

## DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS IDEAIS DE SOLDAGEM UTILIZANDO SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA USO EM VASOS DE PRESSÃO

FORTALEZA

2021



#### DADOS DO CASE

#### **Categoria:**

Infraestrutura.

#### **Autores:**

- Wildenbergy Pereira Lucas Nacional Gás.
  Contatos: <u>wildenbergy.lucas@nacionalgas.com.br</u> / (85) 3466.8921
- Leonardo Magalhães Carvalho Nacional Gás.
  Contatos: <u>leonardo.carvalho@nacionalgas.com.br</u>/ (85) 3466.8921
- Paula Silva Marques Nacional Gás.
  Contatos: <u>Paula.marques@nacionalgas.com.br</u> / (85) 3466-8775
- Luiz Felipe Gomes Bezerra Evangelista Nacional Gás.
  Contatos: <u>luiz.felipegbe@nacionalgas.com.br</u> / (85) 3466.8921
- Tácio Leandro Pereira Serafim Nacional Gás.
  Contatos: <u>tacio.serafim@nacionalgas.com.br</u> / (85) 3466-8951
- Helder Maia Torquato Nacional Gás.
  Contatos: <u>helder.maia@nacionalgas.com.br</u> / (85) 3466.8921
- Thiago Alencar Luna Ferreira Nacional Gás.
  Contatos: <u>thiago.alencar@nacionalgas.com.br</u> / (85) 3466.8921

NACIONALGÁS () BRASILGÁS () PARAGÁS ()



#### **RESUMO**

Os vasos de pressão são recipientes destinados a conter um fluido pressurizado, sendo tais dispositivos amplamente utilizados nas indústrias como equipamentos de processos que armazenam temporariamente fluidos. Atualmente é muito utilizado o aço SA 517 Gr. B para fabricação de vasos de pressão destinados a armazenar gás liquefeito de petróleo. Durante a fabricação desses vasos é realizado uma soldagem exploratória para determinar os parâmetros ideais de tensão, corrente e velocidade de soldagem para execução das soldas do vaso, mas esse processo se torna exaustivo e demanda uma quantidade de tempo considerável e, consequentemente, reduz a produtividade, gerando também desperdícios e custos adicionais com os seguintes fatores: mão de obra qualificada para realizar a soldagem, ensaios laboratoriais e matéria prima utilizada nos testes, como metal de base e demais insumos usados para obter tais parâmetros. Logo, o presente estudo tem como objetivo utilizar uma alternativa para a determinação dos parâmetros de soldagem por meio de uma simulação computacional, utilizando o software ANSYS®, para obter as grandezas ideais de tensão, corrente e velocidade de soldagem para aplicação em vasos de pressão, para assim evitar custos desnecessários e improdutividade gerados pelo procedimento atual de obtenção desses parâmetros. Inicialmente foi utilizado o software JMatPro® para obter as curvas de resfriamento, diagrama de fases e suas propriedades. Esses dados foram usados como referência para realizar a simulação numérica por meio do software ANSYS®, após a simulação foram obtidos os parâmetros ideais de soldagem e com base nesses valores foram realizados soldagem a arco submerso em corpos de prova. Logo após, foram conduzidas para ensaios metalográficos e ensaios de microduzera. Por fim, foram efetuados ensaios mecânicos de tração, dobramento e impacto para verificar se os corpos de prova, soldados com os critérios da simulação computacional, atendem aos critérios normativos. De tal maneira que, os corpos de prova foram aprovados nos ensaios mecânicos, validando assim os parâmetros obtidos pela simulação computacional e, como consequência não será necessário realizar as soldagens exploratórias e por sua vez, resultou em redução de custos; manteve as propriedades e qualidade da junta soldada em condições satisfatórias e obteve ganho de tempo no processo de fabricação.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Representação esquemática de solda longitudinais e circunferenciais 11
<b>Figura 2</b> - Auto tanque utilizado para transporte de GLP
Figure 3- Falha em um componente devido ao processo defeituoso de soldagem 14
Figura 4 - Formatos diversos de vasos de pressão 17
Figura 5 - Detalhamento das partes envolvidas no processo de soldagem arco submerso.
Figura 6 - Caminhos a serem percorridos para obtenção de soluções exata e aproximada.
Figura 7- Comportamento térmico transiente de uma junta soldada a) 23 segundos de
soldagem b) 203 segundos de soldagem 21
Figura 8 - Evolução da tensão com o aumento da temperatura
Figura 9 - Preparação corpo de prova para ensaio de tração 22
Figura 10 – Tipos de ensaio de dobramento
Figura 11- Preparação do corpo de prova para dobramento 23
Figura 12 - Dimensões do corpo de prova para ensaio
Figura 13- Fonte para arco submerso PowerWave ACDC 1000 SD Lincoln Electric,
trator Cruiser Lincoln Electric e mesa aço
Figura 14 - a) microscópio ótico da ZEISS AxionCam MRc5 e b) microscópio eletrônico
de varredura microscópio FEI QUANTA 350 27
Figura 15- Microdurômetro LM-110AT Leco
Figura 16- Forno de câmara utilizado nos tratamentos térmicos
Figura 17- Fluxograma esquemático das etapas do método utilizado 28
Figura 18- a) Diagrama calor específico x temperatura e b) Diagrama condutividade
térmica x temperatura para o aço SA 517 Gr.B 34
Figura 19- a) Diagrama massa específica x temperatura e b) Diagrama CCT do aço SA
517 Gr. B
Figura 20- Desenho bidimensional do perfil da junta soldada
Figura 21- a) Secção transversal da junta soldada b) Modelo tridimensional da junta
soldada
Figura 22 - a) Formação da malha na secção transversal da junta soldada b) Malha
gerada em torno do desenho tridimensional da junta
Figura 23- Perfil térmico da junta soldada gerado pela simulação a) amostra 1 b) amostra
2 c) amostra 3 d) amostra 4 e) amostra 5 f) amostra 6 g) amostra 7 h) amostra 8 i) amostra
9 j) amostra 10 k) amostra 11 l) amostra 12 m) amostra 13 n) amostra 14 o) amostra 39
Figura 24 - a) Primeiro cordão b) segundo cordão de solda soldado com parâmetros
definidos pela simulação computacional sem defeitos 42
Figura 25- Etapas do tratamento térmico



<b>Figura 26</b> - Macrografia da junta soldada
<b>Figura 28</b> - Microestrutura 1° cordão a) ZAC GF ampliação de 200x e b) ZAC GF ampliação de 500x c) ZAC GG ampliação de 200x d) ZAC GG ampliação de 500x e) zona fundida ampliação de 200x e f) zona fundida ampliação de 500x. Ataque Nital 2%.
<b>Figura 29-</b> Microestrutura 2° cordão a) ZAC GF ampliação de 200x e b) ZAC GF ampliação de 500x c) ZAC GG ampliação de 200x d) ZAC GG ampliação de 500x e) zona fundida ampliação de 200x e f) zona fundida ampliação de 500x. Ataque Nital 2%.
<b>Figura 30</b> - Microestrutura do metal de base imagens do MEV a) ampliação de 1000x e b) ampliação de 2000x Ataque Nital 2%
<b>Figura 31</b> - Microestrutura imagem do MEV a) ZAC GF ampliação de 1000x e b) ZAC GF ampliação de 2000x c) ZAC GG ampliação de 1000x d) ZAC GG ampliação de 1000x e) zona fundida ampliação de 1000x e f) zona fundida ampliação de 2000x. Ataque Nital 2%
Figura 32- Microdureza junta soldada com os parâmetros obtidos na simulação computacional
Figura 33 - Corpos de prova submetidos ao ensaio de tração a) antes do ensaio b) após o ensaio
Figura 34- Corpos de prova submetidos ao ensaio de dobramento.50Figura 35 - Corpo de prova com descontinuidade.51Figura 36 - Corpos de prova do Charpy a) antes do ensaio b) após o ensaio.52



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química do metal base.	25
Tabela 2 - Composição química do metal de adição.	25
Tabela 3- Propriedades mecânicas do metal de adição.	26
Tabela 4 – Combinação de parâmetros de soldagem	30
Tabela 5- Parâmetros obtidos na simulação.	31
Tabela 6- Dimensões geométricas da junta soldada.	40
Tabela 7- Parâmetros obtidos pela simulação computacional	41
Tabela 8 - Parâmetros utilizados nas juntas atuais.	41
Tabela 9 - Dimensões da penetração, reforço e largura obtidos na soldagem	44
Tabela 10 - Valores obtidos do ensaio de tração	50
Tabela 11- Valores obtidos do ensaio de dobramento	51
Tabela 12– Resultados obtidos após o ensaio de Charpy.	51



