a), antes de aplicar o passe de enchimento realiza-se um ensaio visual no passe de raiz e esmerilham-se as partes que apresentam inclusão de escória, para que não ocorram descontinuidades na parte interna da junta soldada. Após essa verificação aplicou-se o passe de enchimento Fig.14 (b), novamente realizou-se um ensaio visual e com o auxílio de uma esmerilhadeira foi feito um guia para facilitar a aplicação do primeiro passe de acabamento e na sequência aplicou-se o segundo passe de acabamento Fig. 14 (c).

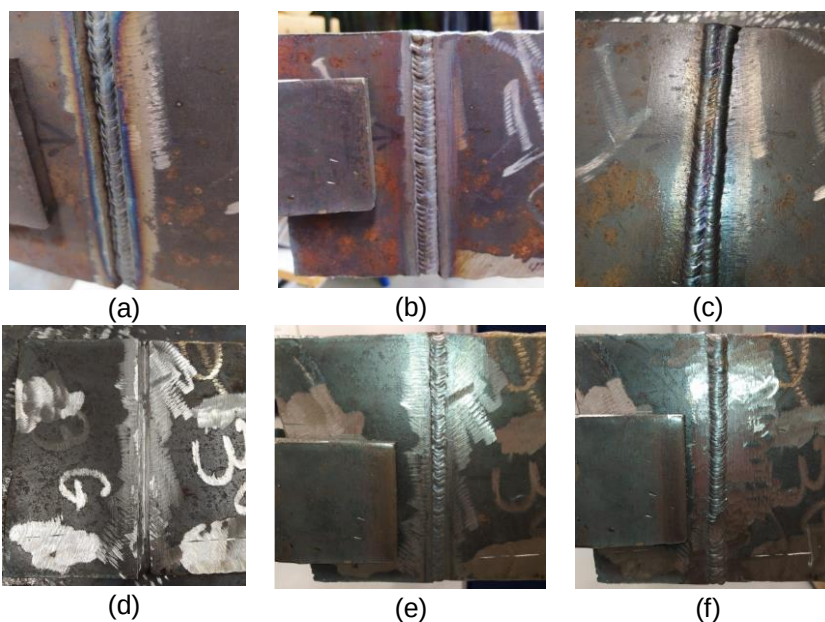


Figura 14. Soldagem na posição 3G (OS AUTORES).

Após finalizada essa etapa, removeram-se os suportes da parte de traz do corpo de prova e utilizando-se um disco de desbaste, abre-se a parte de traz da junta soldada até encontrar a raiz da solda que foi aplicada pela parte frontal. Novamente realiza-se um ensaio visual a fim de detectar qualquer descontinuidade ou inclusão de escória, deixando a região limpa e apta a receber o enchimento Fig. 14(d), aplicou-se o passe de enchimento Fig. 14(e) e por fim o passe de acabamento Fig.14(f). Todas as soldas são executadas por um soldador com experiência de aproximadamente 10 anos no processo GMAW, porém o mesmo já se encontrava afastado da função a aproximadamente 4 anos, não realizando-se nenhum tipo de curso de reciclagem para a execução deste trabalho.

Na Fig. 15 são apresentados os corpos de prova finalizados nas demais posições, posição 1G acabamento Fig. 15(a), posição 1G contra solda Fig. 15(b), posição 2G acabamento Fig. 15(c), posição 2G contra solda Fig. 15(d), posição 4G acabamento Fig. 15(e), posição 4G contra solda Fig. 15(f).

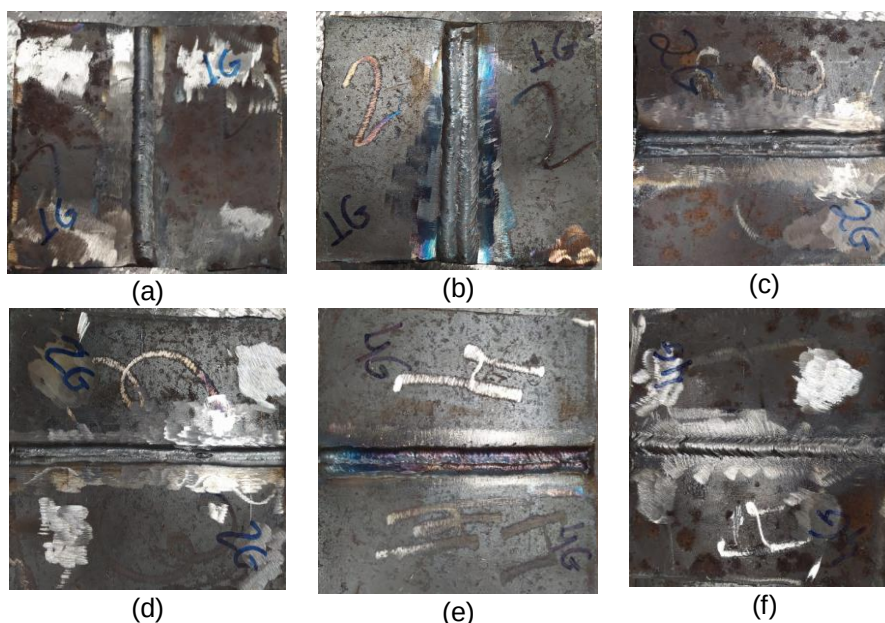


Figura 15. Soldagem nas posições 1G, 2G e 4G (OS AUTORES).

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

3.3. Ensaios

Nesta seção são apresentadas as aplicações dos ensaios não destrutivos e destrutivos que foram realizados em todos os corpos de prova soldados. Para os ensaios de tração e dobramento os corpos de prova foram cortados com jato d'água, os corpos de prova são apresentados na Fig.16. As extremidades dos corpos de prova são descartadas conforme recomenda a Norma ASME IX.



Figura 16. Corpo de prova de dobramento e tração para ensaios destrutivos e zona descartada (OS AUTORES).

3.3.1. Ensaio visual

Para a realização do ensaio visual, primeiro efetua-se uma limpeza prévia dos corpos de prova para em seguida verificar se as juntas soldadas apresentam algum tipo de não conformidade, como por exemplo, inclusão de escória, porosidades, mordedura, respingos, falta de fusão etc. Na Figura 17 (a) e (b) ilustram-se a solda e contra solda, respectivamente, realizadas na posição 4G (posição que apresenta maior dificuldade de execução), pode-se observar que não foram constatadas falhas a olho nu, não foram encontradas não conformidades em nenhuma junta soldada.

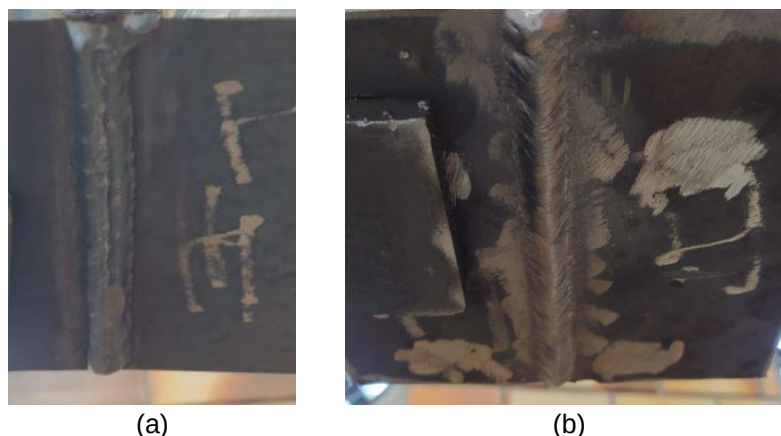


Figura 17. Inspeção visual dos corpos de prova na posição 4G (OS AUTORES).

