



Sanderson Samuel Brandt

**INFLUÊNCIA DOS CONSUMÍVEIS AWS ER70S-6 E AWS ER110C-G H4 SOBRE
A RESISTÊNCIA MECÂNICA DO AÇO STRENX 700**

Horizontina-RS

2024

Sanderson Samuel Brandt

**INFLUÊNCIA DOS CONSUMÍVEIS AWS ER70S-6 E AWS ER110C-G H4 SOBRE
A RESISTÊNCIA MECÂNICA DO AÇO STRENX 700**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Mecânica na Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin

Horizontina-RS

2024

FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

**“INFLUÊNCIA DOS CONSUMÍVEIS AWS ER70S-6 E AWS ER110C-G H4 SOBRE
A RESISTÊNCIA MECÂNICA DO AÇO STRENX 700”**

**Elaborada por:
Sanderson Samuel Brandt**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 05/07/2024
Pela Comissão Examinadora

Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

Prof. Me. Camila Pereira Lisboa
Atitus Educação

Prof. Dr. William Lemos Bevilaqua
Universidade Federal de Santa Maria - UFSM

**Horizontina - RS
2024**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em especial aos meus filhos Arthur Luis Brandt e Cauê Henrique Brandt, a minha mãe Ilária Beatriz Reis, meus irmãos Eduardo Brandt e Raíra Ogênio, a minha namorada Deborá Pedó e a todos meus colegas e amigos que de alguma forma direta ou indireta me ajudaram nessa caminhada.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por permitir e nunca me deixar desistir desta conquista, resultado de lutas e vitórias, sempre estando ao meu lado, me mostrando o melhor caminho!

Agradeço também a minha mãe! Que sempre foi meu pilar de força e inspiração. Sua sabedoria, amor incondicional e apoio tornaram possível cada passo que dei para chegar até aqui.

Aos meus preciosos filhos, que trouxeram luz e alegria aos meus dias. Cada conquista alcançada é em honra ao futuro que estou conquistando para vocês, com a esperança de inspirá-los a perseguir seus sonhos com determinação.

Minha querida e amada namorada Deborá, cujo amor e compreensão tornaram minha jornada acadêmica mais leve e significativa. Sua presença ao meu lado é um constante lembrete do que é verdadeiramente importante na vida. Você é e sempre será uma inspiração para mim. Te Amo!

Agradeço de forma especial aos colegas da John Deere, Maitê Minetto, Evandro Rosso e Airton Heck, por sempre acreditarem no meu potencial.

Juntam-se a estes agradecimentos, em especial meu orientador Dr. Rafael Luciano Dalcin por todo seu conhecimento, atenção e dedicação.

"Faça o teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores para fazer melhor ainda" (Mario Sergio Cortela).

RESUMO

Atualmente as empresas buscam colocar no mercado produtos de alta qualidade com maior desempenho, desta forma estão utilizando aço com propriedades mecânicas elevadas, para assim ganhar em redução de peso nos produtos. Desta forma a introdução de aço de alta resistência como o Strenx 700 que são produzidos por processo termomecânico controlado vem sendo cada vez mais comuns em situações em que é necessária uma redução de peso, porém sem perder a resistência ou capacidade de carga. Em contrapartida com isso as empresas precisam se manter competitivas no mercado, para isso precisam encontrar soluções para redução de custo nos seus processos de fabricação. Este trabalho tem por objetivos obter dados referentes à eficiência e comportamentos mecânicos das juntas soldadas pelo processo MAG robotizado, foi utilizado dois metais de adição, um de uso comum, com custo menor AWS ER70S-6 e outro especial AWS ER110C-G H4. Foram soldados 20 corpos de prova, utilizando os mesmos parâmetros e energia de soldagem para os dois tipos de metal de adição e sem pré-aquecimento do material, desta forma foi coletado dados com o menor custo de fabricação. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de tração, dobramento, microdureza e metalográfico. Comparando a utilização dos dois consumíveis, com energia de soldagem de 0,70 kJ/mm, as juntas soldadas com o metal de adição AWS ER70S-6 apresentaram melhores resultados. Com o metal de adição AWS ER110C-G H4 os resultados do ensaio de tração foram similares ao AWS ER70S-6, sendo que em ambos os casos houve rompimento no cordão de solda ou próximo na ZAC. No ensaio de dobramento o metal de adição AWS ER70S-6 obteve melhores resultados em relação ao AWS ER110C-G H.

Palavras-chave: Aço Strenx 700. Soldagem MAG Robotizada. Energia de soldagem. Resistência Mecânica da Junta Soldada.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Imagem ilustrativa sobre utilização do aço Strenx 700.	12
Figura 2: Energia de soldagem em função da espessura Strenx 700	20
Figura 3: Processo de soldagem MAG.....	22
Figura 4: Vantagens e desvantagens do processo MAG	22
Figura 5: Perfil dos cordões de solda de acordo com diferentes gases	23
Figura 6: Modos de transferência de metal	25
Figura 7: Célula de solda robotizada.....	26
Figura 8: Perfil de microdureza aço 700 MPa soldado pelo processo MAG	30
Figura 9: Fluxograma das atividades	31
Figura 10: Junta corpos de prova.....	32
Figura 11: Posição de soldagem	33
Figura 12: Posição da tocha de soldagem em relação ao eixo de solda.....	33
Figura 13: Parâmetros geométricos do cordão	36
Figura 14: Perfil de microdureza	36
Figura 15: Dimensional corpo de prova ensaio de tração	37
Figura 16: Corpos de prova ensaio de tração	37
Figura 17: Corpos de prova para ensaio de dobramento	38
Figura 18: Microestrutura de núcleo metal base	39
Figura 19: Macrografia: (a) AWS ER70S-6; (b) AWS ER110C-G H4.....	40
Figura 20: Perfil de microdureza nos corpos de prova.	41
Figura 21: Amostras após ensaio de dobramento.....	42
Figura 22: Tensão x Deformação AWS ER70S-6	43
Figura 23: Tensão x Deformação AWS ER110C-G H4.....	43
Figura 24: Corpos de prova de tração (AWS ER70S-6).....	44
Figura 25: Corpo de prova de tração (AWS ER110C-G H4)	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química do aço Strenx 700.....	17
Tabela 2 - Carbono Equivalente x Soldabilidade.....	18
Tabela 3: Perfis de solda de topo aceitáveis.....	29
Tabela 4: Propriedades mecânicas Strenx 700.....	32
Tabela 5: Características da fonte de solda.....	34
Tabela 6: Composição química dos metais de adição.....	34
Tabela 7: Propriedades mecânicas dos metais de adição.....	34
Tabela 8: Parâmetros empregados para realização da soldagem.....	35
Tabela 9: Composição química do metal base.....	40
Tabela 10: Dados coletados.....	45

SUMÁRIO

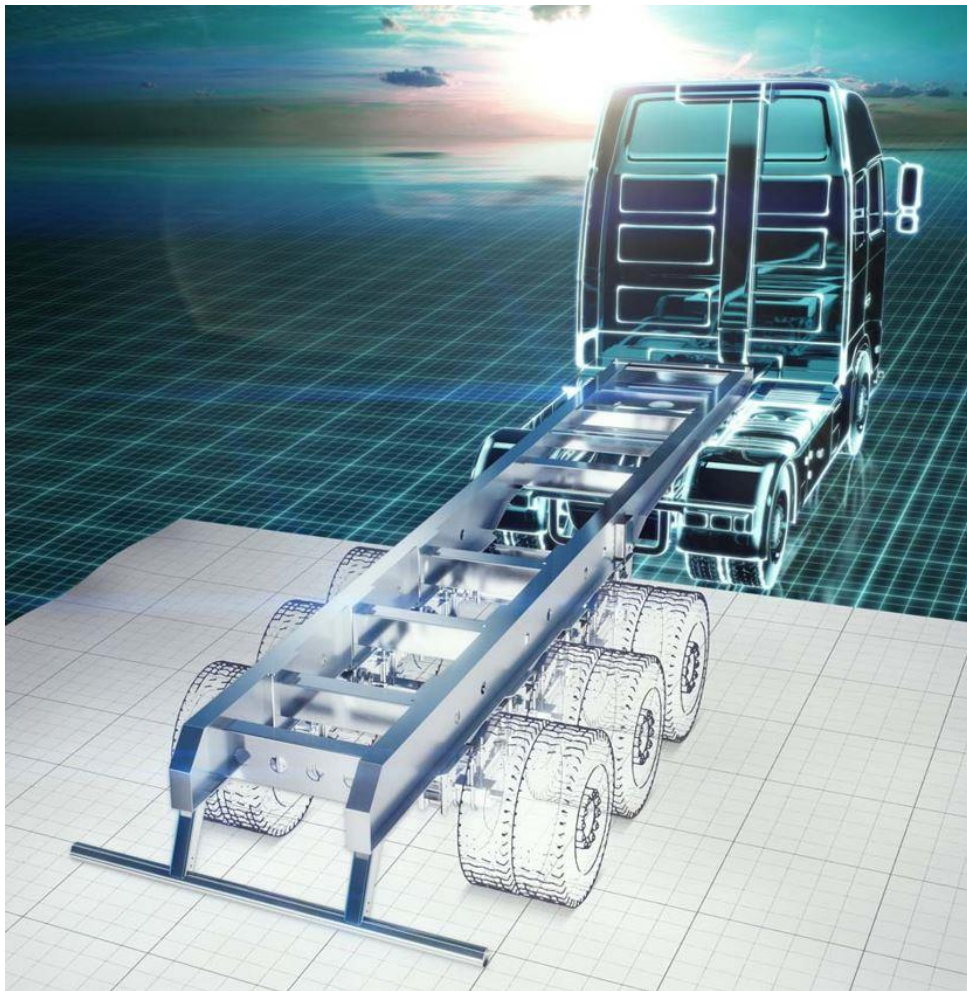
1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	TEMA.....	14
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	14
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.4	OBJETIVOS	14
1.4.1	Objetivo Geral	15
1.4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.5	JUSTIFICATIVA.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA	17
2.1.1	Soldabilidade dos aços Strenx 700.....	17
2.1.2	Influência da Energia de Soldagem na Zona Afetada pelo Calor	19
2.1.3	Microestrutura do aço Strenx 700 pré e pós soldagem	20
2.1.4	Propriedades mecânicas do aço Strenx 700 pré e pós soldagem	20
2.2	PROCESSO DE SOLDAGEM MAG	21
2.2.1	Gás de proteção.....	23
2.2.2	Modos de transferência do metal de solda	23
2.2.3	Soldagem MAG robotizada	25
2.2.4	Consumíveis de solda e sua relação com a junta soldada.....	26
2.3	CRITÉRIOS DE QUALIDADE PARA SOLDAGEM MAG	27
2.3.1	Descontinuidades em juntas soldadas.....	27
2.3.2	Geometria do cordão de solda	28
2.3.3	Zona afetada pelo calor e dureza	29
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	31
3.1.1	Metal base	31
3.1.2	Procedimento de soldagem.....	32
3.1.3	Preparação dos corpos de prova após a soldagem	35
3.2	MÉTODOS E TÉCNICAS	36
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADO.....	39
4.1	AMOSTRAS	39
4.1.1	Análise química do metal base.....	39