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	. 9
1.1	Histórico da Nacional Gás Distribuidora Ltda	. 9
1.2	Cenário	10
2.	PROBLEMAS ENCONTRADOS	13
3.	Objetivos	15
3.1	Objetivo geral	15
3.2	Objetivos específicos	15
4.	Revisão bibliográfica	16
4.5	Introdução a soldagem	16
4.6	Vasos de pressão	16
4.7	Soldagem a arco submerso	17
4.8	Elementos finitos	18
4.9	Ensaios mecânicos	22
4.9.	1 Ensaio de tração	22
4.9.	2 Ensaio de dobramento guiado	23
4.9.	3 Ensaio de impacto (Charpy)	24
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	25
5.1	Materiais	25
5.1.	1 Metal base	25
5.1.	2 Metal de adição	25
5.2	Equipamentos	26
5.2.	1 Soldagens	26
5.2.	2 Simulações	26
5.2.	3 Microestruturas	27
5.2.	4 Microdureza	27
5.2.	5 Tratamento térmico das juntas soldadas	28



5.3 Mé	todos	28
5.3.1	Revisão bibliográfica	29
5.3.2	Simulação estrutural (JMatPro ®)	29
5.3.3	Determinação das combinações dos parâmetros de soldagem	30
5.3.4	Simulação da execução da junta soldada ANSYS®	30
5.3.5	Soldagem utilizando os parâmetros determinados pela simulação	31
5.3.6	Caracterização microestrutural	31
5.3.7	Análises de microdureza	32
5.3.8	Ensaios mecânicos	32
6. Res	ultados	33
6.5 Sim	ulação no software JMatPro®	33
6.6 Sim	ulação computacional utilizando o software ANSYS®	35
6.7 Gei	ação da malha da junta soldada	36
6.8 Sim	ulação do processo de soldagem da junta	38
6.9 Sol	dagem definitiva	41
6.10Sol	dagem utilizando os parâmetros da simulação computacional	41
6.11Tra	tamento térmico	42
6.12Jun	ta soldada com as condições previstas pela simulação computacional	43
6.13Ana simulaç	álise de microdureza da junta soldada com as condições obtidas j ão computacional	<b>pela</b> 48
6.14Ana parâme	álise dos resultados dos ensaios realizados nas amostras soldadas con tros obtidos pela simulação	<b>1 os</b> 49
7. Cor	ıclusão	52
referênc	ias	54



## 1. INTRODUÇÃO

#### 1.1 Histórico da Nacional Gás Distribuidora Ltda

A história da Nacional Gás se inicia em 1951, com um jovem empreendedor chamado Edson Queiroz que percebeu mudanças que estavam ocorrendo no mercado mundial na época e trouxe as mesmas para realidade dos cearenses. No início houve uma grande resistência da população devido ao receio do GLP, no entanto o jovem Edson conseguiu convencer a população de Fortaleza a deixar os antigos fogões a lenha pelos novos fogões que utilizavam o novo produto. No início a empresa teve enormes dificuldades, pois além do grande preconceito do povo nordestino com o produto, ainda era difícil a obtenção de GLP, pois o produto era importado do México e Estados Unidos e ainda existia a dificuldade de distribuição do mesmo. Para conseguir superar esses obstáculos foi preciso que o jovem empresário passasse a vender fogões, além de ter que ir pessoalmente nas casas dos clientes para fazer a instalação e informar sobre as vantagens dos novos produtos. Ainda em 1951, Edson Queiroz visualizou um empreendimento de futuro e adquiriu a distribuidora de gás Mazine, que imporatava gás dos Estados Unidos para a distribuição local.

Em 1953, após uma ação arrojada, Edson Queiroz obteve a autorização para carregar seus botijões de gás na Refinaria Landulpho Alves, localizada no município de São Francisco de Conde, no estado da Bahia. A partir desta concessão, a Edson Queiroz & Cia., que tinha 289 clientes e comercializava 2,9 toneladas por mês, a partir dessa ação foram reduzidos os custos para obtenção do GLP, conseguindo progressos significativos na distribuição. Por outro lado, o mercado continuava crescendo com a disruptiva do preconceito dos consumidores em Fortaleza. Foi quando a empresa iniciou um crescimento e ampliou para outros estados do Brasil, além deste fato, também se estendeu para outras atividades econômicas.



A Nacional Gás chega aos dias atuais com foco na modernidade, com destaque nacional na comercialização de envasados domiciliar e crescendo cada vez mais no setor granel, graças ao reconhecimento e preferência dos seus parceiros de negócios, clientes e consumidores.

Atuando no armazenamento, envase e distribuição de GLP, está presente em quase todo o território nacional. Recentemente, com a aquisição dos ativos da empresa Liquigás, a Nacional Gás criou a NGC, marca de transição para receber as novas filiais até a total integração com as demais unidades da empresa. O investimento consolida a liderança em consumo de GLP na região Nordeste e fortalece a presença no Sul, Sudeste e Centro Oeste.

#### 1.2 Cenário

A maioria dos vasos de pressão são fabricados a partir de chapas de aço ligadas entre si por processos de soldagem. Durante a construção de vasos de pressão é utilizado várias chapas calandradas unidas individualmente por soldas longitudinais e, em seguida é empregado a solda circunferencial para unir os anéis adjacentes. De tal maneira que, as soldas longitudinais entre duas chapas consecutivas devem estar espaçadas entre si, conforme pode ser visto na figura 1. Além de que, para os tampos cônicos também é utilizado chapas calandras com as soldas em posição longitudinal, enquanto para os tampos elíticos e torisféricos, dependendo do tamanho do diâmetro, é necessário que sejam fabricados de duas ou três chapas soldadas justapostas, com orientação secante ou contendo calota central e contendo vários gomos radiais. Durante a confecção desses vasos de pressão, o material mais utilizado é o aço-carbono sendo considerado material de uso geral. (TELLES, 1996)





Figura 1- Representação esquemática de solda longitudinais e circunferenciais.

Fonte: (TELLES,1996)

De tal modo que, os processos de soldagem são amplamente empregados para a fabricação de vasos de pressão, tendo em vista esse fato é necessário realizar ajustes no equipamento de solda de forma a utilizar corretamente as grandezas tensão, corrente e velocidade de soldagem, para obter os seguintes parâmetros resultantes ao fim do processo: penetração, reforço e largura de solda. A obtenção correta desses parâmetros resultantes possui o intuito de garantir a qualidade do equipamento e segurança aos indivíduos. Logo, é de extrema importância determinação desses valores dos parâmetros resultantes, porém esses parâmetros são determinados por meio de testes em corpos de prova, fazendo assim com que ocorra desperdiço de recursos como matéria-prima e tempo. Os vasos de pressão são empregados no armazenamento e transporte do GLP figura 2, e tais equipamentos representam um alto custo inicial para as distribuidoras de GLP. Boa parte do custo agregado ao vaso de pressão está ligado ao processo de soldagem, onde esse processo necessita dos insumos como metal de adição, energia,



fluxos, discos de corte, discos de desbaste e outros para ser executado. Com isso qualquer retrabalho representa um alto custo na fase de testes e fabricação.



Figura 2- Auto tanque utilizado para transporte de GLP.

A Nacional Gás está sempre atenta para possíveis causas de insegurança em seus terminais, e utiliza de tecnologias avançadas e profissionais extremamente capacitados para prever possíveis sinistros que possam ocorrer. Diversos acidentes com vasos de pressão ocorreram ao longo da história, e muitos ligados a falha na soldagem dos equipamentos. Desta forma, o processo de soldagem deve garantir que os vasos de pressão estejam aptos a funcionar e dar segurança operacional. Com isso os parâmetros de soldagem devem ser muito bem definidos e testados, que sejam evitados os acidentes.

Fonte: Elaborado pelo autor.