3.3.2. Ensaio por líquido penetrante

Após o resfriamento de cada corpo de prova, realiza-se uma limpeza da peça com o auxílio de uma escova rotativa. Esse processo é feito com cuidado a fim de evitar aplicação exagerada de força nessa escovação, podendo ocasionar preenchimento superficial de poros, impedindo a entrada do líquido penetrante e mascarando o resultado. Depois de escovada, a superfície é então limpa com a aplicação de um solvente removedor Fig. 18 (a). A partir dessa etapa, utilizam-se as instruções do fabricante do kit (removedor, líquido penetrante e revelador), conforme essas instruções, passados 5 minutos da aplicação do removedor, aplica-se o líquido penetrante Fig. 18 (b). Após 20 min, remove-se o excesso do líquido penetrante e limpa-se novamente a superfície com o removedor Fig. 18 (c). Aguarda-se novamente um período de 5 minutos para evaporação do removedor, aplica-se então o revelador por toda a superfície e aguarda-se um período de no mínimo 20 minutos para realizar a inspeção Fig.18 (d), conforme instruções do fabricante e de acordo com a ABENDI.

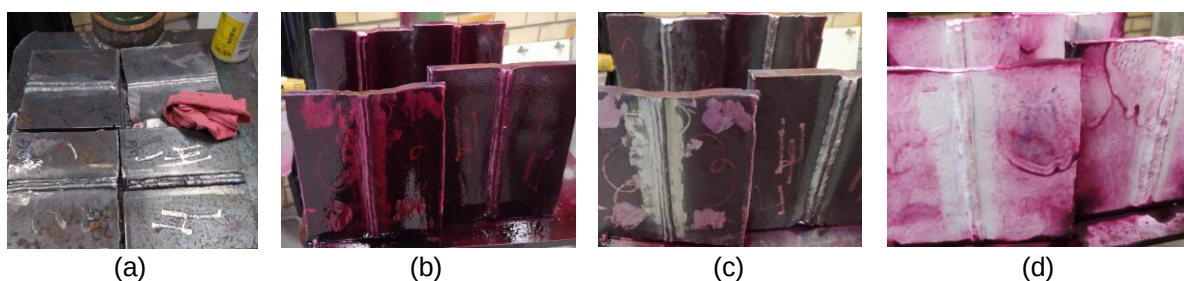


Figura 18. Soldagem nas posições 1G, 2G e 4G (OS AUTORES).

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

3.3.3. Ensaio de dobramento

Os corpos de prova para o ensaio de dobramento são cortados por jato d'água e dimensionados de acordo com as normas ASME IX e ABNT NBR ISO 7438, conforme ilustra a Fig.19.

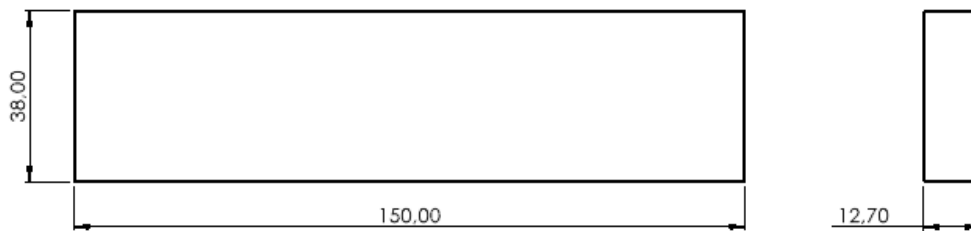


Figura 19. Dimensões do corpo de prova para o ensaio de dobramento (OS AUTORES).

Após fabricados os corpos de prova, todo o reforço de solda deve ser removido, deixando toda a superfície nivelada, o corpo de prova é posicionado sobre os roletes e uma força é aplicada no centro do corpo de prova fazendo com que a raiz da solda seja comprimida e a face da solda tracionada, conforme ilustra a Fig 20.

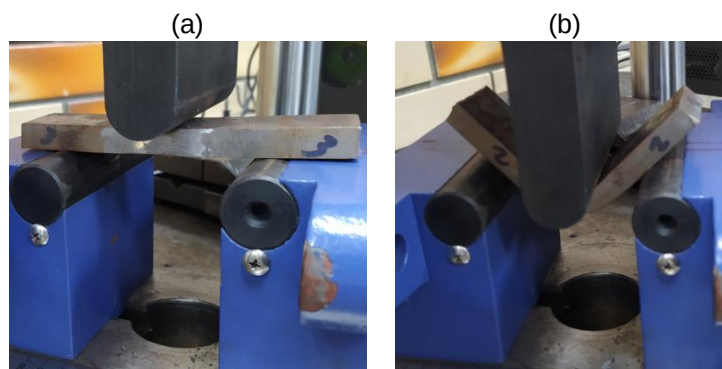


Figura 20. Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de dobramento (OS AUTORES).

Após a realização do ensaio de dobramento, os corpos de prova são retirados de sobre os roletes e são submetidos a uma inspeção visual no intuito de constatar falhas que caracterizem sua reprovação. Para que não ocorram interpretações

incorretas, essa inspeção deve ser realizada em um local bem iluminado e por uma pessoa de boa acuidade visual.

3.3.4. Ensaio de tração

Realizou-se o ensaio de tração conforme norma ASME IX, em uma máquina de ensaio universal da marca Panantec, modelo VERSAT 300, com capacidade máxima de aplicação de força de 300kN. Antes de aplicar o ensaio, medem-se a espessura e a largura da seção reduzida do corpo de prova. Para que o corpo de prova seja aprovado no ensaio de tração é necessário que a ruptura ocorra fora da região soldada e o valor da resistência a tração coletada no ensaio não pode ser menor do que a resistência a tração do material. Todos os corpos de prova foram fabricados com as dimensões apresentadas na Fig. 21, de acordo com o que recomenda a norma ASME IX, o reforço de solda deve ser esmerilhado até que ambas as faces soldadas fiquem paralelas uma a outra.

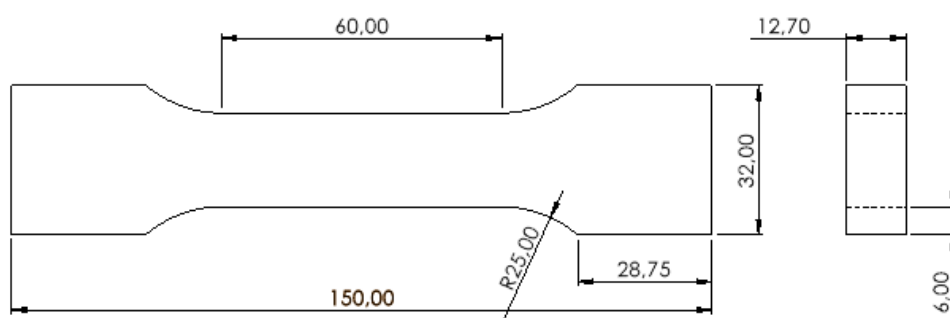


Figura 21. Dimensões do corpo de prova para o ensaio de tração (OS AUTORES).

Na Fig. 22 são apresentadas as imagens do corpo de prova, antes de ser tracionado na máquina de ensaio e após o término do ensaio, respectivamente. Ao longo do ensaio a máquina registra a força que está sendo aplicada e com esses registros plota-se um gráfico de tensão x deformação. O gráfico apresenta informações importantes como alongamento, limite de escoamento e a resistência a tração, que é o principal dado a ser analisado segundo a norma ASME IX.