4.1.2	Análise das macrografias	40
4.1.3	Análise dos perfis de microdureza	41
4.1.4	Análise dos ensaios de dobramento	42
4.1.5	Análise dos ensaios de tração	43
4.1.6	Região da fratura dos corpos de prova do ensaio de tração.....	44
4.2	DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS	45
	CONCLUSÃO	47
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48

1. INTRODUÇÃO

O aço é um material amplamente utilizado na indústria, porém com o avanço da tecnologia surgiram novas ligas de aço que oferecem propriedades mecânicas ainda mais aprimoradas, como o aço Strenx 700, que se destaca por sua excepcional resistência à tração e capacidade de suportar cargas pesadas em diversas aplicações, por ele possuir propriedades de alta resistência mecânica, permite uma redução de espessura e peso das estruturas, resultando em economia de material e menor consumo de energia durante a fabricação (SSAB, 2004; DALCIN, 2016). A Figura 1, demonstra a ampla aplicação do aço Strenx 700.

Figura 1: Imagem ilustrativa sobre utilização do aço Strenx 700.



Fonte: Site SSAB (2024).

O aço Strenx 700 é um tipo de aço estrutural de alta resistência que torna a soldagem um processo complexo. Neste contexto, é fundamental compreender os efeitos da energia de soldagem e dos consumíveis na resistência mecânica do aço Strenx 700. De acordo com Smith (2022), a soldagem do aço Strenx 700 exige

atenção especial devido a algumas características do material. Sua composição química, que inclui elementos de liga como Manganês, Silício e Vanádio. Pelo aço Strenx 700 ter alta resistência mecânica, requer a aplicação de altos níveis de calor e energia para fundir e unir as peças, o que pode resultar em descontinuidades de solda.

Durante o processo de soldagem do aço Strenx 700, algumas alterações ocorrem devido ao calor intenso gerado pela solda. O aquecimento durante a soldagem pode levar à formação de uma zona afetada pelo calor (ZAC), que pode apresentar mudanças na microestrutura e nas propriedades mecânicas em comparação com o restante do material. De acordo com Zhang (2011), a formação de martensita ou outros produtos duros na ZAC pode levar a uma redução na ductibilidade e tenacidade do material. Por isso, a utilização de uma energia de soldagem adequada é crucial para evitar falhas, como trincas ou zonas de fusão indevidamente afetadas, que podem comprometer a integridade estrutural do material soldado.

A energia de soldagem adequada é essencial para alcançar uma junta soldada de alta resistência (PAIT, 2010). É importante escolher os consumíveis adequados, porém deve-se levar em consideração a composição química do aço Strenx 700 e os requisitos de resistência mecânica da aplicação específica. Desta forma, ao executar a soldagem do aço de alta resistência Strenx 700 precisa ter o conhecimento dos parâmetros e consumíveis adequados, pois quando executar a soldagem não serão permitidas descontinuidades nos cordões de solda. Assim, pode-se destacar o problema da pesquisa sobre as diferenças encontradas e o resultado da soldagem com diferentes consumíveis na resistência mecânica do aço Strenx 700.

O aço Strenx 700 desempenha diversas funções em novos projetos e equipamentos, e na maioria das vezes estas estruturas são unidas através do processo de soldagem. Estes novos projetos e equipamentos serão submetidos a grandes esforços mecânicos e suas juntas soldadas deverão suportar as cargas exigidas. Desta forma, a escolha de parâmetros e consumíveis adequados para a execução da soldagem, permitirá analisar e avaliar os efeitos da energia sobre a resistência mecânica, para assim determinar a melhor condição de soldagem, sabendo ainda que a soldagem é um dos processos de fabricação mais complexos e que qualquer variação nos parâmetros ou aplicação poderá refletir em alteração nas juntas soldadas. O objetivo do trabalho é analisar quais são os efeitos dos

consumíveis AWS ER70S-6 e AWS ER110C-G H4 nas características mecânicas do aço Strenx 700.

1.1 TEMA

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Para definição do metal de adição no processo de soldagem são levados em conta diversos fatores, tais como, propriedades mecânicas, composição química, aplicabilidade, normas, custo, disponibilidade no mercado, entre outros diversos fatores. Neste trabalho optou-se em analisar os consumíveis AWS ER70S-6 e AWS ER110C-G H4, tendo em vista que no mercado atual a grande diferença do custo e da disponibilidade.

Desta forma, a análise comparativa da utilização do AWS ER70S-6 e AWS ER110C-G H4 na soldagem do aço Strenx 70 deste trabalho em questão desconsidera as variações humanas no processo de soldagem, pois as amostras e testes foram soldados em um processo robotizado.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Uma empresa do ramo metal mecânico irá começar a utilizar em seus produtos o aço Strenx 700, porém o metal adição recomendado para este material tem um elevado custo, desta forma a empresa quer soldar com o metal de adição com menor custo-benefício. Devido ao metal de adição possuir propriedades mecânicas inferiores ao do aço Strenx 700, pode gerar problemas de qualidade em seus produtos. Diante disso, quais são as diferenças encontradas e o resultado da soldagem com diferentes consumíveis AWS ER70S-6 e AWS ER110C-G H4 na resistência mecânica do aço Strenx 700?

1.4 OBJETIVOS

Considerando os estudos prévios e a relevância dos aços Strenx 700 na indústria, a presente pesquisa tem como objetivo principal investigar os efeitos dos consumíveis de solda na soldagem dos aços Strenx 700, com ênfase nas propriedades mecânicas da junta soldada. Serão realizados experimentos controlados

de soldagem, utilizando a mesma energia de soldagem recomendada pelo fabricante, seguidos de análises microestruturais e ensaios mecânicos para avaliar a resistência à tração e comportamento da junta soldada. Objetivo é fornecer os argumentos que justificam a solução do problema de pesquisa. Ressalta a relevância de sua execução, com informações convincentes sobre a sua importância e de suas relações com a economia e os interesses da comunidade e o conhecimento técnico-científico.

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo do trabalho é analisar quais são os efeitos dos consumíveis AWS ER70S-6 e AWS ER110C-G H4 nas características mecânicas do aço Strenx 700.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Executar cordões de solda na posição plana/horizontal em juntas de topo, com corpos de prova do aço Strenx 700 e espessura de 4,5 mm de espessura e chanfros de 45°, com os metais de adição AWS ER70S-6 e AWS ER110C-G H4.
- Ensaio de metalografia da secção transversal dos corpos de prova, para avaliar penetração da junta soldada.
- Ensaio de tração para verificar as propriedades mecânicas da junta soldada com os dois metais de adição.
- Fazer perfil de microdureza nas juntas soldadas.
- Ensaio de dobramento para verificar a formação de trincas na junta soldada.
- Analisar o comportamento da junta soldada com metal de adição com características inferiores ao metal base.

1.5 JUSTIFICATIVA

No contexto específico dos aços Strenx 700, trata-se de uma família de aços de alta resistência e baixa liga, desenvolvida para aplicações estruturais. Esses aços apresentam excelentes propriedades mecânicas, como alta resistência à tração, boa tenacidade e alta resistência à fadiga, tornando-os adequados para uso em setores como construção, transporte e equipamentos pesados. De acordo com SSAB (2004), quando submetidos ao processo de soldagem, os aços Strenx 700 podem ser

suscetíveis a mudanças em suas propriedades, particularmente devido à variação da energia de soldagem.

Portanto, é de extrema importância investigar os efeitos de diferentes consumíveis de solda na soldagem dos aços Strenx 700, a fim de compreender como essa variável influencia as propriedades mecânicas e a integridade das juntas soldadas. Essa pesquisa contribuirá para o avanço do conhecimento científico e tecnológico no campo da soldagem de aços de alta resistência, fornecendo informações valiosas para a indústria, engenheiros e projetistas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção do trabalho estará descrito os fundamentos necessários para execução da soldagem do aço Strenx 700 no processo de soldagem MAG. Além de um embasamento teórico sobre as propriedades mecânicas do aço em questão, as influências que os consumíveis geram sobre as juntas soldadas.

2.1 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA

O aço com resistência de 700 MPa, como no caso do Strenx 700 é um tipo de aço de alta resistência e baixa liga utilizado em diversas aplicações que requerem uma elevada capacidade de suportar cargas e tensões. O valor de 700 MPa refere-se à resistência à tração desse aço, indicando a sua capacidade de resistir a forças de tração antes de se romper (SSAB, 2004; DALCIN, 2016).