#### 2. PROBLEMAS ENCONTRADOS

A aplicação de soldagem a arco submerso na construção de vasos de pressão, requer a determinação de uma faixa de valores apropriados de tensão, corrente e velocidade do processo, de modo que esses parâmetros são obtidos por meio de exaustivas soldagens exploratórias, implicando assim nos seguintes problemas para obtenção desses parâmetros:

- Requer muito de tempo para determinar os parâmetros iniciais: Como ocorrem diversas tentativas e análises para obter o parâmetro ideal de soldagem para posterior execução nos vasos de pressão, grande parte do tempo para construção dos vasos de pressão é vinculada a essa atividade, implicando assim baixa produtividade do processo;
- Alto custo com metal de base e insumos: Para realizar soldagens exploratórias são necessários metal de base; metal de adição; energia elétrica e equipamentos, gerando um alto custo;
- Elevado custo com a contratação de mão de obra e serviço qualificado: Para execução dos testes e revisão dos parâmetros por meio de ensaios laboratoriais, faz necessário contratação com serviços e mão de obra com alto grau de especialização e possui alto valor para execução da soldagem e ensaios;
- Maior controle na microestrutura e propriedades do aço: Com o controle da energia de soldagem e velocidades de resfriamento, obtém-se uma microestrutura desejada e propriedades mecânicas satisfatórias. Com isso, garante-se a segurança operacional do vaso de pressão.

Os parâmetros utilizados influenciam diretamente na microestrutura da junta soldada, pois durante o processo pode alterar de forma considerável a zona termicamente afetada e, consequentemente, comprometer as propriedades mecânicas do material do cordão de solda e reduzir a resistência da junta, impactando assim nas condições de segurança operacional do vaso. Logo, torna-se útil a utilização de um modelo matemático para determinar a combinação entre os parâmetros de tensão, corrente e velocidade de



soldagem para cada aplicação em casos práticos, evitando assim os todos empecilhos. citados anteriormente. A figura 3 demonstra a quebra de um equipamento devido a falha no processo de soldagem.





Fonte: Elaborado pelo autor.



#### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo geral**

Propor o desenvolvimento de parâmetros de soldagem a serem empregados na fabricação de vasos de pressão com o intuito de reduzir a quantidade de soldagem experimentais e, consequentemente, obter uma otimização do tempo, reduzir custos e garantir a qualidade da soldagem.

#### **3.2 Objetivos específicos**

• Adquirir conhecimento sobre o processo de fabricação de vasos de pressão e definir as características referentes a junta soldada utilizada durante o processo de soldagem de vasos de pressão;

• Obter, por meio do software JMatPro®, as curvas de resfriamento, diagrama de fases, gráficos de tensão de escoamento, tensão de ruptura, condutividade térmica, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson; definir os metais base, adição e fluxo;

• Realizar simulações computacionais utilizando o software ANSYS® para gerar os ciclos e as variações de temperatura com o tempo; determinar parâmetros de soldagem satisfatórios para realizar durante o processo de soldagem experimental;

• Obter uma combinação dos parâmetros de soldagem para o estudo de caso abordado por meio do software ANSYS®;

• Realizar o processo de soldagem utilizando os parâmetros determinados pela simulação computacional, além de avaliar as propriedades mecânicas de microdureza;

• Realizar ensaios mecânicos de tração, dobramento e impacto para validar as propriedades mecânicas das amostras soldadas com os parâmetros obtidos pela simulação computacional;



#### 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 4.5 Introdução a soldagem

Soldagem é um processo de união de peças metálicas, utilizado desde a fabricação de peças simples como portões metálicos até aplicações complexas como a união de peças metalurgicamente incompatíveis através da energia liberada por uma explosão controlada. Os processos de soldagem são amplamente utilizados nas indústrias metalmecânica, química, petrolífera nuclear e eletrônica. Os métodos de união de peças podem ser divididos em duas categorias baseadas na ação de forças macroscópicas e forças microscópicas. A união baseada na ação de forças macroscópicas consiste em utilizar um elemento de fixação como um parafuso ou rebite para realizar a união dos corpos e a resistência da junta será equivalente a resistência a cisalhamento do elemento de fixação, enquanto que a união baseada na ação de forças microscópicas consiste na formação de ligações químicas, especificamente as ligações metálicas entre as peças. Como exemplo desses métodos temos a soldagem e a brasagem. (VILLANI; MODENESI; BRACARENSE, 2016).

#### 4.6 Vasos de pressão

Os vasos de pressão são recipientes estanques destinados a armazenar fluidos pressurizados, a pressão no interior do tanque pode ser maior ou menor que a pressão atmosférica. O fluido é confinado na forma liquefeita, uma vez que nesse estado as moléculas estão mais próximas umas das outras, e com isso é possível armazenar uma quantidade maior de GLP quando se comparado com o estado gasoso para um mesmo volume de ocupação, mas para isso é necessário submeter o fluido de trabalho a um determinado valor de pressão de trabalho para compactar as moléculas.

Tais dispositivos são amplamente utilizados em diversas aplicações na indústria e podem ser classificados em vasos de pressão sujeitos a chama e vasos de pressão não sujeitos a chama, como o próprio nome indica, a classificação se refere a presença de fogo



durante o processo. Os vasos de pressão também podem ser classificados com relação ao seu formato, conforme pode ser visualizado na figura 4.



Figura 4 - Formatos diversos de vasos de pressão.

Fonte: (TELLES,1996)

#### 4.7 Soldagem a arco submerso

O processo de união entre os metais ocorre por meio da fusão destes através de um arco elétrico que é gerado entre o eletrodo e a peça de trabalho. O cordão de solda e a ponta do arame são cobertos por um material granular, de modo que não há arco visível e nem respingos. Esse tipo de soldagem produz poucos fumos e resulta em cordões com acabamento uniforme e uma transição uniforme entre o metal de solda e o metal de base. Há limitação com relação a soldagem nas posições plana e horizontal. O detalhamento das partes que envolvem o processo de soldagem pode ser visto na figura 5.







Fonte: ESAB (2004)

#### 4.8 Elementos finitos

Os modelos analíticos resultam em uma solução exata, ou seja, a solução é obtida para um número infinito de pontos, o desenvolvimento desses modelos é trabalhoso e requer um conhecimento matemático aprofundando, além de que para obter essas soluções é necessário realizar uma idealização do objeto de análise, de modo que a aplicação dessas equações se torna limitada devido as simplificações adotadas, enquanto o método dos elementos finitos permite uma aplicação em estruturas complexas e resulta em uma solução aproximada, mas com um valor de precisão significativo uma vez que a solução é obtida para um número finito de pontos. O esquema de caminhos a serem percorridos por ambos os métodos pode ser visualizado na figura 6.







Existem muitos métodos e ferramentas de design diferentes que podem ser usados para encontrar rapidamente soluções de engenharia em uma gama de problemas, mas atualmente um método utilizado e eficiente é a modelagem numérica. A matemática discreta permite resolver problemas da mais diversa natureza e, mais importante, obter um valor exato para as quantidades que são de interesse. Desta forma aplicando a modelagem numérica à simulação computacional, surgiram alguns softwares que otimizam e viabilizam soluções na engenharia. Então tal simulação trouxe benefícios como redução de custo com projetos protótipos; minimizar o risco do produto na fase inicial de desenvolvimentos; controle de variáveis na simulação da soldagem através de simples operações computacionais e otimização do tempo de implantação do projeto. No campo muito complexo de simulação de soldagem e tratamentos térmicos, são necessárias metodologias para acompanhar a severa demanda de confiabilidade do setor e otimização do tempo. Segundo Silva (2020) de forma geral, os processos de soldagem por fusão englobam o acoplamento de três principais físicas distintas, que o ocorrem simultaneamente e que exercem influência mútua entre as mesmas e são elas:

• O fenômeno térmico é o de maior importância, uma vez que ele é o responsável pela fusão do material que forma a junta. Além disso, o comportamento térmico provoca a transformação de fases microestruturas assim como gera um campo de deformações térmicas nos componentes soldados;

• O fenômeno microestrutural se caracteriza pela ocorrência de transformação de fase, provocada pelo tratamento térmico localizado gerado pela fonte de calor de

Fonte: ALVES FILHO (2018)



soldagem. A presença de uma distribuição de fases microestruturais diferente da original provoca alterações nos comportamentos térmico e mecânico do material, além de causar deformações plásticas localizadas;

• O fenômeno mecânico se mostra como a principal consequência do processo de soldagem, sendo afetado pelos demais, embora ele também exerça influência reduzida sobre os mesmos. O campo de deformações provocado pelos fenômenos térmicos e microestrutural é responsável pela presença de tensões residuais na junta, normalmente com tensões residuais trativas podendo comprometer a integridade do componente em operação, caso elas sejam desconsideradas no projeto. Então devido à complexidade do processo de soldagem uma abordagem de modelagem matemática é aplicada. O ANSYS® é um software de elementos finitos muito utilizado nos mais diversos problemas de engenharia inclusive na soldagem. Um modelo de elementos finitos pode ser desenvolvido para prever a propagação térmica da junta soldada, onde a distribuição térmica serve como entrada para a análise estrutural da junta soldada e com isso identificar a geometria da junta, ciclo térmico, velocidade de resfriamento e suas consequente implicações. A Figura 7 a) demonstra o comportamento térmico transiente de uma junta soldada em 23 segundos, sendo possível observar o início da propagação de calor advindo de uma fonte e consequentemente o gradiente térmico. Na Figura 7 b) o comportamento térmico transiente da junta soldada está em 203 segundos, com um maior avanço da propagação de calor e gradiente térmico. Se as temperaturas do gradiente térmico, fusão e de transformação de fase do material forem relacionadas, é possível obter o estado físico e a microestrutura.