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

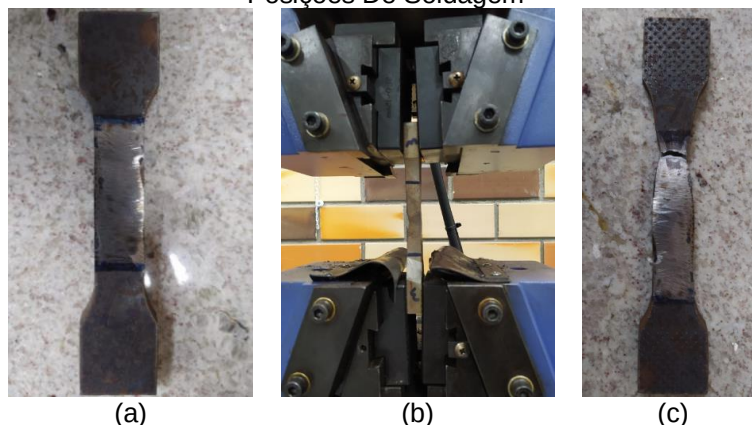


Figura 22. Ensaio de tração: a) corpo de prova antes do ensaio, b) corpo de prova fixo na máquina e, c) corpo de prova após o ensaio de tração (OS AUTORES).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos através da realização dos ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos, comparando-se com os valores exigidos pela norma ASME IX e com outros trabalhos que também fizeram comparativos entre posições de soldagem.

4.1. Ensaio visual e por líquido penetrante

O único corpo de prova reprovado nos ensaios não destrutivos foi o soldado na posição sobre cabeça, sendo que neste apresentou-se uma indicação relevante arredondada no ensaio de líquido penetrante.

Apesar de todos os corpos de prova serem aprovados no ensaio visual, observa-se que no corpo de prova soldado na posição sobre cabeça apresentam-se alguns pontos esteticamente defeituosos, porém esses pontos situam-se nas extremidades do corpo de prova, local que deve ser descartado conforme a norma ASME IX. A Fig. 23 ilustra um comparativo entre o corpo de prova que obteve o melhor resultado geral, Fig. 23 (a) posição 2G e o corpo de prova que obteve o pior resultado geral, inclusive sendo reprovado, Fig. 23 (b) posição 4G.



(a)



(b)

Figura 23. Corpos de prova soldados: (a) posição 2G e, (b) posição 4G (OS AUTORES).

Após a realização do ensaio por líquido penetrante nos corpos de prova de todas as posições, pode-se constatar indicações relevantes apenas na solda realizada na posição 4G sobre cabeça, onde conforme ilustrado pela Fig. 24 apresenta-se uma indicação relevante arredondada com mais que 5mm, localizada no primeiro cordão de solda do acabamento, o que caracteriza a reprovação deste corpo de prova conforme ABENDI (Associação Brasileira de ensaios não destrutivos e inspeção), o destaque se dá devido a quantidade de líquido penetrante remanescente no local mesmo após aguardar-se um período de mais de 30 minutos.



Figura 24. Presença de poro na junta soldada na posição 4G (OS AUTORES).

Os resultados obtidos neste ensaio são similares ao que apresenta o trabalho de Oliveira (2012), onde constatarem-se falhas grandes na posição 4G, porém em seu trabalho também houve reprovações com indicações consideráveis na posição 3G e os melhores resultados foram obtidos na posição 2G. No trabalho de Dihlmann (2016), apresentaram-se indicações apenas no corpo de prova soldado na posição 4G porém o corpo de prova foi considerado aprovado devido as dimensões das indicações.

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

4.2. Ensaio de tração

A Tabela 4 apresenta os valores de força, tensão de escoamento, alongamento e resistência a tração obtidos no ensaio de tração. Os corpos de prova soldados nas posições 1G, 2G e 3G apresentam uma resistência a tração acima de 420 MPa que é a resistência a tração do aço SAE 1020. Apenas um dos corpos de prova, que é soldado na posição 4G, apresenta uma resistência a tração inferior, porém acima de 95% da resistência a tração do metal de base, podendo ser então considerado aprovado conforme ASME IX. Pode-se notar também que a posição 2G apresenta o maior valor de resistência a tração. Todos os corpos de prova são considerados aprovados no ensaio de tração

Tabela 4. Resultados obtidos no ensaio de tração (OS AUTORES).

Corpo de prova	Posição	Força - kN	Resistência a tração - MPa	Tensão de escoamento - MPa	Alongamento %
1	1G	111,8	433,7	275	26
2	1G	110,7	427,3	274	29,5
1	2G	116,5	501,2	275	17
2	2G	109,1	421,1	275	25
1	3G	109,3	430	274	27
2	3G	110,8	422	276	28
1	4G	104,8	413	277	25
2	4G	110,8	430	277	25

Porém, apesar de aprovarem-se todos os corpos de prova tracionados, observa-se que os melhores resultados de resistência a tração obtidos, foram nos ensaios realizados nas posições horizontal (2G) e plana (1G), onde obtiveram-se resistências a tração de 501,2 MPa e 433,7 MPa respectivamente.

Apesar da aprovação dos dois corpos de prova tracionados na posição 4G, percebe-se que um destes apresentou uma resistência a tração de 413 MPa, valor inferior a resistência a tração do aço SAE 1020 que é de 420 MPa. Todavia o mesmo foi aprovado pois a norma ASME IX considera como aceitável uma resistência a tração

inferior a do material, desde que o rompimento ocorra fora da solda e da ZTA e com uma resistência a tração de pelo menos 95% do valor da resistência a tração do material, condições essas que foram perfeitamente atendidas nos ensaios desse corpo de prova, porém que chamam a atenção para essa particularidade.

A Figura 25 apresenta os locais de ruptura dos corpos de prova submetidos ao ensaio de tração, todos rompem fora da junta soldada atendendo ao primeiro requisito da norma ASME IX. Os gráficos referentes aos ensaios de tração estão disponíveis nos apêndices.



Figura 25. Corpos de prova após serem submetidos ao ensaio de tração (OS AUTORES).

No trabalho de Dihlmann (2016), os corpos de prova também são aprovados em todas as posições, destacando-se que a posição 4G não foi a que apresentou o menor valor de resistência a tração como o que apresenta-se neste trabalho, porém conforme Oliveira (2012) o soldador exerce forte influência sobre os resultados, uma vez que diversos parâmetros como o ângulo da posição de soldagem, variações na tensão, na corrente e principalmente a velocidade de soldagem dependem diretamente do operador e são extremamente relevantes para o resultado final dos ensaios.

4.3. Ensaio de dobramento

Novamente o corpo de prova soldado na posição sobre cabeça, apresenta o pior resultado entre os ensaios de dobramento realizados, nessa posição percebe-se que a extremidade do cordão de solda gera uma abertura praticamente ao longo de toda a lateral do cordão de solda. Na Figura 26 apresenta-se um comparativo entre os corpos de prova já submetidos ao ensaio de dobramento, sendo a Fig. 26(a) posição 1G e a Fig. 26(b) posição 4G.

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

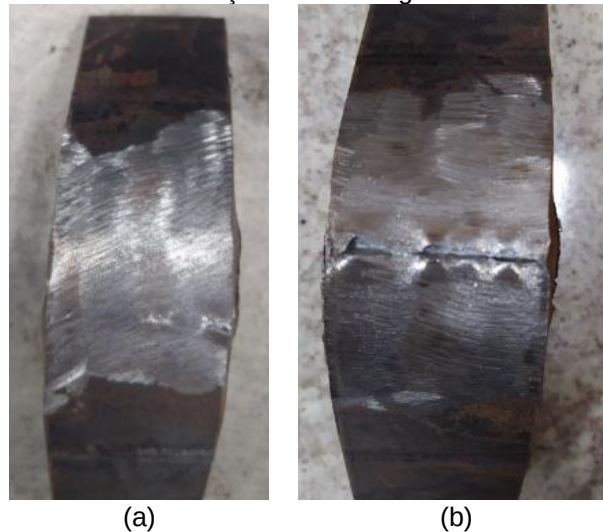


Figura 26. Corpo de prova de dobramento: (a) posição 1G e, (b) posição 4G (OS AUTORES).