O aço com resistência de 700 MPa é geralmente classificado como aço de alta resistência devido à sua combinação de propriedades mecânicas superiores, incluindo alta resistência, tenacidade e ductilidade. Esse tipo de aço é obtido por meio de tratamentos térmicos específicos que promovem uma microestrutura de duas fases: ferrita e martensita. Essa combinação de fases confere ao aço uma excelente resistência mecânica e uma boa capacidade de absorção de energia (HE, 2018). O aço Strenx 700 possui como principal composição química o carbono de 0,05% até 0,30%, Manganês de 1% a 2%, além de outros componentes conforme Tabela 1.

Tabela 1: Composição química do aço Strenx 700.

C (máx. %)	Si (máx. %)	Mn (máx. %)	P (máx. %)	S (máx. %)	Al (min %)	Nb+Ti (máx. %)
0,16	0,40	1,80	0,020	0,010	0,015	0,10

Fonte: Adaptado site SSAB (2024).

Por sua razão entre resistência e deformação, o aço pode ser sujeito à conformação à frio permitindo a fabricação de elementos estruturais leves caracterizados por uma grande resistência mecânica. Sua importância destaca-se pela necessidade de se conhecer o que existe na bibliografia pertinente a área problemática em que está inserido o problema em estudo (PROCHENKA, 2018).

2.1.1 Soldabilidade dos aços Strenx 700

A soldagem é conhecida como um dos processos de fabricação que demanda muitos estudos e testes devido sua complexidade, especialmente quando se deseja

soldar aços de alta resistência mecânica. Portanto, é essencial compreender as características de soldabilidade desses aços para estabelecer as condições ideais de soldagem, a fim de evitar falhas na junta soldada.

A norma ASTM A514/A514M especifica os requisitos para chapas de aço laminadas a quente ou a frio com limite de escoamento mínimo de 700 MPa. Essa é uma das normas que pode-se utilizar para coletar informações referentes a composição química, propriedades mecânicas, tolerâncias dimensionais, testes e certificação desses aços.

Para soldagens de aços de alta resistência, é crucial assegurar uma baixa energia de soldagem e manter um nível mínimo de hidrogênio na junta soldada, uma vez que altos níveis de hidrogênio podem levar à formação de trincas. É importante que o metal de base e o metal de adição apresentem características de resistência ao escoamento semelhantes, a fim de garantir uma resistência adequada na junta soldada (SSAB, 2004).

Um aspecto importante que se deve levar em conta na soldagem de aços desse tipo é o carbono equivalente, pois o carbono é o elemento que influencia diretamente na temperabilidade e na dureza final da junta soldada. Com o carbono equivalente é possível relacionar a composição química do aço com a tendência de ele apresentar defeitos na soldagem. Para calcular o carbono equivalente, utiliza-se a equação 1 do carbono equivalente (C_{eq}):

$$C_{eq} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%N + \%Cu}{15} \quad (\text{Eq. 1})$$

A soldabilidade de um aço é determinada pelo teor do carbono equivalente. Quanto menor for o carbono equivalente, menor a probabilidade de ser obtida uma microestrutura martensítica e, conseqüentemente, melhor a soldabilidade do aço. Conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Carbono Equivalente x Soldabilidade

$C_{eq} < 0,40$	Sem necessidade de Pré Aquecimento
$0,40 \leq C_{eq} \leq 0,60$	Pré Aquecimento 50 a 100 °C
$C_{eq} > 0,60$	Pré Aquecimento de 100 a 150 °C

Fonte: Adaptado site SSAB (2024).

2.1.2 Influência da Energia de Soldagem na Zona Afetada pelo Calor

A quantidade de energia fornecida por determinada unidade de tamanho de cordão de solda pelo seu deslocamento de uma fonte de calor é denominada energia de soldagem. A energia de soldagem provoca alterações no metal base e no metal de adição, independentemente de sua origem. Os aspectos da junta soldada como a macroestrutura do metal de adição, o crescimento dos grãos e as transformações na microestrutura, são estabelecidos pelo fluxo térmico e tem grande influência nesses aspectos citados acima (MACHADO, 2000). A equação da energia da soldagem foi utilizada para o cálculo, conforme a equação 2.

$$E = \frac{U \times I}{V} \quad (\text{Eq. 2})$$

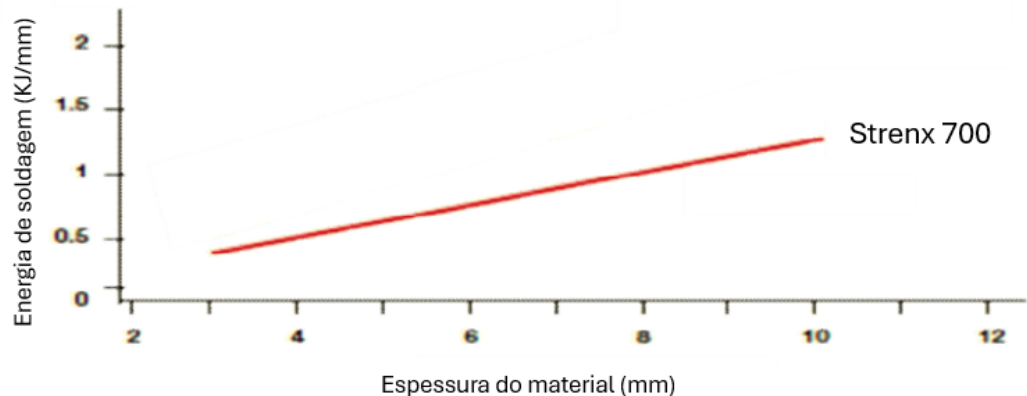
Onde, E = Energia de Soldagem, U = Velocidade de soldagem, I = Corrente, V= Tensão.

No processo de soldagem dos aços de alta liga, formam-se regiões de baixa dureza na ZAC devido às microestruturas sofrerem alterações. A dureza e a microestrutura podem sofrer alterações devido à composição química do MB e do metal de solda (SSAB TUNNPLAT; DALCIN, 2016).

Conforme citado, para obter-se uma boa qualidade no processo de soldagem, deve-se manter uma baixa energia de soldagem afim de reduzir os riscos de trincas. Se a energia de soldagem for elevada, a taxa de resfriamento será reduzida; por outro lado, as taxas de resfriamento são altas quando a energia de soldagem é baixa. Com o aumento da energia de soldagem, a ZAC se expandirá e a dureza será diminuída.

Neste sentido é aconselhado que aços de alta resistência com a característica de escoamento de 700 MPa e espessura de 4,5 mm apresentem energia de soldagem de aproximadamente 0,5 kJ/mm, conforme ilustrado através da Figura 2 (SSAB, 2004).

Figura 2: Energia de soldagem em função da espessura Strenx 700



Fonte: Adaptado SSAB (2004).

2.1.3 Microestrutura do aço Strenx 700 pré e pós soldagem

Antes da soldagem, o aço Strenx 700 apresenta uma microestrutura refinada que é resultado de um processo de laminação termomecânica seguido de um tratamento térmico. Essa microestrutura é caracterizada pela presença de grãos finos de ferrita e ilhas de martensita dispersas, o que confere ao material uma combinação única de resistência e ductilidade (WANG *et al.*, 2010).

Deve-se mencionar que a soldagem, especialmente processos de alta energia como o MAG (Metal Active Gas), pode alterar significativamente a microestrutura do Strenx 700. Durante a soldagem, a rápida taxa de aquecimento e resfriamento pode resultar em uma variedade de transformações microestruturais.

Na ZAC, a microestrutura pode sofrer um refinamento de grãos na região próxima ao metal de solda, enquanto, em áreas mais afastadas, pode ocorrer o crescimento de grãos devido à exposição a temperaturas elevadas. Além disso, a martensita pode formar-se nas regiões mais próximas da fusão, aumentando a dureza e a susceptibilidade à fragilização por hidrogênio (SANTOS, 2017).

A ZAC é particularmente suscetível a alterações microestruturais, incluindo a decomposição de fases pré-existentes e a formação de novas, como bainita e martensita. Essas transformações resultam em um aumento da dureza e da resistência, mas podem reduzir a tenacidade e a ductilidade do material.

2.1.4 Propriedades mecânicas do aço Strenx 700 pré e pós soldagem

A compreensão aprofundada das propriedades mecânicas do aço Strenx 700 é essencial para o projeto, fabricação e análise de estruturas que requerem alta

resistência e desempenho sob condições de carga extremas. Neste contexto, explorar as propriedades de resistência, capacidade de absorção de energia, capacidade de deformação e resistência ao desgaste do Strenx 700 torna-se crucial para garantir a segurança e eficiência das aplicações em que é empregado.

O aço Strenx 700 exibe uma resistência excepcional à tração, característica que o torna adequado para aplicações estruturais que exigem alta resistência. A resistência à tração típica pode chegar a valores em torno de 780 – 900 MPa. A tenacidade do Strenx 700 é destacada pela sua capacidade de absorver energia antes da ruptura. Os valores de tenacidade costumam ser superiores a 20-30 J a -40°C (SSAB, 2024).

A ductilidade do Strenx 700 é caracterizada pela sua capacidade de sofrer deformações plásticas antes da ruptura. O material geralmente exibe alongamento típico de 10-15% ou mais. A dureza do aço Strenx 700 pode variar, mas valores típicos de dureza Brinell (HB) podem estar na faixa de 250-300 HB (SSAB, 2024).

As propriedades mecânicas do Strenx 700 após a soldagem são diretamente influenciadas pelas alterações microestruturais descritas. Embora a resistência do material possa aumentar nas ZAC, há uma preocupação significativa com a redução da tenacidade, o que pode levar a uma maior susceptibilidade a trincas devido à tensão residual e à fragilização por hidrogênio.