Figura 7- Comportamento térmico transiente de uma junta soldada a) 23 segundos de soldagem b) 203 segundos de soldagem.

Fonte: VETTURAZZI (2020)

Outro software de simulação muito utilizado é o JMatPro®, capaz de calcular uma grande variedade de propriedades de materiais de ligas metálicas utilizadas pela indústria. Com a utilização desse software pode ser verificado o equilíbrio de fases estáveis e metaestáveis; propriedades e comportamento na solidificação; propriedades mecânicas; 46 propriedades físicas e termofísicas e transformações de fase. No JMatPro® são introduzidas as informações das composições químicas do metal base e de adição e obtém-se as curvas de resfriamento; diagrama de fases e algumas outras propriedades dos materiais. A figura 8 demonstra o gráfico gerado pelo JMatPro® relacionando à evolução da resistência com o aumento da temperatura, do aço SA 517 Gr B com composição química (% wt) 97,9213 Fe - 0,17 C - 0,48 Cr - 0,87 Mn - 0,15 Mo - 0,34 Si - 0,048 V -0,016 Ti -0,0017 B e 0,003 S.



Figura 8 - Evolução da tensão com o aumento da temperatura.

Fonte: Elaborada pelo autor.



Assim, com os resultados colhidos poderão ser iniciadas as soldagens experimentais, das quais pretende-se neste trabalho obter uma faixa de operação com condições adequadas para a soldagem aço em estudo. Com a simulação é possível obter condições muito próximas da realidade, desde que inserido os dados corretos e assim é importante realizar uma análise previa das informações e entender como deverão ser aplicadas.

#### 4.9 Ensaios mecânicos

#### 4.9.1 Ensaio de tração

Para realização do ensaio de tração no aço SA 517 Gr. B, o código ASME fornece as condições necessárias para realizar o ensaio, como as dimensões do corpo de prova, critérios para aprovação e tolerância. A figura 9 demonstra a preparação do corpo de prova submetido ao ensaio.





Onde:

T = espessura da junta soldada excluindo o reforço;

W = largura da amostra 3/4 in. (aproximadamente 19 mm);

x = espessura da junta soldada incluindo o reforço;

Fonte: ASME (2017)



y = espessura da amostra.

#### 4.9.2 Ensaio de dobramento guiado

Segundo Zampieri (2014), o ensaio de dobramento guiado é uma variação do ensaio de flexão em três pontos, uma vez que o corpo de prova com solda é dobrado pelo cutelo até um determinado valor de ângulo. Na figura 10 é possível verificar os tipos mais comuns de ensaio de dobramento.





Para o aço em estudo, o código ASME especifica as condições obrigatórias para realização do ensaio de dobramento, a figura 11 é possível visualizar a preparação dos corpos de prova.





Fonte: ASME (2017)



#### 4.9.3 Ensaio de impacto (Charpy)

Para verificar a resiliência de um material, o ensaio de impacto (Charpy) é o mais utilizado, de modo que para o aço em estudo o ensaio passa a ser obrigatório. Segundo Souza (1982), é promovido um entalhe no corpo de prova para localizar a sua ruptura e gerar um estado triaxial de tensões no momento em que o corpo é submetido a um esforço de flexão por impacto produzido por um martelo pendular, nesse instante a energia absorvida pelo corpo, para deformar e romper, é medida pela diferença entre a altura atingida pelo martelo antes e após o impacto, multiplicada pelo peso do martelo.

A norma ASTM E23 é bastante utilizada para realização de ensaios de impacto, de modo que as dimensões do corpo de prova para o ensaio podem ser visualizadas na figura 12.



Figura 12 - Dimensões do corpo de prova para ensaio.



### 5. MATERIAIS E MÉTODOS

#### **5.1 Materiais**

#### 5.1.1 Metal base

Foram utilizados chapas de aço baixo liga SA 517 Gr. B com 9,50 mm de espessura. As informações referentes a composição química podem ser visualizadas na tabela 1, conforme norma. Devido as propriedades mecânicas de tensão de ruptura e de escoamento, esse aço se torna bastante utilizado na construção de vasos de pressão.

Tabela 1- Composição química do metal base.

ASME	С	Mn	P(máx)	S(máx)	Si	Cr	Mo	В	V	Ti
517 Gr. B	0,15-0,21	0,7-1,0	0,035	0,035	0,15035	0,40-0,65	0,15-0,25	0,0005-0,005	0,03-0,08	0,01-0,04

Fonte: ASME (2017)

#### 5.1.2 Metal de adição

Para preenchimento das juntas foi utilizado o arame tubular r F11A8- ECF6-F6 (conforme classificação ASME SFA-5.23) com diâmetro de 2,40 mm de espessura em bobinas de 25 kg. As informações referentes a composição química do metal de adição podem ser visualizadas na tabela 2 abaixo.

Tabela 2 - Composição química do metal de adição.								
ASME	С	Mn	Si	Cr	Ni	Cu		
F11A8-ECF6-F6	0,06	1,00	0,40	0,55	0,65	0,70		

Fonte: ESAB (2020)

Para a proteção da poça de fusão foi utilizado o fluxo OK Flux 10.61 B fabricado pela ESAB. O fluxo é aglomerado neutro de elevada basicidade e destinado para soldagem de ações de média e alta resistência em mono ou multipasses. Sendo recomendado para soldagem em conjunto com arames de baixa liga.

A junção do arame tubular F11A8-ECF6-F6 com o fluxo OK Flux 10.61 B é empregado para a combinação de aços que requerem uma alta resistência mecânica e



tenacidade. As propriedades mecânicas do metal de adição podem ser visualizadas na tabela 3.

Descrição	Valor
Tensão de ruptura (Mpa)	821
Tensão de escoamento (Mpa)	758
Alongamento (%)	19
Energia absolvida - Charpy à -73 °C (J)	71

#### **5.2 Equipamentos**

#### 5.2.1 Soldagens

As soldagens foram realizadas na bancada visualizada na figura 13 composta por uma fonte para arco submerso PowerWave ACDC 1000 SD Lincoln Electric, trator Cruiser Lincoln Electric e mesa aço para suporte e fixação da junta.

Figura 13- Fonte para arco submerso PowerWave ACDC 1000 SD Lincoln Electric, trator Cruiser Lincoln Electric e mesa aço.



Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 5.2.2 Simulações

As simulações do processo de soldagem foram realizadas no computador desktop Dell, processador Intel Core i9, HD de 4 TB e memória de 4 GB, onde está instalado software ANSYS®.



#### 5.2.3 Microestruturas

A visualização das microestruturas presentes na junta soldada deu-se por meio da utilização de um microscópio ótico da ZEISS AxionCam MRc5 de um microscópio eletrônico de varredura microscópio FEI QUANTA 350 visualizados e na figura 14 a) e b) respectivamente.

Figura 14 - a) microscópio ótico da ZEISS AxionCam MRc5 e b) microscópio eletrônico de varredura microscópio FEI QUANTA 350.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.2.4 Microdureza

As impressões de microdureza foram realizadas com o microdurômetro LM-110AT Leco visto na figura 15, o equipamento realiza deslocamento automático do penetrador, as medidas das diagonais e o cálculo da microdureza. A carga aplicada foi de 100 gf durante 15 ms, com espaçamento de 0,5 mm entre as impressões.



Figura 15- Microdurômetro LM-110AT Leco.

Fonte: Elaborado pelo autor.



#### 5.2.5 Tratamento térmico das juntas soldadas

Para a realização dos tratamentos térmicos para alívio de tensões foi utilizado um forno de câmara TB 9612 JUNG com controlador de tempo, temperatura de aquecimento, resfriamento e patamar, conforme pode ser visto na figura 16.



Figura 16- Forno de câmara utilizado nos tratamentos térmicos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 5.3 Métodos





Fonte: Elaborado pelo autor.