Após a realização da inspeção, percebem-se falhas em toda a lateral do cordão de solda das posições 3G e 4G, na posição 2G também constam algumas fissuras, porém menores do que 3 mm e por fim, na posição 1G não foram encontradas fissuras superiores a 3 mm, a não ser na extremidade do corpo de prova.

Dessa forma é possível determinar a aprovação ou reprovação dos corpos de prova, conforme apresentado na Tab. 5.

Tabela 5. Resultados obtidos no ensaio de dobramento (OS AUTORES).

Posição de soldagem	Falhas encontradas	Resultado do ensaio
1G	Ponto de fissura superior a 3 mm na extremidade do corpo de prova.	Aprovado
2G	Pontos de fissuras inferiores a 3 mm.	Aprovado
3G	Rompimento parcial da solda com fissuras superiores a 3 mm.	Reprovado
4G	Rompimento parcial da solda com fissuras superiores a 5 mm.	Reprovado

4.4. Resultados gerais dos ensaios

Após a obtenção dos resultados oriundos da realização de todos os ensaios planejados, é possível classificar os quatro corpos de prova soldados como aprovados ou reprovados, conforme apresenta-se na Tab. 6.

Tabela 6. Avaliação final dos corpos de prova soldados (OS AUTORES).

Posição	Inspeção Visual	Ensaio por Líquido Penetrante	Ensaio de tração	Ensaio de dobramento	Resultado

1G	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
2G	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
3G	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado
4G	Aprovado	Reprovado	Aprovado	Reprovado	Reprovado

Consideram-se as posições 1G e 2G como aprovadas e as posições 3G e 4G como reprovadas, destacando-se a posição 4G como sendo a única a reprovar no ensaio por líquido penetrante, observando-se também neste corpo de prova o pior resultado no ensaio de dobramento.

É importante observar que se analisando os ensaios por grupo, todos os corpos de prova seriam aprovados se os únicos ensaios aplicados fossem a inspeção visual e o ensaio de tração.

Nos resultados obtidos nos trabalhos de Dihlmann (2016), considera-se a posição 1G com os melhores resultados e a posição 4G apresentando os piores resultados, no trabalho de Oliveira (2012) destaca-se a grande influência da experiência do soldador na qualidade final da solda, porém é possível observar em seu trabalho que é realizado nas posições 2G, 3G e 4G, que de modo geral, a posição 2G apresenta os melhores resultados nos testes e a posição 4G apresenta os piores resultados. No trabalho de Silva (2012) que compara apenas as posições plana e sobrecabeça, o autor conclui que a posição plana apresenta os melhores valores de penetração, largura e reforço de solda.

Dessa forma os resultados obtidos neste trabalho estão em conformidade com os demais trabalhos analisados e apontam a grande influência da posição de soldagem na qualidade final da solda, destacando-se o grau de dificuldade na execução da solda na posição sobrecabeça, independentemente do metal de base que está sendo soldado e do processo escolhido para se realizar a solda. Esta dificuldade está relacionada a questões ergonômicas relacionadas ao posicionamento do soldador e a ação da gravidade que dificulta a transferência metálica reduzindo a estabilidade do arco conforme afirma Guimarães (2016).

5. CONCLUSÕES

Através da aplicação dos ensaios destrutivos e não destrutivos realizados nos corpos de prova soldados pelo processo GMAW, pode-se comparar o resultado de

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem
cada teste, com o auxílio dos parâmetros estabelecidos pelas normas utilizadas nesse trabalho.

Por intermédio desses resultados, pode-se constatar que as posições 1G e 2G foram aprovadas nos testes realizados. Em contrapartida tratando-se da posição 4G, constata-se que além da reprovação, nesta posição apresenta-se o pior resultado entre todos os corpos de prova, apesar de que, baseando-se em trabalhos similares já mencionados na seção de revisão bibliográfica e nos ensaios não destrutivos deste trabalho, já esperava-se que nesta posição ocorreria reprovação, observa-se que para o corpo de prova soldado na posição 4G, obteve-se apenas 50% de aprovação nos ensaios, sendo também este, o único corpo de prova a reprovar no ensaio por líquido penetrante, estes resultados evidenciam a influência da posição de soldagem sobre a qualidade da solda.

A reprovação do corpo de prova soldado na posição 3G surpreende pelo fato de ser uma posição de soldagem com grau de dificuldade similar a posição 2G, porém nesse caso vale ressaltar a influência exercida pela experiência do soldador, fato que fica comprovado após análise de outros trabalhos.

Evidencia-se também, a importância de aplicar não apenas os ensaios não destrutivos como também os ensaios destrutivos de tração e dobramento e avaliar ambos os testes para que se possa obter os resultados corretos.

Sendo assim, conclui-se que os objetivos do trabalho foram alcançados com êxito, pois através dos resultados obtidos pode-se apresentar quão fortemente a posição de soldagem interfere na qualidade final da junta soldada. Também pode-se comprovar que é de suma importância, na elaboração de um projeto que necessite da aplicação de solda, que se realize um acompanhamento do processo de soldagem, qualificando os profissionais responsáveis e proporcionando condições favoráveis para a execução das soldas. Dessa forma, é essencial promover a utilização de bancadas em locais espaçosos, utilizando as posições 1G e 2G (plana e horizontal) sempre que possível.

Sugere-se para futuros trabalhos:

- Adicionar diferentes ensaios, como ultrassom, impacto e partícula magnética;

- Aumentar a quantidade de corpos de prova testados, realizando o mesmo processo, porém com mais de um soldador, sendo estes de diferentes níveis de experiência;
- Realizar o mesmo ensaio com diferentes materiais e procedimentos de soldagem, comparando com este trabalho;
- Realizar o mesmo procedimento com diferentes combinações de gás de proteção e metal de adição e comparar os resultados

6. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **ASME section IX: qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators.** IX ed. New York: ASME; 2010.

ANDREUCCI, Ricardo. **Líquidos penetrantes.** Ed. Novembro 2018 São Paulo - SP.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS - ABENDI. **Ensaaios não destrutivos e inspeção.** São Paulo, 2018. Disponível em:
http://www.abendi.org.br/abendi/Upload/file/Certificacao/PR001Rev8_LP.pdf

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 7438:2016. **Materiais metálicos – Ensaio de dobramento.** Rio de Janeiro, 2016. 8 p.

ASKELAND, D. R. **Ciência e Engenharia dos Materiais.** ed: Cengage. São Paulo, 2008.

AVENTA. **Equipamentos para soldagem.** Disponível em: link
<https://aventa.com.br/novidades/posicoes-soldagem>. Acesso em 04 de maio de 2021 às 21h:35min.