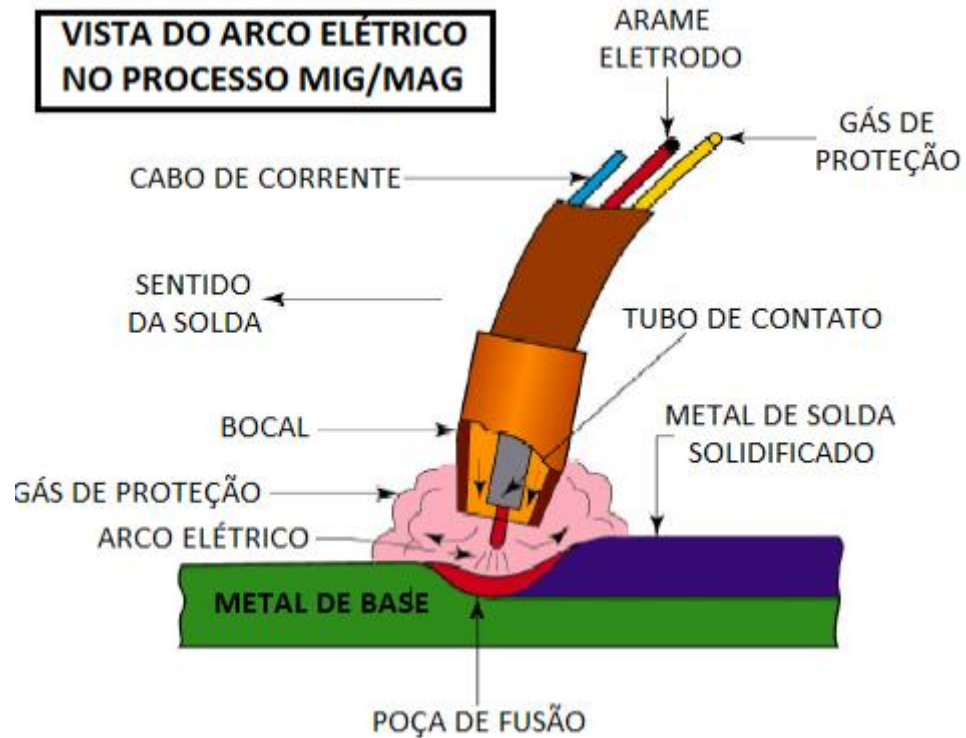
Para mitigar esses efeitos, recomenda-se o uso de pré-aquecimento e pós-tratamento térmico após a soldagem, visando a normalização da microestrutura e a redução de tensões residuais. Além disso, a escolha adequada dos consumíveis, com composições químicas compatíveis e baixo teor de hidrogênio, é essencial para garantir a integridade da solda.

2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM MAG

A soldagem por processo MAG é amplamente empregada na indústria devido à sua capacidade de proporcionar maior confiabilidade nas juntas soldadas, baixo custo de produção e alta eficiência produtiva (LIAO; CHEN, 1998).

Neste método, a soldagem aproveita o calor gerado pelo arco elétrico entre um eletrodo nu, que é alimentado de forma contínua até o metal base. A alta temperatura gerada nesse processo funde a extremidade do eletrodo e a superfície do metal base, resultando na formação da solda (BARBOSA, 2007). Na Figura 3 está ilustrado esquematicamente o processo de soldagem MAG.


Figura 3: Processo de soldagem MAG



Fonte: Site SUMIG (2024).


A proteção do arco e da poça de fusão no processo MAG é realizada por meio de um gás ativo. Os gases frequentemente empregados incluem CO_2 puro, misturas de $\text{Ar} + \text{CO}_2$ ou até mesmo combinações de $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$, os quais reagem metalurgicamente com a gota e a poça de fusão (SILVA, PANNONI, 2020). Segundo Barbosa (2007) a soldagem MAG apresenta vantagens e desvantagens conforme a Figura 4.

Figura 4: Vantagens e desvantagens do processo MAG



Vantagens

- Processo pode ser automatizado.
- Menor quantidade de gás e fumaça na soldagem.
- Não é necessário a remoção de escória.
- Pode ser aplicado para diversos tipos de materiais e espessuras.
- A soldagem pode ser executada em diversas posições.



Desvantagens

- Resfriamento rápido.
- Surgimento de respingos pelo processo de solda.
- Processo influenciado pelo ar.
- Equipamento com custo elevado.
- Grande emissão de raios ultravioletas.

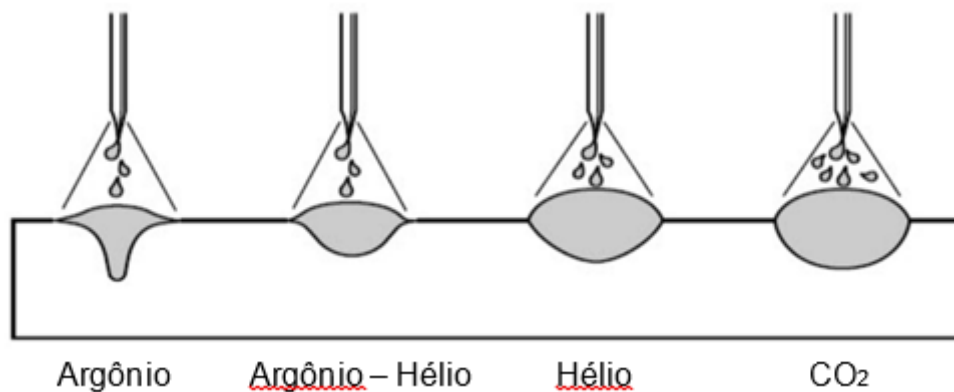
Fonte: Adaptado de BARBOSA (2024).

2.2.1 Gás de proteção

A seleção do tipo de gás impacta as características do arco, a transferência de metal, a penetração, a largura e o formato do cordão de solda, a velocidade máxima de soldagem, a propensão ao aparecimento de defeitos e o custo operacional (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

O gás de proteção é utilizado para expulsar o ar atmosférico da zona de soldagem, evitando assim a contaminação da poça de fusão. A presença de nitrogênio (N_2), oxigênio (O_2) e vapor de água (H_2O) na atmosfera é a principal causa de contaminação (ESAB, 2004). Na Figura 5 demonstra o efeito dos gases de proteção e os diferentes perfis do cordão de solda em relação à penetração.

Figura 5: Perfil dos cordões de solda de acordo com diferentes gases



Fonte: Site SUMIG (2024).

Na soldagem com gás inerte, o Argônio é amplamente empregado, enquanto na soldagem com gás ativo, o dióxido de carbono é o mais comum. Dependendo da geometria desejada para o cordão de solda, é possível utilizar uma combinação de gases inertes e ativos para alcançar o resultado desejado (GIMENES; RAMALHO, 2005).

2.2.2 Modos de transferência do metal de solda

Existem quatro principais modos de transferência metálica durante a soldagem pelos processos MIG/MAG. Essas transferências dependem do tipo de gás de proteção, tipo e diâmetro do arame, nível de energia (corrente e tensão), entre outras variáveis dos processos as transferências são: curto-circuito, globular, pulsado e spray (SUMIG, 2024).

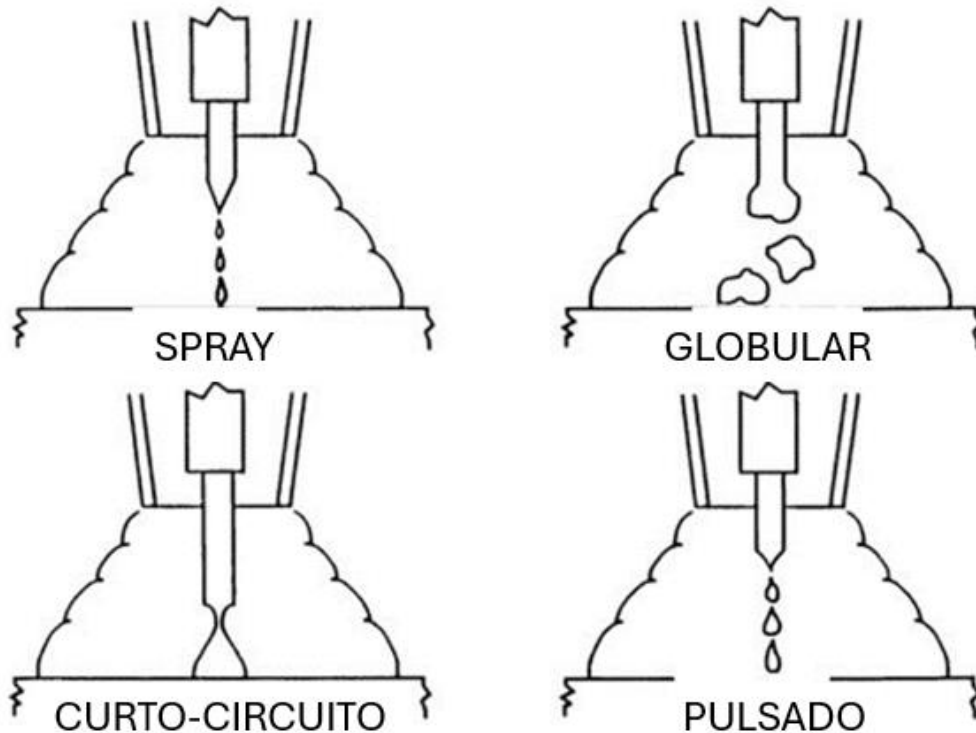
A transferência por curto-circuito é caracterizada por uma sequência de curtos-circuitos causados entre a extremidade do arame e o metal de base. Possui um ruído característico devido a sequência de curto-circuito “por segundo”, conforme o tipo de regulação da tensão e corrente do arco. Algumas fontes de energia possibilitam um controle preciso destes curtos-circuitos, sendo que cada vez que ocorrem é transferida uma gota de metal. O nível de energia na transferência por curto-circuito é baixo (baixo aporte térmico), permitindo a soldagem fora de posição, a soldagem de chapas finas e a soldagem de raiz ou abertas (SUMIG, 2024).