#### 5.3.1 Revisão bibliográfica

Tomando como base o estudo de processos de soldagem, foram utilizadas as seguintes literaturas: Soldagem: Fundamentos e Tecnologia – Paulo Villani e Elementos Finitos – A base da tecnologia CAE – Avelino Alves, de modo que a primeira aborda os fundamentos, equipamentos, consumíveis e técnicas operatórias do processo de soldagem a arco submerso, enquanto a segunda literatura aborda sobre os princípios de funcionamento de softwares que utilizam elementos finitos como base. Também serão pesquisados em artigos científicos publicados em revistas qualificadas na área do assunto em questão de forma a investigar a comprovação ou explanação de teorias sobre o assunto.

#### 5.3.2 Simulação estrutural (JMatPro ®)

O software JMatPro ® foi utilizado para realizar a simulação estrutural que teve como o objetivo de obter informações relacionadas as transformações microestruturais e previsão de propriedades mecânicas, físicas e químicas do metal de solda e da ZAC. Para gerar a simulação do processo de soldagem é necessário fornecer a composição química do material trabalhado. De modo que foi gerado as seguintes informações:

- Diagrama CCT;
- Diagrama TTT;
- Propriedades e comportamento na solidificação;
- Diagrama de transformações de fase;
- Evolução do calor específico em relação a temperatura;
- Evolução da tensão de escoamento em relação a temperatura;
- Evolução condutividade térmica em relação a temperatura;
- Evolução da massa específica em relação a temperatura;



#### 5.3.3 Determinação das combinações dos parâmetros de soldagem

Baseado em literaturas especificadas como artigos científicos, referenciais normativos e outros, foram criadas combinações das variáveis tensão, corrente e velocidade de soldagem para execução de soldagens exploratórias. Literaturas como a ASME II, VIII Div. 01 e IX; documentos da Engineering Simulation and Scientific Software e dos autores Paulo José Modenesi, John Cheney Lippold e recente estudo sobre simulação computacional de Lucas W, foram fundamentais para realização desse trabalho, conforme pode ser visto na tabela 4.

		-	-	-
Amostra	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Energia (kJ/cm)
1	475	27	35,0	21,99
2	475	27	45,0	17,10
3	475	35	35,0	28,50
4	475	35	45,0	22,17
5	525	27	35,0	24,30
6	525	27	45,0	18,90
7	525	35	35,0	31,50
8	525	35	45,0	24,50
9	458	31	40,0	21,30
10	542	31	40,0	25,20
11	500	24,3	40.0	18,23
12	500	37,7	40,0	28,28
13	500	31	31,6	29,44
14	500	31	48.4	19,21
15	500	31	40,0	23,25
16	505	32,7	40.0	24,77

Tabela 4 – Combinação de parâmetros de soldagem

Fonte: LUCAS (2020)

#### 5.3.4 Simulação da execução da junta soldada ANSYS®

Para realizar a simulação é necessário antes gerar um modelo CAD do objeto de análise. A simulação tem o objetivo de criar uma malha (mesh) e dimensionar uma fonte de calor. De modo que, com base nas dimensões das seções transversais dos corpos de prova, utilizados na soldagem exploratória, foi elaborado o desenho da junta soldada. Em



seguida, os desenhos tridimensionais foram inseridos no software ANSYS® para a realização da simulação.

Após a inserção do perfil da junta e a criação da malha, foram inseridas as informações obtidas pelo software JMatPro® para realizar a simulação. Combinou-se os parâmetros corrente, tensão e velocidade de soldagem, em seguida foi levando em consideração que a composição do material se mantém constante durante o processo e que não há pré-aquecimento. Com a simulação foi obtido o gradiente e ciclos térmicos, além de dimensões como penetração, largura, reforço, ZAC e zona fundida. A simulação forneceu combinações de parâmetros com seus respectivos resultados, de modo que é possível selecionar a melhor condição para a necessidade do estudo.

#### 5.3.5 Soldagem utilizando os parâmetros determinados pela simulação

A melhor condição de soldagem para o presente estudo foi obtida por meio da simulação computacional. Os valores dos parâmetros de soldagem podem ser visualizados na tabela 5 abaixo.

<b>Tabela 5</b> - Parametros oblidos na simulação.							
Corrente	Tensão	Velocidade de	Energia				
(A)	(V)	Soldagem (cm/min)	(kJ/cm)				
500	31	33,0	28,18				

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por meio desses valores de parâmetros será realizado a soldagem definitiva e, em seguida, os corpos de prova serão coletados para realização da macroscopia, microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e ensaio de microdureza.

#### 5.3.6 Caracterização microestrutural

O método utilizado para determinar a microestrutura foi divido nos seguintes passos: avaliação macroscópica, análise de microscopia ótica e varredura. Inicialmente foram cortadas as amostras com seções transversais possuindo as dimensões de 30 x 25 x 9,5 mm, sendo duas de cada junta ambas soldadas com os parâmetros definitivos,



lixadas até a lixa de granulometria de 1200 e polidas utilizando pasta diamantada. Em seguida, as amostras foram imersas em Nital de concentração de 2% durante 15 segundos. Por fim, as amostras foram fotografadas e realizadas as medições de penetração, reforço e largura dos cordões. As amostras foram geradas com um desnível máximo de 0,02 mm entre as faces da mesma, para não causar interferências durante o ensaio de microdureza.

#### 5.3.7 Análises de microdureza

O ensaio de microdureza produz uma impressão microscópica na superfície do material, utilizando uma carga menor que 10 kgf, por meio de um penetrador de diamante. O valor da carga varia até limite máximo de 10 kgf, de modo que a superfície do corpo de prova também pode ser plana. Com base no penetrador usado, existem dois tipos de ensaio de microduzera: Vickers e Knoop (SOUZA, 2000). Foi realizado uma análise de microdureza Vickers ASTM E384 utilizando um microdurometro, as medições foram realizadas com carga de 100 gf nas seguintes zonas: metal de base, ZAC e zona fundida, de modo a distância entre cada ponto foi de 500 µm de distância, criando assim um perfil de microdureza. A microscopia ótica ou eletrônica de varredura confirma as informações referentes as microestruturas presentes por meio da relação com a microdureza.

#### 5.3.8 Ensaios mecânicos

Para validar a soldagem do aço SA 517 Gr. B a norma ASME Seção VIII Div.1 e IX exige que sejam realizados os seguintes ensaios mecânicos: tração, dobramento e impacto. Logo, foram confeccionados corpos de prova após as etapas de soldagem e tratamento térmico. O ensaio de tração foi realizado com duas amostras e o critério de aceitação foi o valor mínimo de 795 Mpa de limite de resistência, o ensaio de dobramento consistiu na utilização de quatro corpos de prova sendo dois corpos de prova para o dobramento face e outros dois corpos de prova para dobramento raiz, conforme estabecelido pelo código ASME. Para o ensaio de impacto foram ensaiadas seis amostras com as seguintes dimensões 55 mm x 10 mm x 7,5 mm, sendo três dessas amostras com



entalhe no centro da solda a temperatura 0 °C e três amostras com entalhe ZAC a temperatura de 0 °C.

#### 6. **RESULTADOS**

#### 6.5 Simulação no software JMatPro®

Utilizando o software JMatPro® levantou-se o gráfico que corresponde ao calor específico do metal base em função da temperatura, considerando o intervalo de temperatura de solidificação das ligas. Pela análise da figura 18 a) é possível visualizar que, existe um aumento do Cp com elevação da temperatura, que a 25 °C é 0,450 J/(g\*K)e a 710 °C é 0,981 J/(g\*K). Em seguida, a temperatura de 720 °C o Cp chega a 2,20 J/(g\*K) devido a mudança da microestrutura com início da formação dos grãos austenítico. Após a temperatura a 720 °C o calor específico continua próximo a estabilidade, porém ao chegar à temperatura de 1.478 ° C até a temperatura de 1.512 °C ocorrem grandes oscilações no Cp que pode ser explicado pela mudança da fase do material de sólido para líquido. Para condutividade térmica retirado do JMatPro® do mesmo metal base, observou com comportamento diferente em determinadas temperaturas. Pela avaliação da figura 18 b), foi verificado que com o aumento da temperatura a condutividade térmica reduz de forma acentuada, que a 25 °C é 47,10 W/(m\*K) e a 833 °C é 26,80 W/(m\*K), esse fato pode ser explicado pelo aumento do espalhamento das vibrações da rede com o aumento da temperatura. Em seguida da temperatura de 833 °C até a temperatura de 1.478 °C, ocorre um aumento acentuado da condutividade térmica devido a mudança da microestrutura com início da formação e crescimento dos grãos austenítico, onde na faixa de temperatura informada logo anteriormente a condutividade térmica varia de 26,80 W/(m\*K) à 34,38 W/(m\*K). Após a temperatura a 1.478 °C até a 1.512 °C, ocorre redução da condutividade térmica que pode ser explicado pela mudança da fase do material de sólido para líquido.