BARBOSA, Larissa Moreira. **Análise de concentração de tensão do aço SAE 1020 tratado termicamente.** Monografia. Universidade Federal Rural do Semi-Árido.2018

BULLA, Pedro. **Relatório de Ensaio de tração.** 2018. Disponível em
https://kupdf.net/download/ensaio-de-traao_5bf3f051e2b6f58c30956455_pdf

Chiaverini, Tecnologia Mecânica: **Materiais de Construção Mecânica**, McGraw-Hill, 2.ed, São Paulo, Brasil, pp. 250-258. 1986

DE ANDRADE, Lucas Astrad Lira; DANTAS, Marcello Araújo. **AVALIAÇÃO DE DESCONTINUIDADES SUPERFICIAIS PELO MÉTODO DE LÍQUIDOS PENETRANTES EM AÇO SAE 1020 SOLDADO POR PROCESSO SMAW.** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. III CONAPESC. 2018

DE OLIVEIRA, Helder Silveira Costa. **ELABORAÇÃO DE PROCEDIMENTO DE SOLDAGEM E ANÁLISE DE DESEMPENHO DE SOLDADORES ATENDENDO AS ESPECIFICAÇÕES DA NORMA ASME.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Sergipe.2012

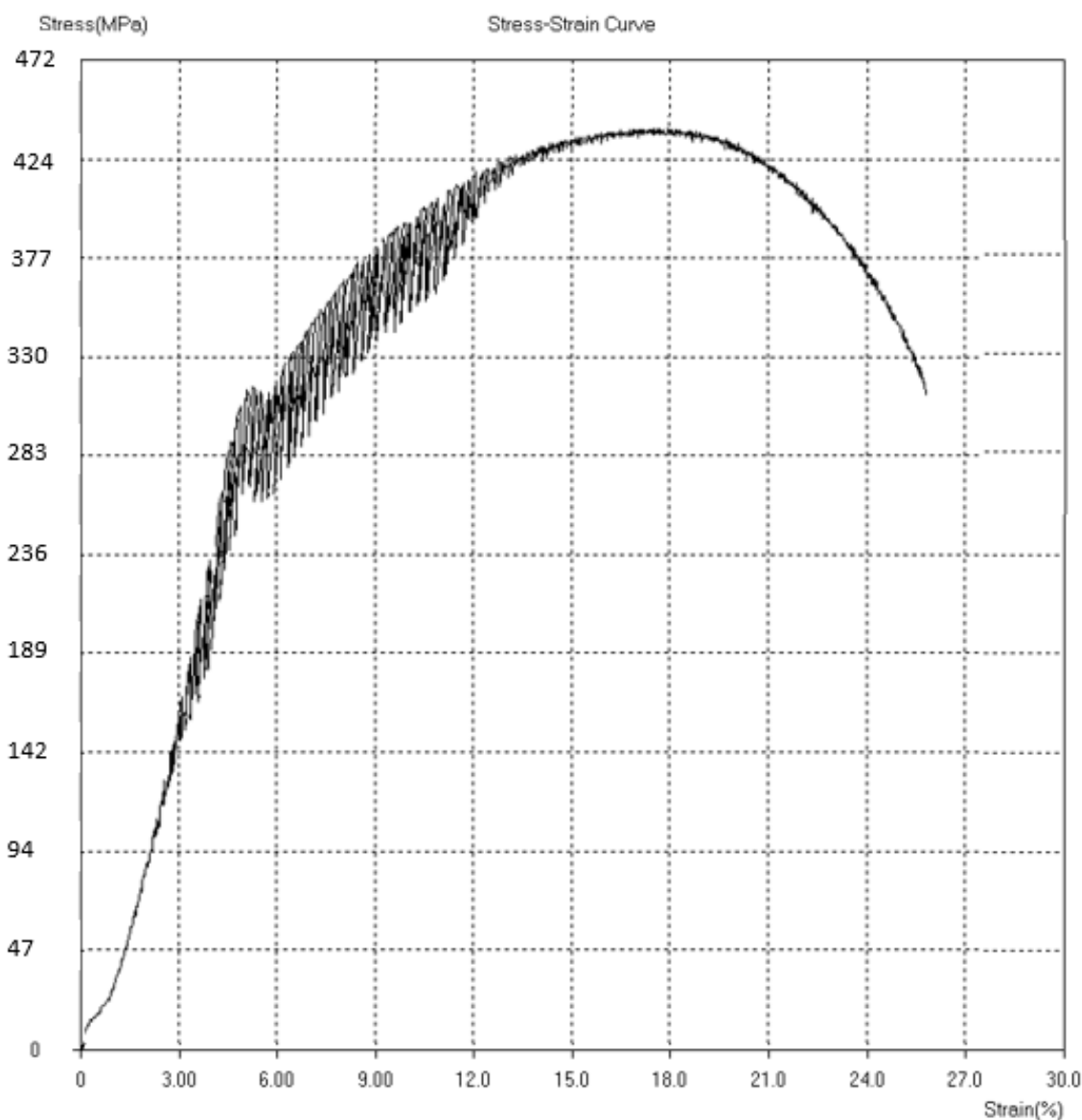
DIHLMANN, Jahn Lisboa. **Avaliação das Propriedades Mecânicas em Juntas Soldadas do Aço ASTM A 36 pelo Processo de Eletrodo Revestido em Diferentes Posições de Soldagem.** Dissertação. Centro Universitario Estadual da Zona Oeste.2016

Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

- ESAB. **Manual do usuário e peças de reposição Smashweld 266X**. São Paulo - SP. Disponível em: https://www.esab.com.br/br/pt/support/documentation/upload/0223505_smashweld-266x_pt_rev05.pdf
- GARCIA, A. Amauri Garcia, Jaime Alvares Spim, Carlos Alexandre dos Santos. **Ensaaios dos Materiais**, 2012.
- GUIMARÃES, Jéssika Batista. **Análise de parâmetros de soldagem pelo processo convencional com arame tubular**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2016
- MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. Ed. da UFMG, 2005.
- MORAIS JÚNIOR, Rui Rosa de. **Estudo do desempenho da soldagem por eletrodo revestido em diferentes posições por meio de análise de variância**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pampa.
- PADILHA, Angelo Fernando. Microestrutura e Propriedades. **São Paulo: Hemus**, 1997.
- SANTOS, Givanildo Alves dos. **Tecnologia dos materiais metálicos : propriedades, estruturas e processos de obtenção**. São Paulo. Recurso online ISBN 9788536520414.2015
- SILVA, Elivelton Luis da; COSTA, Jonathã Da Fonseca; SILVA, Celina Leal Mendes da. MIG pulsado: **Estudo comparativo da variação da Distância Bico pelo Contato Peça sob a geometria da solda na liga AA5052 em duas posições de soldagem**. In: VII CONNEPI-Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação. 2012.
- SILVEIRA, J. L. L. **Anotações de aula da disciplina de soldagem**. 2016. UFRJ, Centro de tecnologia. Disponível em: <http://www.mecanica-ufrj.educacao.ws/utl/b2evolution/media/blogs/joseluis/3-Soldagem-2016-1.pdf>. Acessado em : 05/05/2021.
- WAINER, Emílio; BRANDI, Sérgio Duarte; DE MELLO, Fabio Decourt Homem. **Soldagem: processos e metalurgia**. Editora Blucher, 1992.
- WINK, Paulo Roberto. **Estudo das características dos modos de transferência metálica por soldagem MAG em processos industriais robotizados**. Trabalho de conclusão de curso. Unijuí. 2015