Na transferência globular, as tensões são mais altas em comparação com a transferência por curto-circuito. Nesse método, a força gravitacional é responsável por transferir as gotas de metal fundido para a poça de fusão, limitando assim a sua aplicação a posições planas. É frequente a ocorrência de respingos, falta de fusão e penetração nesse modo de transferência (QUITES, 2002).

A transferência por spray é desencadeada por correntes mais elevadas e quando se utiliza argônio ou misturas de argônio como gás de proteção. Esse modo de transferência ocorre quando a gota formada na ponta do eletrodo nu é menor em diâmetro que o próprio eletrodo, sendo direcionada axialmente. Nesse processo, uma quantidade significativa de calor é transferida para a peça, tornando-o recomendado para a soldagem de chapas espessas (BRANDI, 2004).

Na transferência por arco elétrico pulsado, o equipamento de soldagem produz dois níveis de corrente. No primeiro, a corrente de base é baixa e não há transferência, apenas inicia-se a fusão do arame. No segundo, a corrente de pico é maior que a corrente de transição entre os modos globular e de pulverização, resultando na transferência de uma única gota. Dessa forma, é possível alcançar uma transferência com características semelhantes à pulverização, mas com uma corrente média mais baixa. Esse método viabiliza a soldagem de chapas finas em todas as posições (BRANDI, 2004). A Figura 6 demonstra como ocorre a transferência em cada modo.

Figura 6: Modos de transferência de metal



Fonte: Adaptado site SUMIG (2024).

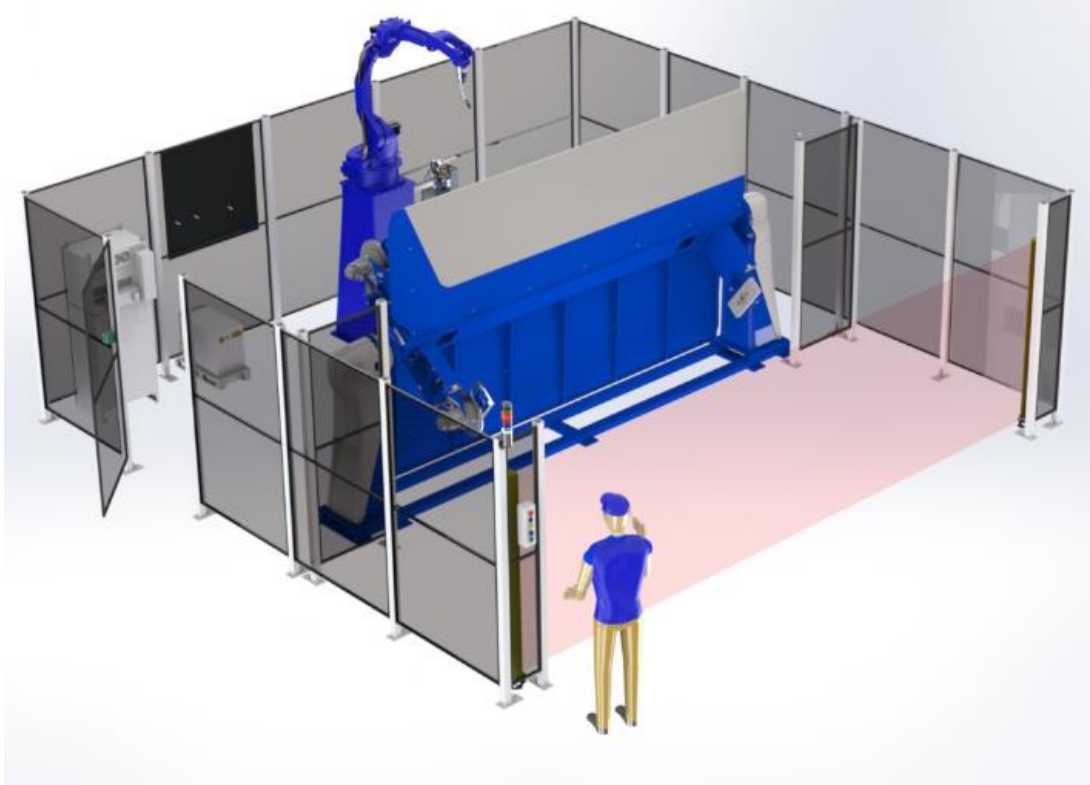
2.2.3 Soldagem MAG robotizada

A Soldagem robotizada é um método automatizado que emprega robôs para executar a união de peças e componentes por meio de solda, melhorando a eficácia e exatidão da operação. Esse sistema é composto essencialmente por um braço mecânico, uma fonte de energia, um alimentador de arame e uma tocha de soldagem.

A necessidade do aumento de produtividade, a falta de trabalho qualificado e o aumento das exigências de segurança no trabalho são fatores importantes para a demanda por processos automatizados (MERRIFIELD, 2015).

Automatizar a operação de soldagem, geralmente com os processos MIG/MAG, TIG e arame tubular. A maioria das operações de soldagem é feita manualmente e com o uso de robôs ou de células para soldagem robotizada. Obtêm-se muitos benefícios diretamente relacionados aos custos da operação (SUMIG, 2024). Figura 7 demonstra uma célula de solda robotizada.

Figura 7: Célula de solda robotizada.



Fonte: Site Yaskawa (2024).

2.2.4 Consumíveis de solda e sua relação com a junta soldada

Para soldagem em aços de alta resistência, é muito importante a seleção adequada do metal de adição, pois ele irá influenciar diretamente na resistência da junta soldada. Existem alguns fatores que influenciam a escolha do metal de adição para o processo de soldagem MAG (ESAB, 2024):

- Composição química do metal base;
- Propriedades mecânicas do metal base;
- Gás de proteção;
- Tipo de junta.

A norma que podemos seguir como referência para a escolha dos metais de adição é de acordo com a AWS (*American Welding Society*), sendo assim os fabricantes de arames para solda utilizam os padrões da AWS para garantir sua conformidade (ESAB, 2024).

AWS 5.18 ER70S-6 excelente soldabilidade, baixo nível de respingos, adequado para soldagem em curto-circuito, spray, rapid arc ou pulsado. Possui uma camada cobreada e uma quantidade adequada de lubrificante que auxilia na

alimentação, assegurando uma baixa fricção durante a alimentação e melhor condutividade elétrica (LINCOLN ELECTRIC, 2024).

AWS A5.28 E110C - G H4 é um arame metal core de baixa liga, para soldagem de materiais com alta resistência a tração de 760 MPa, necessárias para muitas aplicações em aços de baixa liga e de alta resistência, um arame desenvolvido para gerar baixos teores de hidrogênio, alta resistência e alta tenacidade, geração de pouco respingo (LINCOLN ELECTRIC, 2024).

2.3 CRITÉRIOS DE QUALIDADE PARA SOLDAGEM MAG

As soldas feitas por meio do processo MAG exibem certas características próprias desse método, sendo que os parâmetros do processo têm um impacto direto nos critérios usados para assegurar a qualidade da junta soldada. Portanto, nesta seção, foram discutidos os critérios de qualidade considerados na soldagem do aço de alta resistência Strenx 700.

2.3.1 Descontinuidades em juntas soldadas

Descontinuidades de solda são imperfeições que podem ocorrer durante o processo de soldagem e que afetam a qualidade da junta soldada. Essas descontinuidades podem surgir devido a diversos fatores, como má preparação das superfícies a serem unidas, parâmetros de soldagem inadequados, falta de fusão do metal base, presença de contaminantes, entre outros. Alguns exemplos de descontinuidades comuns incluem porosidade, trincas, falta de penetração, falta de fusão, mordedura (BRANDÃO, 2021).

A porosidade na soldagem ocorre devido ao aprisionamento de gases na região posterior da poça de fusão durante o processo de solidificação da solda. Geralmente, os poros têm formato esférico e estão frequentemente associados ao hidrogênio. Essa imperfeição pode ser causada por diversos fatores, incluindo parâmetros inadequados de soldagem e problemas no equipamento utilizado durante o processo (MODENESI, 2001).

Trincas causadas pelo hidrogênio podem surgir por uma variedade de motivos, sendo um deles a presença de hidrogênio dissolvido no metal em fusão. Esse tipo de fissura geralmente se manifesta quando o material se encontra próximo à temperatura ambiente, especialmente na ZAC. Após surgir, essas trincas têm a tendência de se

expandir de maneira gradual e intermitente. Elas podem se apresentar de forma superficial, longitudinal ou transversal (FILHO, BERGER, 2012).

A falta de fusão é caracterizada pela ausência de junção por fusão entre o material de adição e o material base. As razões para esse tipo de falha podem incluir aquecimento inadequado do material base, manuseio incorreto do material de adição, utilização de baixa energia de soldagem ou até mesmo negligência na limpeza da junta. A falta de fusão cria pontos de concentração de tensão, podendo resultar em formação de trincas e diminuição da área efetiva da solda, tornando-a mais propensa a falhas sob esforços mecânicos. Uma das causas comuns desse problema é a aplicação de alta velocidade de soldagem (MODENESI, 2001).

A falta de penetração ocorre quando há falha em fundir e preencher totalmente a raiz da junta. Esse problema pode resultar na redução da eficácia da solda, tornando-a mais vulnerável a esforços mecânicos, além de poder servir como ponto de concentração de tensões. Diversos fatores podem causar a falta de penetração, incluindo a utilização de baixa energia de soldagem e a manipulação inadequada do eletrodo (MODENESI, 2001).