**Figura 18**- a) Diagrama calor específico x temperatura e b) Diagrama condutividade térmica x temperatura para o aço SA 517 Gr.B.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Outra propriedade obtida foi a massa específica em relação a temperatura. Ao analisar a figura 19 a) é possível verificar que com o aumento da temperatura a massa especifica diminui, que a 25 °C é 7,83 g/cm<sup>3</sup> e a 717 °C é 7,59 g/cm<sup>3</sup>, essa redução decorre do calor recebido pelo material que mesmo em seu estado sólido e estrutura CCC sofreu com o afastamento dos átomos. Em seguida da temperatura de 717 °C até a temperatura de 833 °C, a massa especifica fica próximo da estabilidade devido ao início da formação dos grãos austenítico e transição da estrutura CCC para CFC, onde a massa especifica da estrutura CFC é menor em comparação a estrutura CCC. Após a temperatura a 833 °C até a 1.470 °C ocorrem redução da massa específica, pois acontece o maior surgimento de grãos austenitícos e consequentemente estrutura CFC. Da temperatura de 1.478 °C à 1.512 °C C existe grandes oscilações na massa específica que pode ser explicado pela mudança da fase do material de sólido para líquido.

Segundo Modenesi (2012), a velocidade de resfriamento é importante na determinação da microestrutura em materiais como os aços estruturais comuns, que podem sofrer transformações de fase durante o resfriamento. Em uma dada temperatura, a velocidade de resfriamento é dada pela inclinação da curva de ciclo térmico nesta temperatura. A análise do diagrama CCT obtidos no JMatPro®, verificou-se as microestruturas presentes área de transformação de fase e as velocidades de resfriamento. No diagrama CCT (Figura 19 b) no intervalo entre as curvas de resfriamento 0,01 C°/s à



0,1 C°/s observou-se a presença de ferrita, perlita e austenita; no intervalo entre as curvas de resfriamento 0,1 C°/s à 1 C°/s observou-se a presença de ferrita, perlita, austenita e bainita; 1 C°/s à 10 C°/s observou-se a presença de austenita, bainita e martensita e no; no intervalo entre as curvas de resfriamento 10 C°/s à 100 C°/s observou-se a presença de bainita e martensita. Após a análise do diagrama, das curvas de resfriamento, definiu-se o intervalo macro entre as curvas de resfriamento 1 C°/s à 100 C°/s como sendo padrão para esse estudo, pois possui principalmente as microestruturas bainitíca que alta resistência mecânica que compatível com a necessidade da aplicação da junta soldada e ferrita para em conjunto com a bainita equilibrar a dureza da junta. Com essa primeira definição foi possível firmar o intervalo específico de velocidade de resfriamento entre 3,57 °C/s e 12,12 °C/s, para obter maior precisão no estudo.





Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 6.6 Simulação computacional utilizando o software ANSYS®

Para realizar a simulação computacional foi utilizado o ANSYS®, onde essa ferramenta permitiu simular o comportamento térmico da junta soldada e relacionar com as dimensões da zona fundida. O software é muito utilizado na engenharia em diversas aplicações, de modo que essa ferramenta utiliza o conceito de elementos finitos durante as simulações.



#### 6.7 Geração da malha da junta soldada

Com as informações referentes as dimensões geométricas do corpo de prova, foi realizado, com o auxílio do software AUTO CAD ®, um desenho bidimensional da junta soldada, conforme pode ser visualizado na figura 20.

Figura 20- Desenho bidimensional do perfil da junta soldada.





Segundo o Engineering Simulation and Scientific Software - ESSS (2020) para o bom funcionamento do projeto é necessário realizar o tratamento do modelo CAD antes de realizar a simulação, uma vez que a preparação do modelo tem a finalidade de gerar uma malha, de modo que essa discretização será utilizada pelo software para resolver o equacionamento e gerar os resultados. Para isso, foi utilizado o software o ANSYS SPACECLAIM® para transformar o desenho bidimensional em um modelo tridimensional, conforme pode ser visualizado na figura 21.



Figura 21- a) Secção transversal da junta soldada b) Modelo tridimensional da junta soldada.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Antes de realizar a simulação é necessário que a malha esteja livre de imperfeições, distorções ou deformações, pois para obter resultados precisos é importante que a malha esteja livre desses elementos. A criação da malha foi elaborada no software ANSYS MESHING®, os elementos da malha possuem formato prismático e guadrangular, pois tais geometrias se ajustam ao longo da peça evitando regiões de abaulamento. Nesta etapa foram realizados alguns ajustes na malha para remover essas imperfeições que poderiam prejudicar a formação da malha, foram realizados também arredondamentos em algumas regiões para evitar um maior tempo de processamento durante a simulação. A malha gerada pode ser visualizada na figura 22.





Fonte: Elaborados pelo autor.



#### 6.8 Simulação do processo de soldagem da junta

Para realizar a simulação foram utilizados os ANSYS FLUENT® e ANSYS CFD®, para simular é necessário um modelo de elementos finitos para determinar a propagação térmica da junta durante o processo de soldagem, de modo que a distribuição térmica serviu como entrada para a análise estrutural da junta soldada e, com isso obter o ciclo térmico, identificar a geometria da junta e velocidade de resfriamento. A partir da definição da malha foi definido uma fonte de calor volumétrica com formato de cone tridimensional, em seguida foram inseridos os seguintes dados das propriedades do aço SA Gr. B: condutividade térmica, calor específico e massa específica, e por fim foram realizadas as simulações. Durante a simulação não foi considerado o pré-aquecimento, de modo que a temperatura inicial possui o mesmo valor da temperatura ambiente. Em relação aos parâmetros de soldagem usados na simulação foram considerados os valores que estão na tabela 4, tais valores foram obtidos por meio de um estudo realizado pela seguinte dissertação: Soldagem do aço SA 517 Gr. B para aplicações em vasos de pressão sem aquecimento.

Para cada amostra de conjunto de parâmetros foi obtido um perfil térmico da junta soldada, os perfis térmicos podem ser visualizados na figura 23. A faixa de cores indica a intensidade de temperatura naquela região, de modo que as regiões de coloração vermelho escuro indica uma maior intensidade de energia térmica, enquanto que as regiões mais claras possuem uma intensidade menor de energia.







Fonte: Elaborada pelo autor.



De acordo com Modenesi (2012) as regiões que foram submetidas, durante o processo de soldagem, a temperaturas superiores a temperatura de transformação pode ser identificada por meio da metalografia devido as transformações de fase (fusão, austenização, etc) que ocorrem nessas regiões. Logo, com o intervalo de temperaturas fornecido pela simulação é possível identificar as seguintes zonas da junta: zona fundida, zona termicamente afetada e metal base. Por meio dos dados obtidos através do software JMatPro® a temperatura de início de transformação metalúrgica é 720 °C e a temperatura de fusão é de 1466°C, com isso é possível determinar a extensão da zona fundida, ZAC e metal base. As dimensões de penetração, reforço e largura do cordão podem ser visualizadas na tabela 6 abaixo.

Tabela 6- Dimensões geométricas da junta soldada.

Amostra	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Energia (kJ/cm)	Penetraçãos (mm)	Reforços (mm)	Larguras (mm)
1	475	27	35,0	21,99	5,74	3,04	17,97
2	475	27	45,0	17,10	5,47	3,04	17,99
3	475	35	35,0	28,50	6,33	3,04	20,90
4	475	35	45,0	22,17	5,95	3,04	19,25
5	525	27	35,0	24,30	5,93	3,04	18,38
6	525	27	45,0	18,90	5,62	3,04	17,99
7	525	35	35,0	31,50	6,53	3,04	21,46
8	525	35	45.0	24,50	6,18	3,04	20,42
9	458	31	40,0	21,30	5,77	3,04	17,97
10	542	31	40,0	25,20	6,15	3,04	19,76
11	500	24,3	40,0	18,23	5,45	3,04	17,86
12	500	37,7	40,0	28,28	6,39	3,04	21,29
13	500	31	31,6	29,44	6,35	3,04	20,70
14	500	31	48,4	19,21	5,75	3,04	18,02
15	500	31	40,0	23,25	5,93	3,04	19,00
16	505	32,7	40,0	24,77	6,02	3,04	19,35

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com base na tabela 6 foi escolhido a condição de ensaio 13, pois resultou em um alto valor de penetração, além de que os valores de tensão (31 V) e velocidade de soldagem (31,6 cm/min) permitem um cordão de solda com uma largura mais adequada.