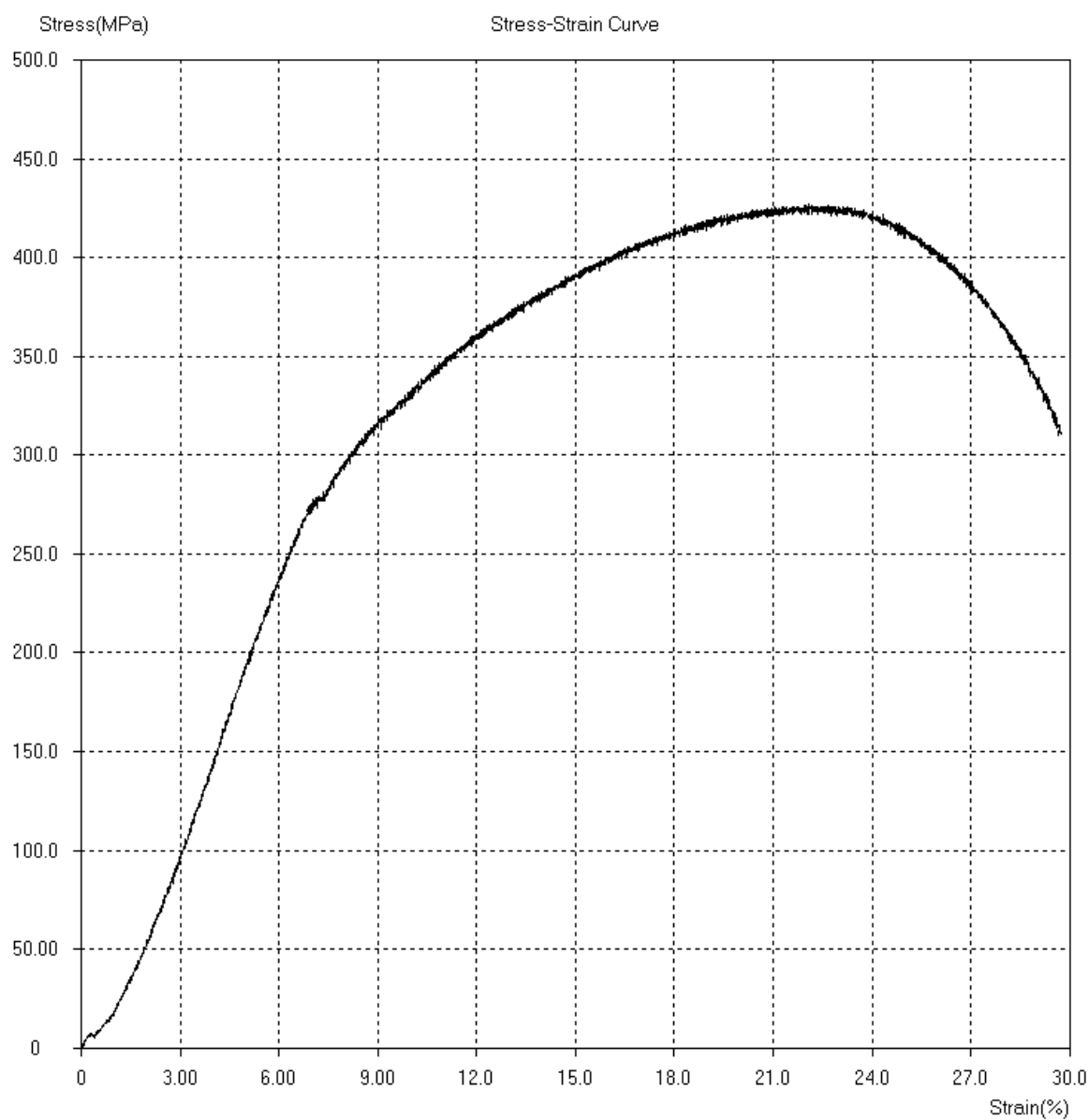
7. APÊNDICE

7.1. Apêndice A - Gráfico de Curva tensão x deformação da posição 1G CP1

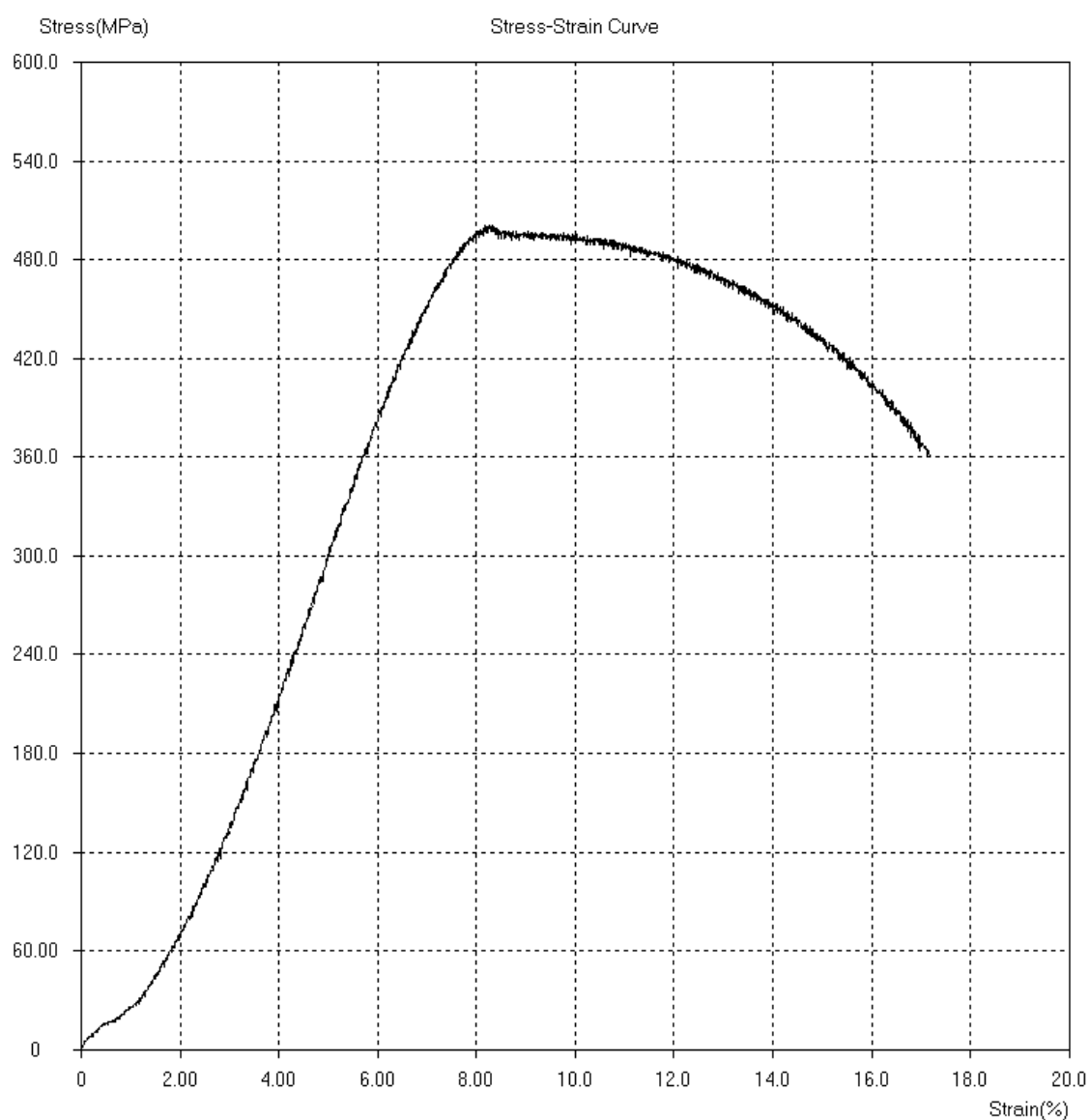


Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

7.2. Apêndice B - Gráfico de Curva tensão x deformação da posição 1G CP2

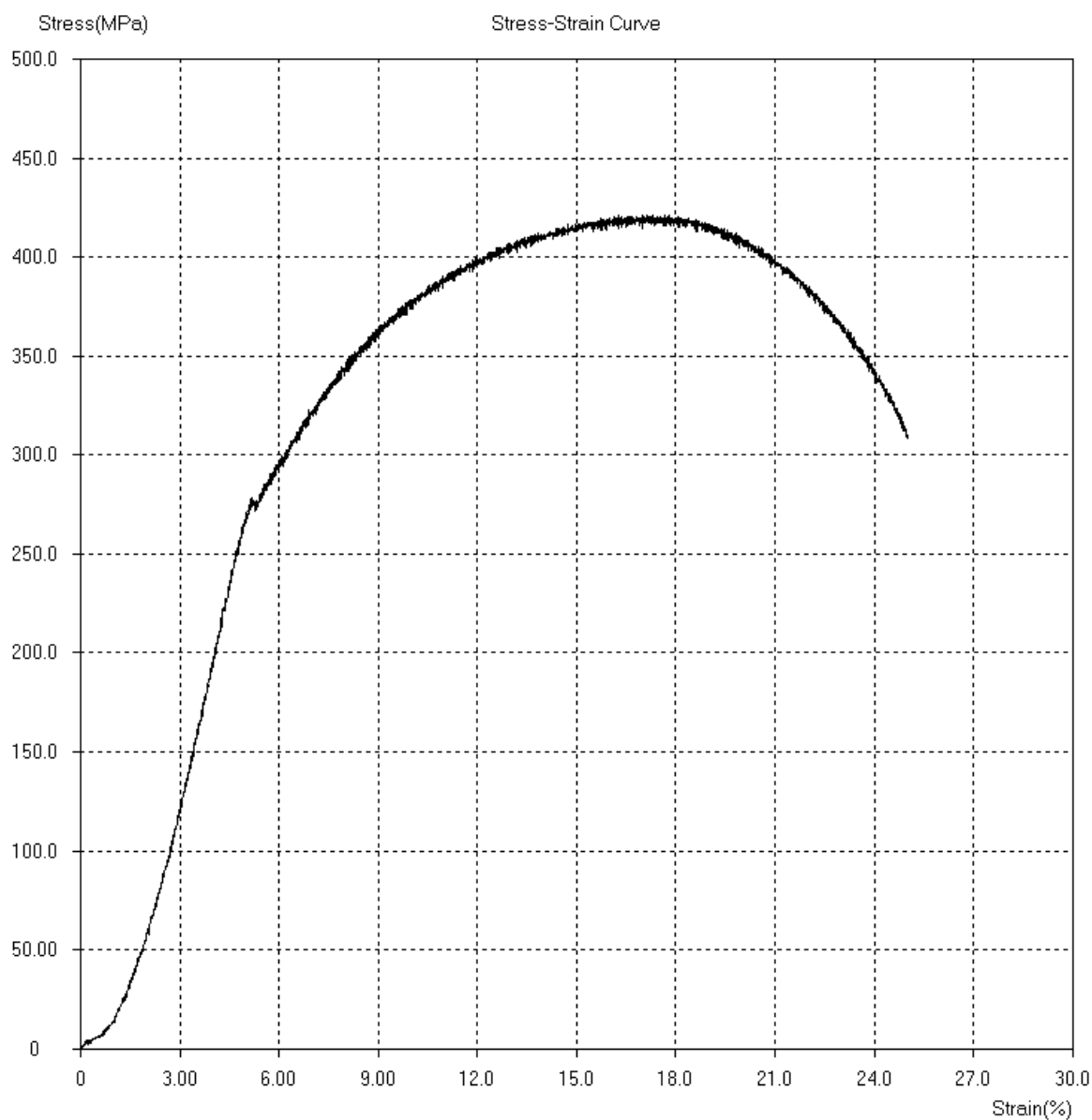


7.3. Apêndice C - Gráfico de Curva tensão x deformação da posição 2G CP1