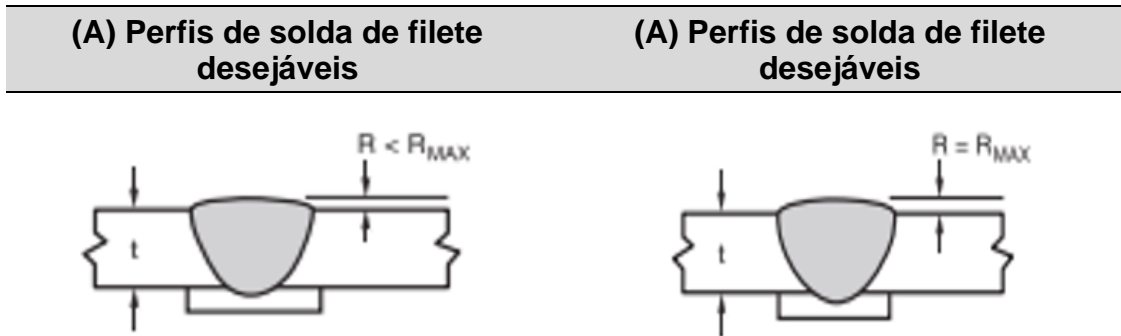
Mordedura refere-se às pequenas reentrâncias agudas formadas devido ao calor intenso gerado pelo arco elétrico entre o cordão de solda e o material base. A presença de mordedura pode enfraquecer a junta soldada ao criar uma redução na seção transversal efetiva. Uma das causas desse tipo de falha pode ser a utilização de uma velocidade de soldagem excessivamente alta (MODENESI, 2001).

2.3.2 Geometria do cordão de solda

A geometria do cordão de solda pode ter um impacto significativo no desempenho da junta soldada, podendo resultar em uma resistência inferior e comprometer a qualidade da soldagem (BERGER, 2012).

A norma AWS D1.1/D1.1M (2020) especifica que a geometria do cordão de solda para soldagem MAG, compreendido pela altura do reforço em relação à espessura do material, conforme Tabela 3.

Tabela 3: Perfis de solda de topo aceitáveis



Espessura do material	R min	R max.
≤ 25 mm	0	3 mm
> 25 mm ≤ 50 mm	0	5 mm
> 50 mm	0	6 mm

Fonte: Adaptado AWS D1.1 (2020).

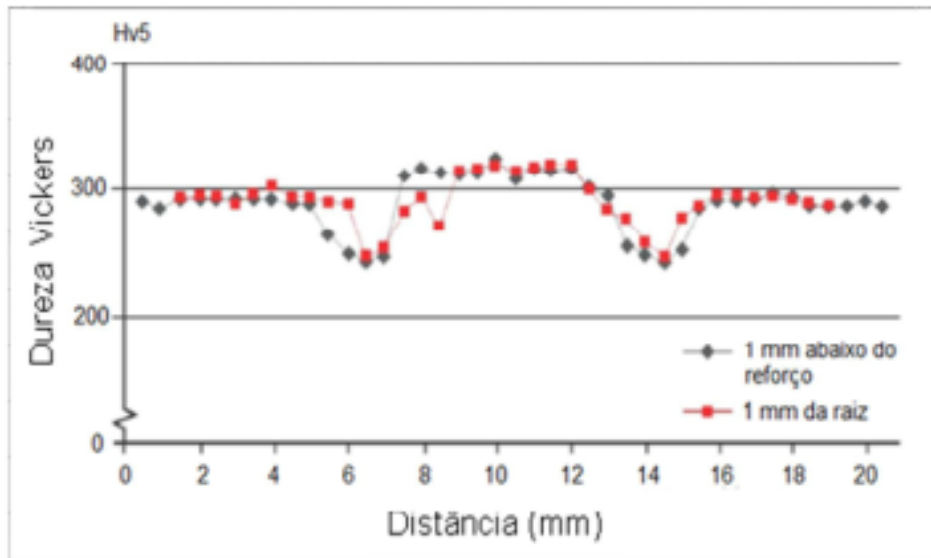
Como citado anteriormente, deve-se ter cuidados com outros tipos de descontinuidades que irão afetar a qualidade do cordão de solda, que são elas: trincas, mordedura, falta de fusão, falta de penetração e porosidade.

2.3.3 Zona afetada pelo calor e dureza

Durante a soldagem de aços de alta resistência, são criadas regiões na ZAC com baixa dureza devido às mudanças na microestrutura. A dureza e a extensão dessas regiões na ZAC são principalmente determinadas pela espessura do metal base, temperatura de trabalho e energia de soldagem (SSAB, 2004; BERGER, 2012).

Durante a soldagem com energias elevadas, a largura da ZAC tende a aumentar e a dureza a diminuir. Geralmente, as descontinuidades ocorrem nas áreas de menor dureza da ZAC, uma vez que a resistência da junta soldada nessas regiões é inferior à do metal base. A Figura 8 demonstra o perfil de microdureza para um aço de 700 MPa de limite de escoamento (SSAB, 2004; BERGER, 2012).

Figura 8: Perfil de microdureza aço 700 MPa soldado pelo processo MAG



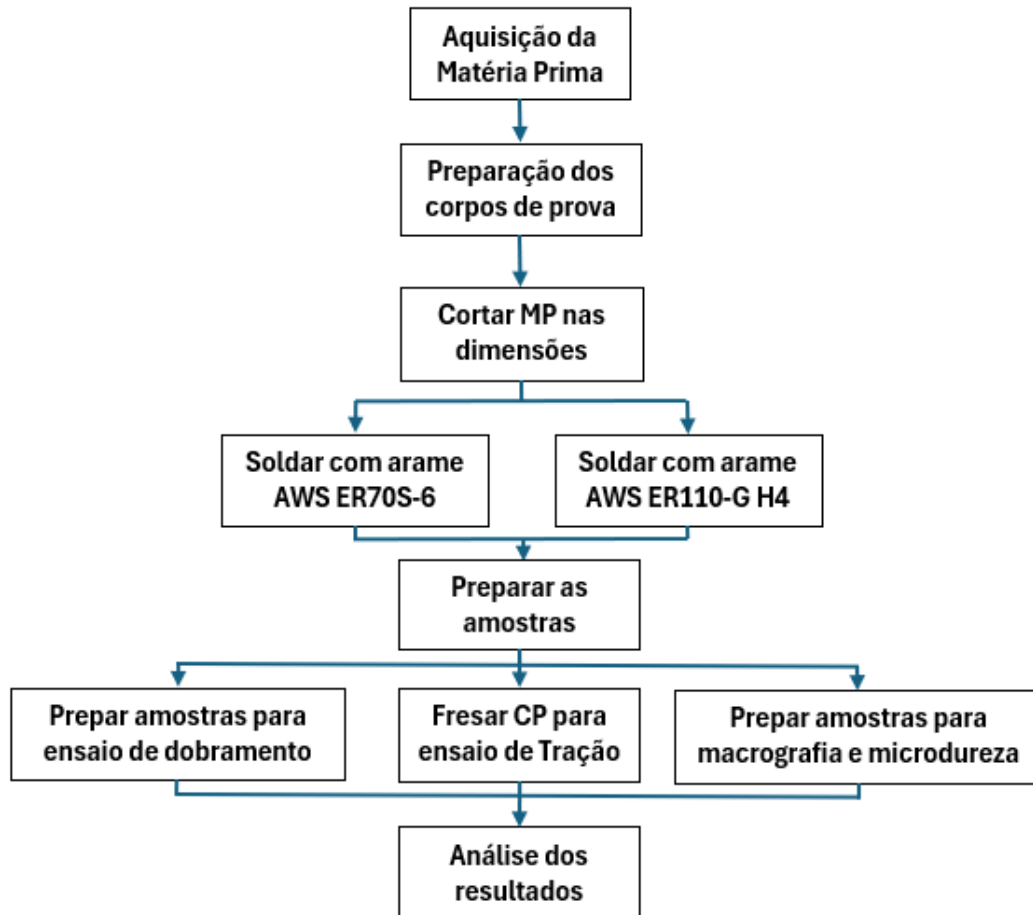
Fonte: Adaptado SSAB (2004)

A dureza da junta soldada é influenciada por diversos fatores, incluindo o tipo de aço, a presença de hidrogênio e as condições de trabalho. Em estudos laboratoriais com soldas de filete, foi observado que a ZAC não apresentará trincas se a dureza de um aço com características de 700 MPa for inferior a 400 Vickers (AWS D1.1, 2020).

3 METODOLOGIA

Nesta etapa foram descritos os materiais, equipamentos, métodos e técnicas utilizadas para a realização do projeto. A Figura 9 mostra o fluxograma das atividades.

Figura 9: Fluxograma das atividades



Fonte: O autor (2024).

3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1.1 Metal base

A matéria prima para fabricação dos corpos de prova que foram utilizados para ao estudo foram disponibilizados pela empresa STARK Industrial, os equipamentos que foram utilizados para preparação das amostras e realização dos testes, foram disponibilizados pela FAHOR.

O material das amostras é o aço Strenx 700, aço é do tipo de alta resistência, obtido através do processo de laminação a quente com espessura de 4,5 mm. As amostras terão dimensões de 100 x 220 x 4,5 mm, preparadas através de corte

utilizando serra com fluido refrigerante, para evitar alterações nas características do material. A composição química do material será verificada através de uma análise por espectrômetro de massa. As propriedades mecânicas do Strenx 700, foram obtidas através de informações fornecidas pelo fabricante SSAB e estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4: Propriedades mecânicas Strenx 700.