#### 6.9 Soldagem definitiva

Com os dados obtidos pela simulação computacional, foram realizadas soldagens com tais parâmetros, além de que nesta etapa houve uma análise microestrutural através do microscópico ótico, microscópio eletrônico de varredura e execução dos ensaios de microdureza. Foram realizadas macrografias para medição da geometria da junta para efeito comparativo da quantidade de metal de adição aplicado.

#### 6.10 Soldagem utilizando os parâmetros da simulação computacional

Para a soldagem de uma das juntas foram utilizados os parâmetros gerados pela simulação computacional, tais valores podem ser visualizados na tabela 7.

<b>Tabela</b> 7- Parametros obtidos pela simulação computacional.					
Corrente	Tensão	Velocidade de	Energia		
(A)	(V)	Soldagem (cm/min)	(kJ/cm)		
500	31	33,0	28,18		

Fonte: Elaborada pelo autor.

A juntas soldada foi do tipo topo com chanfro em duplo "V", nariz 1,50 mm, em aco SA 517 Gr. B, dimensões de 400 mm x 200 mm x 9,50 mm e limpas, o processo utilizado foi de arco submerso com o metal de adição arame tubular F11A8-ECF6-F6 (conforme classificação ASME SFA-5.23) e diâmetro de 2,40 mm. Foram realizados dois cordões, de modo que o primeiro foi realizado com os parâmetros utilizados para soldar as juntas atuais, conforme pode ser visualizado na tabela 8, enquanto o segundo cordão foi executado com os parâmetros mencionados na tabela 7.

Tabela 8 - Parâmetros utilizados nas juntas atuais.

Corrente	Tensão	Velocidade de
(A)	(V)	Soldagem (cm/min)
380	41	38

Fonte: Elaborada pelo autor.



Durante o processo de soldagem as juntas foram limpas e fixadas na banda para evitar impurezas e possíveis distorções durante o processo, não foi realizado préaquecimento como já mencionado. O primeiro e o segundo cordão podem ser visualizados na figura 24, conforme pode ser visto não houve, em ambos os cordões, nenhum defeito como trincas, poros e mordeduras. Durante a soldagem do segundo cordão foi utilizado um termômetro infravermelho da marca ICEL modelo TD-961 para medir a temperatura de interpasse, que conforme exigido pelo código ASME estabelece a que a temperatura de interferência (interpasses) não devem exceder 85°C.

Figura 24 - a) Primeiro cordão b) segundo cordão de solda soldado com parâmetros definidos pela simulação computacional sem defeitos.



Fonte: Elaborada pelos autor.

#### 6.11 Tratamento térmico

O aço SA 517 Gr. B deve passar por um tratamento térmico após o processo de soldagem, a faixe de temperatura deve estar entre 540 a 595 °C, conforme proposto pelo código ASME (2017), o objetivo dessa etapa é aliviar as tensões e reduzir a possibilidade de trincas. As condições empregadas foram:

- Taxa de aquecimento de 49 °C/hora;
- Temperatura de patamar de 595 °C;
- Tempo de patamar 30 minutos;



• Resfriamento no forno a 400 °C

As etapas do tratamento térmico e as respectivas temperaturas e tempos podem ser visualizados na figura 25.



Figura 25- Etapas do tratamento térmico.

Fonte: Elaborada pelo autor.

O processo de aquecimento entre as temperaturas de 400 e 595 °C deve ser lento para garantir que a temperatura seja homogênea em toda a extensão do material. O processo de resfriamento ocorre dentro do forno para que a taxa de resfriamento seja baixa e evite mudanças metalúrgicas indesejadas, mas caso a taxa de resfriamento fosse alta ou, com o valor de temperatura menor ou igual a 400 °C a junta poderá ser retirada do forno e resfriada ao ar.

#### 6.12 Junta soldada com as condições previstas pela simulação computacional

Logo após a etapa de tratamento térmico para alívio de tensões, as amostras foram lixadas, polidas e atacadas com Nital 2%, em seguida as amostras foram fotografadas expondo o perfil da junta, o metal de base, ZAC e zona fundida. A macrografia da junta pode ser vista na figura 26.





Figura 26- Macrografia da junta soldada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

As dimensões referentes a penetração, reforço e largura foram medidas e podem ser visualizadas na tabela 9 abaixo.

Tabela 9 - Dimensões da	nenetração 1	reforco e largura	obtidos na soldagem
Labera > Dimensoes au	penetruçuo, i	conte o contraina	i oolidos na soldagem

Cordão	Corrente (A)	Tensão (V)	Velocidade de Soldagem (cm/min)	Energia (kJ/cm)	Penetração (mm)	Reforço (mm)	Largura (mm)
1	380	41	38,0	24,60	4,43	1,44	17,59
2	500	31	33,0	28,18	7,17	1,58	22,08

Fonte: Elaborada pelo autor.

Em seguida, as macrografias das amostras passaram pela microscopia ótica, para verificar as microestruturas presentes e sua posterior relação com a dureza. De acordo com a figura 27 a) e b) é possível verificar o metal base e sua microestrutura, ambas com aumento de 200x e 500x respectivamente, sendo assim possível verificar uma maior presença da microestrutura bainítica.

Figura 27- Microestrutura metal base a) ampliação de 200x e b) ampliação 500x. Ataque Nital 2%.



Fonte: Elaborada pelo autor.



As figuras 28 a), b), c), d), e) e f) mostram as microestruturas do primeiro cordão de solda, desde a ZAC GF a zona fundida. Na figura 28 a) e b) é possível verificar a ZAC GF com sua característica microestrutura refinada como pode ser observado nessa região predomina a ferrita e a perlita. Já a figura 28 c) e d) apresentam a ZAC GG com o crescimento de grão próximo da linha de fusão. Em se comparar a ZAC GF a ZAC GG, a última passou por uma temperatura maior e um maior tempo de permanecia na região de crescimento de grãos. Nessa região (ZAC GG) ainda existe uma predominância de ferrita e perlita, contudo é possível observar trechos de bainita.

**Figura 28**- Microestrutura 1° cordão a) ZAC GF ampliação de 200x e b) ZAC GF ampliação de 500x c) ZAC GG ampliação de 200x d) ZAC GG ampliação de 500x e) zona fundida ampliação de 200x e f) zona fundida ampliação de 500x. Ataque Nital 2%.



Fonte: Elaborada pelo autor.



As figuras 29 a), b), c), d), e) e f) apresentam as microestruturas do segundo cordão, desde a metal base a zona fundida. De modo que, semelhante ao primeiro cordão na ZAC GF (Figura 29 a) e b)) há a predominância de ferrita e perlita. Também é possível verificar o bandeamento na amostra, com o alinhamento das perlitas. Na ZAG GG a presença de bainita é predominante, com isso essa região ficará mais dura e propicia a trincas (Figura 29 c) e d)). Na zona fundida simular ao primeiro cordão, nessa região pode-se verificar a predominância de ferrita, perlita e bainita (Figura 29 e) e f)).

**Figura 29**- Microestrutura 2° cordão a) ZAC GF ampliação de 200x e b) ZAC GF ampliação de 500x c) ZAC GG ampliação de 200x d) ZAC GG ampliação de 500x e) zona fundida ampliação de 200x e f) zona fundida ampliação de 500x. Ataque Nital 2%.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para efeitos comparativos foi realizado uma análise utilizando o microscópio eletrônico de varredura para comparar com os resultados anteriores obtidos pela miscrocopia ótica, a figura 30 a) e b) apresenta o metal de base dessa junta e foi possível observar a presença principal de bainita.





**Figura 30**- Microestrutura do metal de base imagens do MEV a) ampliação de 1000x e b) ampliação de 2000x. Ataque Nital 2%.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A comparação das imagens realizadas no microscópio ótico, foi escolhido como base o segundo cordão dessa junta soldada com suas respectivas zonas. As microestruturas da ZAC GF da junta são apresentadas na figura 31 a) e b) e foram identificadas ferrita e perlita. A ZAC GG possui microestrutura bainítica (Figura 31 c) e d)) e na zona fundida há predominância da ferrita acicular (Figura 31 e) e f)).

**Figura 31**- Microestrutura imagem do MEV a) ZAC GF ampliação de 1000x e b) ZAC GF ampliação de 2000x c) ZAC GG ampliação de 1000x d) ZAC GG ampliação de 1000x e) zona fundida ampliação de 1000x e f) zona fundida ampliação de 2000x. Ataque Nital 2%.







Fonte: Elaborada pelo autor.