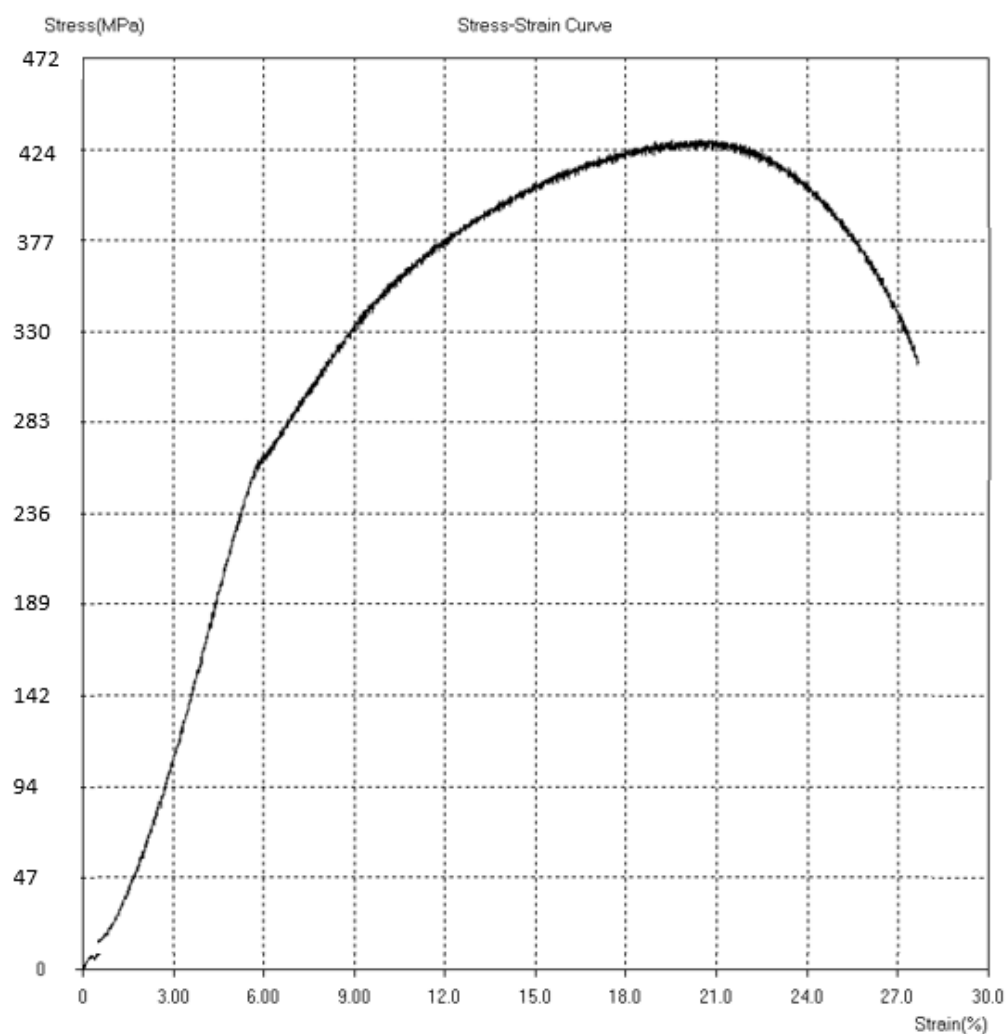


Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

7.4. Apêndice D - Gráfico de Curva tensão x deformação da posição 2G CP2

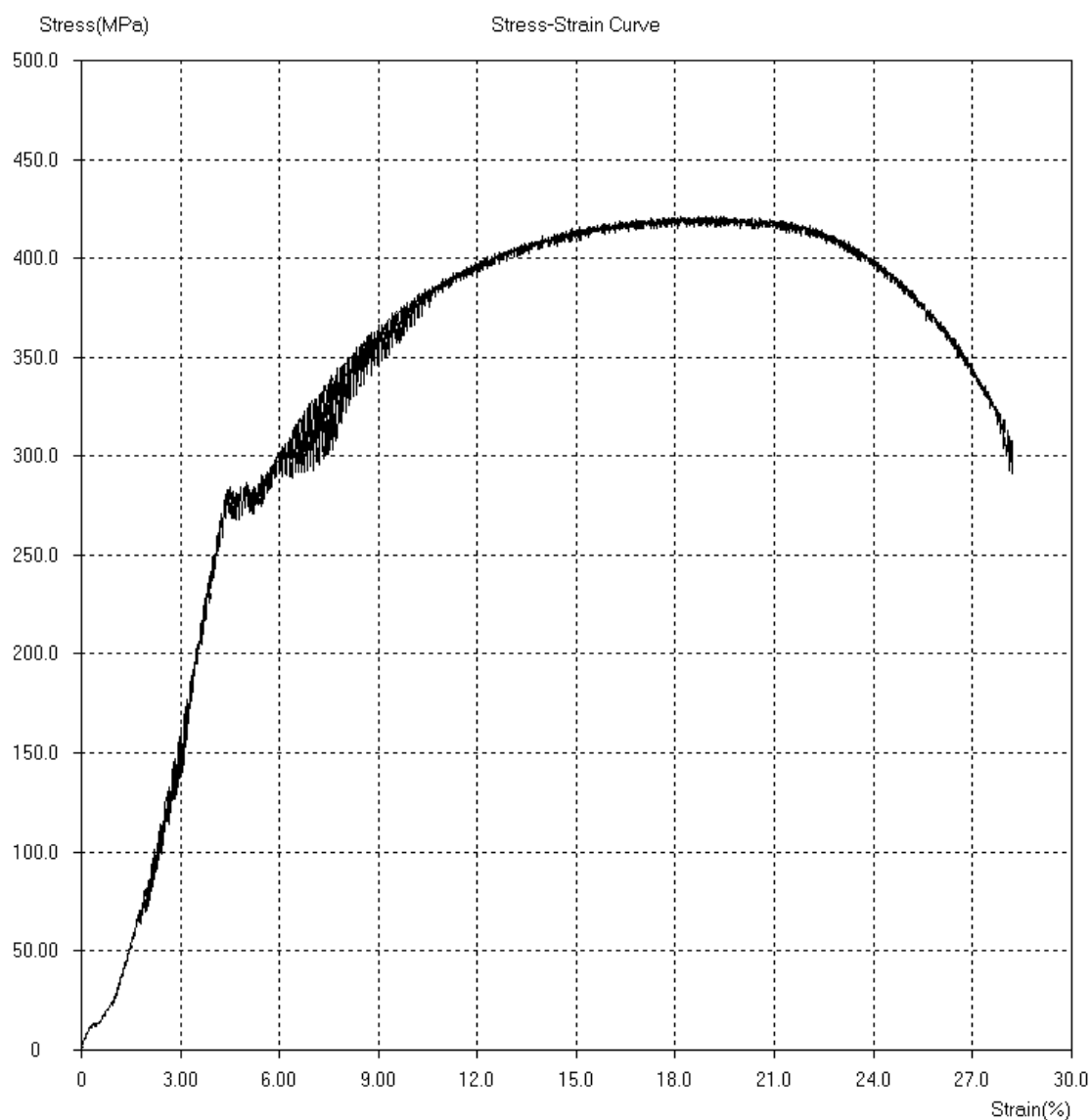


7.5. Apêndice E - Gráfico de Curva tensão x deformação da posição 3G CP1

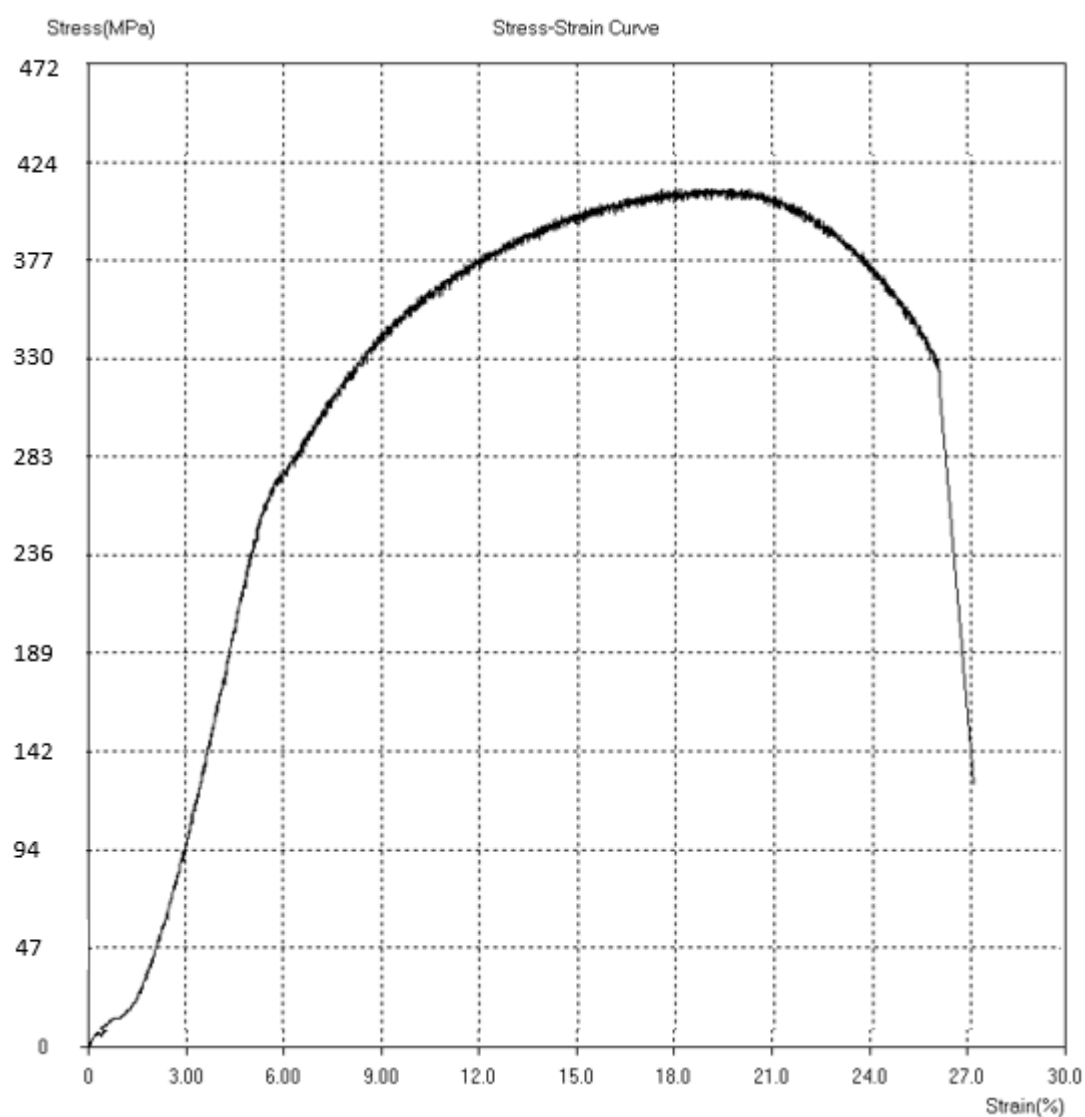


Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

7.6. Apêndice F - Gráfico de Curva tensão x deformação da posição 3G CP2



7.7. Apêndice G - Gráfico de Curva tensão x deformação da posição 4G CP1



Análise Comparativa Da Qualidade Das Soldas Realizadas Pelo Processo Gmaw Nas Principais Posições De Soldagem

7.8. Apêndice H - Gráfico de Curva tensão x deformação da posição 4G CP2