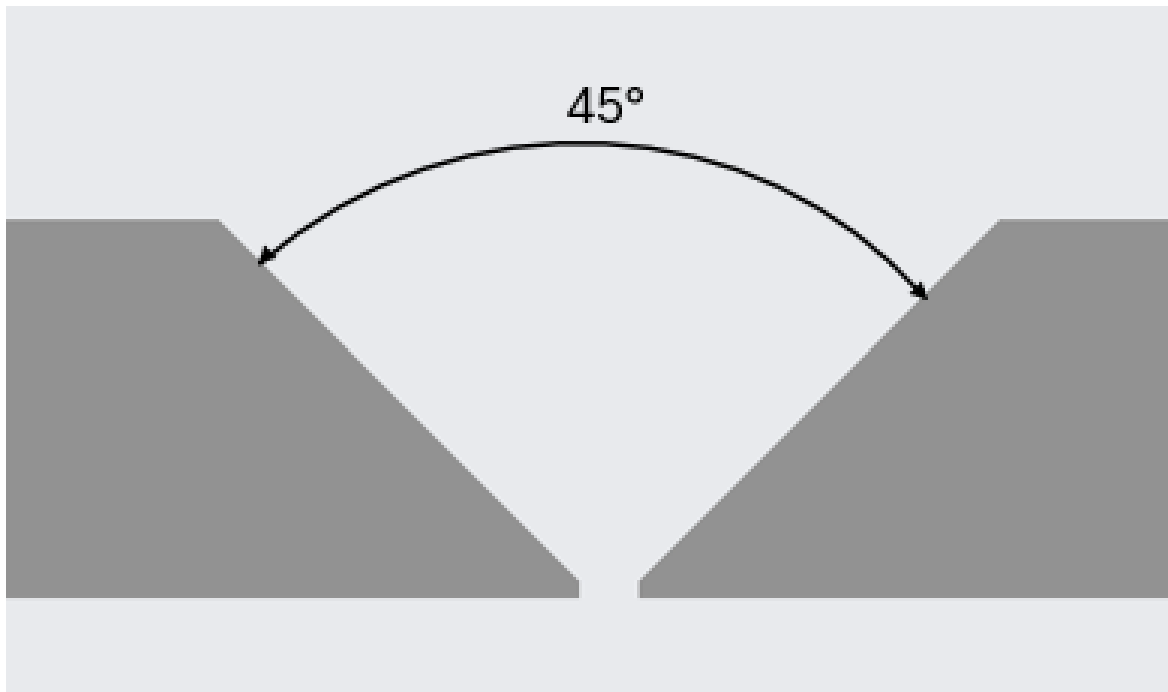
Limite de escoamento (min MPa)	Resistência à tração (min MPa)	Alongamento (min %)
700	1000-1200	7

Fonte: Adaptado site SSAB (2024).

3.1.2 Procedimento de soldagem

O tipo de junta soldada foi do tipo junta de topo, com duas chapas do MB com chanfro de ângulo 45° , conforme a Figura 10, soldadas na posição plana, soldadas através do processo de soldagem MAG robotizada. Todos os cordões de solda foram realizados com ângulos de trabalho e deslocamento de 0° e a distância do bico até a peça de 15 mm. A Figura 11 mostra a fixação das peças na posição plana.

Figura 10: Junta corpos de prova.



Fonte: O autor (2024).

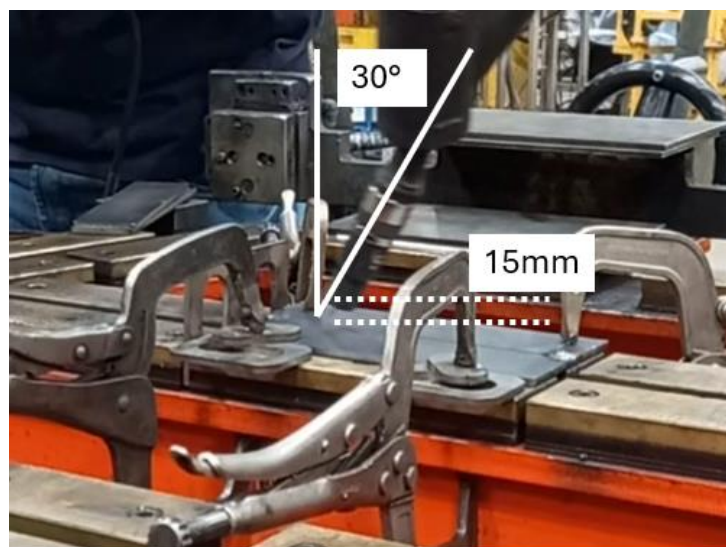
Figura 11: Posição de soldagem



Fonte: O autor (2024).

Para soldagem as peças foram posicionadas em uma posição plana, com espaçamento entre elas de 2 mm, os cordões foram executados em uma posição plana com a tocha do robô posicionada a 30° em relação as peças e a uma distância de 15 mm, conforme ilustrado na Figura 12. O modo de transferência de material foi do tipo pulsado. Houve aplicação de solda em apenas um dos lados da peça.

Figura 12: Posição da tocha de soldagem em relação ao eixo de solda



Fonte: O autor (2024).

A análise dos resultados foi realizada através da verificação em laboratório, onde os corpos de prova, foram seccionados, embutidos, lixados e atacados quimicamente com Nital (5%) para revelar a microestrutura do material.

Para o ensaio de metalografia foram soldados dois corpos de prova, um para o metal de adição ER70S-6 e um com metal de adição ER110C-G H4, todos soldados com os mesmos parâmetros.

Para soldagem optou-se pelo robô de soldagem da marca Yaskawa. O gás de proteção utilizado possui uma mistura composta por 82% Ar e 18% CO₂. A fonte de soldagem utilizada é da marca Lincoln R450 Power Wave, com capacidade de soldagem em curto-circuito, arco elétrico pulsado, com saída de corrente de até 550 A, na Tabela 5, podemos verificar as características da fonte.

Tabela 5: Características da fonte de solda

Processo	Corrente Nominal de Saída	Tensão	Ciclo de Serviço	Potência de Saída
GMAW	550	41,5	40%	550A
GMAW	450	35,5	100%	550A
GTAW-DC	550	32	40%	550A
GTAW-DC	450	28	100%	550A

Fonte: Adaptado site Lincoln (2024).

Os metais de adição utilizados foram da marca Lincoln modelo AWS A5.18 ER70S-6 e AWS A5.28 ER110C-G H4 com diâmetro de 1,20 mm. O primeiro consumível apresenta menor resistência mecânica que o MB, e o segundo apresenta maior resistência mecânica que o MB. Na Tabela 6 consta a composição química dos metais de adição conforme o fabricante. Na Tabela 7 consta as propriedades mecânicas dos metais de adição conforme o fabricante.

Tabela 6: Composição química dos metais de adição.

Metal de Adição	Elementos Químicos (% massa)									
	C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	Cu	V	S	P
AWS ER70S-6	0,098	0,026	0,015	0	1,21	0,67	0,117	0,004	0,016	0,007
AWS ER110C G H4	0,15	0,35	2	0,45	1,45	0,45	0,02	0,01	0,01	0,01

Fonte: Adaptado site Lincoln (2024).

Tabela 7: Propriedades mecânicas dos metais de adição.

Metal de Adição	Propriedades mecânicas		
	Limite de Resistência a Tração (MPa)	Limite de escoamento (MPa)	Alongamento (%)
AWS ER70S-6	480	400	22
AWS ER110C G H4	760	690	20

Fonte: Adaptado site Lincoln (2024).

Para soldagem das amostras foram utilizados os parâmetros conforme a Tabela 8, esses parâmetros foram obtidos de acordo com as recomendações do fabricante, variando somente o metal de adição.

Tabela 8: Parâmetros empregados para realização da soldagem.

Tensão Média (V)	Corrente Média (A)	Velocidade de Soldagem (mm/s)	Energia de Soldagem (kJ/mm)
26	220	8,14	0,702

Fonte: O autor (2024).

3.1.3 Preparação dos corpos de prova após a soldagem

Após a soldagem dos corpos de prova, todos foram inspecionados visualmente a fim de identificar possíveis descontinuidades como, trinca, mordedura, porosidade. Nenhuma das amostras apresentou qualquer descontinuidade, sendo liberadas para análises

Os corpos de prova destinados aos ensaios de tração foram usinados para se ajustarem às dimensões padronizadas antes de serem enviados ao laboratório, onde foram submetidos à tração para a obtenção dos resultados. Para a avaliação da macroestrutura e microdureza do material, os corpos de prova foram preparados e encaminhados para a análise laboratorial. Após serem submetidos a uma etapa de limpeza que envolveu escovação, as amostras foram embutidas em resina, seguidas por processos de lixamento, polimento e ataque com Nital (3,5%). Para preparar os corpos de prova foram utilizados os seguintes equipamentos.

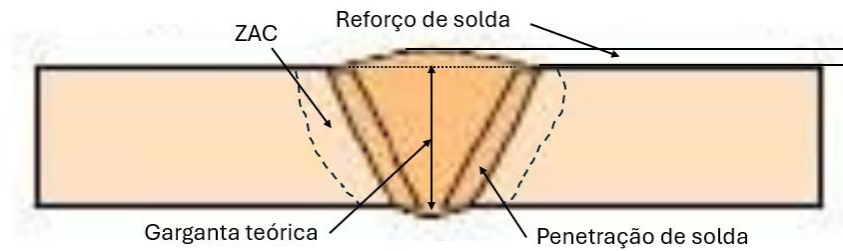
- Máquina para corte da marca Discoton-2;
- Máquina para polimento modelo Ecomet-4;
- Microscópio Olympus BX51M com ampliação de até 1000 vezes;
- Microdurômetro, modelo Shimadzu com capacidade de carga de 0,015 a 1000g;
- Máquina de tração EMIC modelo DL 10000, com capacidade máxima de 100 kN, onde a capacidade utilizada foi de 40 toneladas.