# 6.13 Análise de microdureza da junta soldada com as condições obtidas pela simulação computacional

Com base na figura 32 as regiões que contêm os maiores valores de dureza encontram-se na junta soldada, onde o metal de base apresenta um valor de dureza mais elevado chegando até 274 HV, devido a maior concentração de bainita. A dureza reduziu logo após o metal de base, pois é o início da ZAC GF. Nessa região predomina a ferrita, e por esse motivo essa redução na dureza. Na ZAC GG o aumento na dureza ocorre devido ao surgimento da bainita. Na zona fundida a dureza também é elevada, similar a dureza da ZAC GG. Essa zona possui microestruturas ferrita acicular, sendo está uma microestrutura de dureza similar a bainita presente.





Figura 32- Microdureza junta soldada com os parâmetros obtidos na simulação computacional.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao comparar os valores de microdureza da junta soldada pela condição proposta pela simulação computacional é possível notar uma redução na dureza, tal fato ocorre devido a maior energia de soldagem atribuída pelas condições de simulação, impactando assim em uma menor velocidade de resfriamento e, como consequência, surgimento de microestruturas mais duras.

### 6.14 Análise dos resultados dos ensaios realizados nas amostras soldadas com os parâmetros obtidos pela simulação

O primeiro ensaio a ser realizado foi o de tração, os corpos de prova podem ser vistos na figura 33, onde é possível notar que a região de ruptura aconteceu na região mais estreita do material, representando assim que não houve defeitos significativos durante o ensaio, uma vez que a presença de deformações pode causar imprecisão durante avaliação da tensão, os resultados obtidos do ensaio podem ser vistos na tabela 10.





Figura 33 - Corpos de prova submetidos ao ensaio de tração a) antes do ensaio b) após o ensaio.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O critério de aceitação é o valor mínimo de 795 Mpa, de modo que as duas amostras foram aprovadas, pois obtiveram o valor do limite de resistência superior ao valor de aceitação, de modo que primeiro corpo de prova rompeu com 797,39 Mpa e o segundo com 795,55 Mpa.

Tabela 10 - Valores obtidos do ensaio de tração							
Amostro	Largura	Espessura	Área	Carga	Limite de	Local da	
Amostra	(mm)	(mm)	(mm)	Máxima (N)	Resistência (Mpa)	Fratura	
TRA1	19,01	7,93	150,75	120.252	797,69	Zona fundida	
TRA2	19,04	8,29	157,84	125.571	795,55	Zona fundida	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o ensaio de dobramento, os corpos de prova podem ser visualizados na figura 34, onde é possível notar o surgimento de duas trincas em uma das amostras referentes ao dobramento raiz, enquanto que nas demais amostras não houve o surgimento de trincas, de modo que o ensaio foi aprovado. Logo, pode-se concluir que os valores dos parâmetros de soldagem podem ser utilizados para demais soldagens. Os resultados obtidos durante os ensaios de dobramento podem ser visualizados na tabela 11.



Figura 34– Corpos de prova submetidos ao ensaio de dobramento.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Amostra	Largura (mm)	Espessura (mm)	Resultado
DFS1	38,01	7,16	Satisfatório - ausência de defeitos
DFS2	38,00	7,23	Satisfatório - ausência de defeitos
DRS3	38,04	7,25	Satisfatório - ausência de defeitos
DRS4	37,90	7,14	Satisfatório - ausência de defeitos

ento.
Ę

Fonte: Elaborado pelo autor.

As dimensões máximas referentes as trincas do corpo de prova, que apresentou falha durante o ensaio de dobramento raiz, foram de 1,36 mm e 1,30 mm, conforme pode ser visto na figura 35. A norma ASME assegura que os defeitos de borda não são considerados, além de que defeitos com dimensões inferiores a 3 mm são aceitáveis.





Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o ensaio de impacto (Charpy), os resultados podem ser visualizados na tabela 12, o código ASME estabelece que o critério de aceitação para o aço SA 517 Gr. B é uma expansão lateral mínima de 0,40 mm para a espessura do material. Conforme os resultados mostrados na tabela 12, podemos concluir que todos os corpos de prova foram aprovados, pois obtiveram uma expansão lateral superior a 0,40 mm. Os corpos de prova utilizados podem ser visualizados na figura 36.

Tabela 12- Resultados oblidos apos o ensalo de enarpy.							
Amostra	Temperatura	Tipo do	Pagião	Energia Absolvida	Energia Absolvida	Expansão	
Amostra (°C	(°C)	Entalhe	Regiao	Individual (J)	Média (J)	Lateral (mm)	
IPA1			Centro da solda	40		0,87	
IPA2	0	V		48	44	0,83	
IPA3				46		0,85	
IPA4				77		0,73	
IPA5	0	V	ZAC	73	74	0,79	
IPA6				74		0,58	

Tabela 12- Resultados obtidos após o ensaio de Charpy.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 36 - Corpos de prova do Charpy a) antes do ensaio b) após o ensaio.

Fonte: Elaborado pelos autor.

### 7. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos pela simulação computacional é possível determinar uma combinação entre os parâmetros de tensão, corrente e velocidade de soldagem para cada aplicação prática, as soldas realizadas utilizando esses parâmetros apresentaram uma excelente resistência mecânica. Pode-se concluir também que as regiões de maior dureza se encontram na junta soldada, possuindo o valor máximo de 274 HV por conta de a microestrutura ser predominantemente formada por bainita, conforme mostrado nos ensaios metalográfico e microdureza.

As amostras que foram soldadas utilizando os parâmetros obtidos da simulação apresentaram um resultado satisfatório, sendo assim aprovadas nos ensaios mecânicos de tração, dobramento e impacto, atendendo assim as exigências do código ASME Seção VIII Div.1 e IX e os requisitos de segurança, uma vez que a utilização errônea desses



parâmetros de trabalho pode resultar em uma junta soldada com baixa resistência mecânica e comprometer a segurança operacional de um vaso de pressão.

A simulação computacional se torna uma alternativa viável para obtenção dessas grandezas, pois é possível obter os parâmetros iniciais de trabalho do processo de soldagem, evitando assim desperdício e custos adicionais com metal de base e demais insumos utilizados no processo para obtenção desses parâmetros, além de gerar um ganho considerável na produtividade, pois não é necessário realizar as soldagens experimentais e os respectivos ensaios laborais.

Com os resultados favoráveis obtidos pela simulação computacional, pode-se concluir que a utilização de softwares na engenharia tem-se tornado cada mais necessário para auxiliar em problemas que envolvam muitos cálculos repetitivos e contribuir para a tomada de decisão.



#### REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: A255-10: Standard Methods for Determining Hardenability of Steel, ASTM International, 2013.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessel. 2017 ed. New York: ASME, 2017.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME Materials Part A. 2017 ed. New York: ASME, 2017.

ALVES FILHO, Avelino. Elementos Finitos–A base da tecnologia CAE. Saraiva Educação SA, 2018.

ESSS. Preparação de Modelos para Geração de Malhas. Disponível em: https://www.esss.co/blog/preparacao-de-modelos-para-geracao-de-malhas/ Acesso em: 08 de set. 2021.

ESAB. Arco Submerso. ESAB, 2004. 06p. Disponível em: https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901100rev1\_apostilaarcosub mers o.pdf> Acesso em 15/08/2021.

MODENESI, P. M., MARQUES, P. V., BRACARENSE, A. Q. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. 3ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

MODENESI, Paulo José. Introdução à Física do Arco Elétrico, Soldagem I. Belo horizonte: UFMG, 2012. 41p. Disponível em: http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/fundamentosfisicos1.pdf. Acesso em: 10 de setembro de 2021.

PARANHOS, R.; SOUZA A. C. Soldagem a Arco Submerso. Rio de Janeiro: SENAI/RJCETEC de Solda, 1999.

SILVA, A. L. C., MEI, P. R. Aços e ligas Especiais. 3ª ed., Edgar Blucher, São Paulo, 2010.

SOUZA, S, A. Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos. 5. Ed. São Paulo; Edgard Blucher, 2001.

TELLES, Pedro C. Silva. Vasos de pressão. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1996.



VILLANI, Paulo; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. Soldagem: Fundamentos e Tecnologia. Elsevier Brasil, 2016.

VETTURAZZI, Rafael; BONIAT, Daniel Luís; ACOSTA, Victor. Distorções em Estruturas Soldadas: Avaliação Comparativa Entre Método de Elementos Finitos e a Análise Real, São Paulo, 2020, 1, 2020. Disponível em: http://library.esss.co/analise\_processo\_soldagem. Acesso em 7 set. 2021.