A análise da ZAC e perfil de dureza ocorrem através da captura de uma imagem ampliada da região da junta soldada com o auxílio de um microscópio.

3.2 MÉTODOS E TÉCNICAS

Com base na fundamentação teórica, foi elaborado o projeto experimental, no qual foram avaliados os parâmetros geométricos, tais como microdureza, ZAC, reforço, garganta teórica e penetração de solda, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13: Parâmetros geométricos do cordão

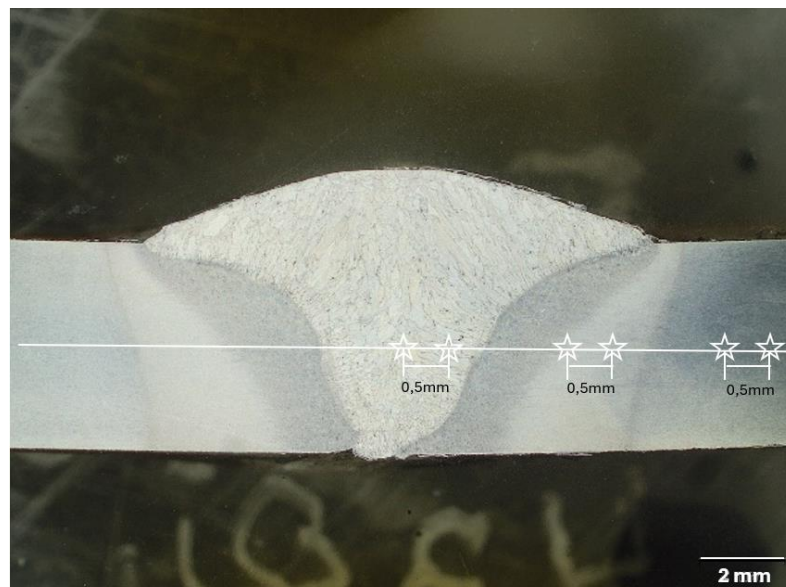


Fonte: O autor (2024).

Na revisão de literatura foram definidos os parâmetros de soldagem que seriam utilizados a fim de obter-se o melhor desempenho que teriam maior influência nos critérios citados acima. Os parâmetros utilizados foram: tensão, velocidade de soldagem, corrente e velocidade de alimentação do arame.

Para verificação da microdureza, foi utilizado o microdurometro, as medições foram realizadas com cargas de 1 kg a cada 0,5 mm no metal base e no metal de solda, mantendo se essa distância na ZAC, medindo 2,25 mm da borda da chapa, com isso criando um perfil de microdureza. A medição da microdureza foi realizada apenas em 6 pontos de uma das regiões seccionados. A Figura 14 apresenta os locais onde foram medidos os perfis de microdureza, para um dos tipos de arame.

Figura 14: Perfil de microdureza

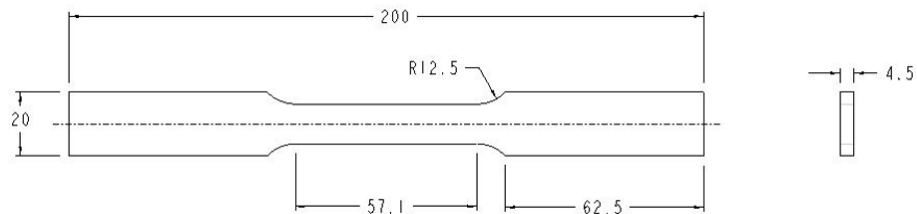


Fonte: O autor (2024).

A avaliação da ZAC e da geometria envolve a obtenção de uma imagem ampliada da área da junta soldada por meio da utilização de um microscópio. Para realização do ensaio de tração, foram soldados doze corpos de prova, sendo seis com o metal de adição ER70S-6 e seis com metal de adição ER110C-G H4, todos soldados com os mesmos parâmetros.

As amostras foram cortadas com o processo de serra fita no dimensional próximo ao desejado, posteriormente foram fresados a fim de deixar nas dimensões de acordo com a norma, a fim de obter-se o melhor resultado nos testes. O dimensional das amostras seguiu a norma ASTM E8/E8M, assim como a forma de fixação da máquina que realizou os ensaios. Na Figura 15 apresenta o dimensional conforme a norma e na Figura 16 os corpos de prova preparados para o ensaio de tração.

Figura 15: Dimensional corpo de prova ensaio de tração



Fonte: O autor (2024).

Figura 16: Corpos de prova ensaio de tração



Fonte: O autor (2024).

Oito corpos de prova foram soldados para o ensaio de dobramento, sendo quatro com metal de adição ER70S-6 e quatro com metal de adição ER110C-G H4, todos soldados com os mesmos parâmetros.

As amostras foram cortadas com o processo de serra fita no dimensional especificado na metodologia, posteriormente foi realizado o processo de lixamento do reforço do cordão a fim de obter-se o melhor resultado nos testes. Os corpos de prova foram levados a prensa para realizar o ensaio de dobramento, foram utilizados dois corpos de prova para dobramento na raiz e dois corpos de prova para dobramento de face em cada um dos metais de adição AWS ER70S-6 e AWS ER110C-G H4. Na Figura 17 os corpos de prova preparados para o ensaio.

Figura 17: Corpos de prova para ensaio de dobramento



Fonte: O autor (2024).

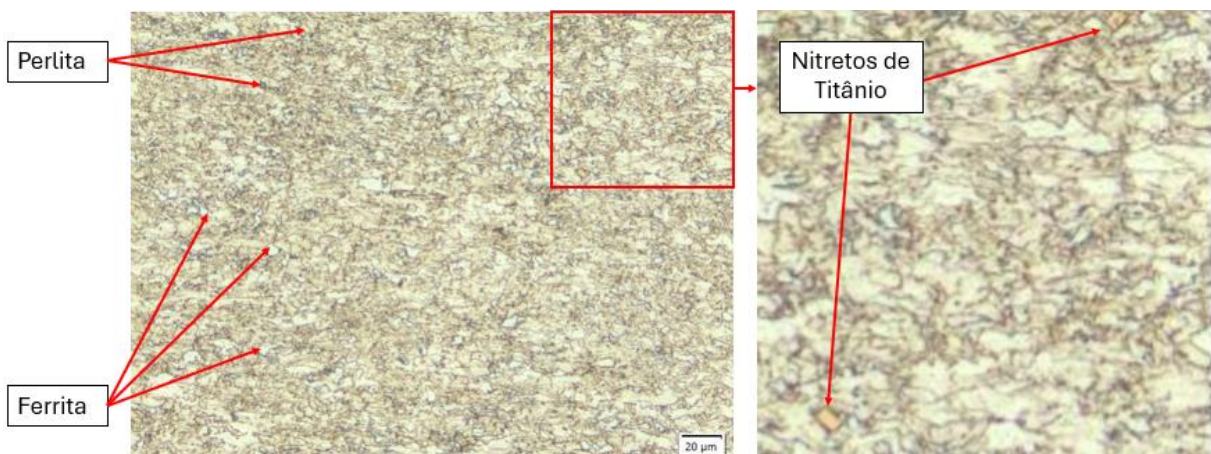
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADO

4.1 AMOSTRAS

4.1.1 Análise química do metal base

A microestrutura do aço strenx 700 é composta por ferrita, disposta em grãos irregulares muito finos que estão alongados na direção de laminação em consequência do processamento termomecânico. Há também uma pequena quantidade de perlita. Esta microestrutura refinada é consequência da presença de finos precipitados, que durante a laminação controlada retardam o crescimento dos grãos. A identificação dos precipitados não é possível de ser realizada por microscopia de luz, mas provavelmente são nitretos de titânio. (DALCIN, 2016). Na Figura 18 pode-se verificar esses nitretos de titânio.

Figura 18: Microestrutura de núcleo metal base



Fonte: O autor (2024).

Observa-se que identificamos alguns pontos na microestrutura que são os nitretos de titânio assim como a ferrita e a perlita. Os nitretos de titânio são responsáveis por deixar o material com alta resistência.

A análise química também permite comparar as informações fornecidas pelo fabricante a fim de validar as amostras, conforme podemos verificar na Tabela 9.

Tabela 9: Composição química do metal base

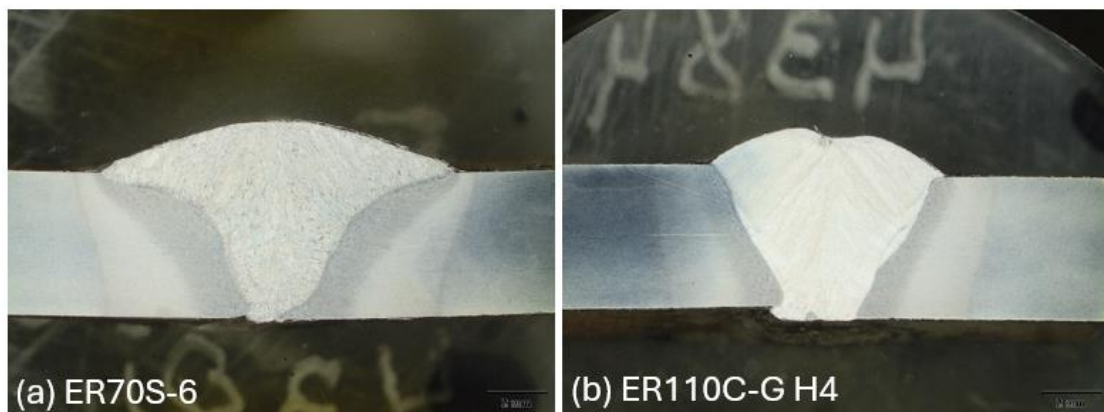
Elemento Químico	Encontrado	Especificado
% C	0,06671	0,12 máx.
% Si	0,06614	0,25 máx.
% Mn	1,7816	2,10 máx.
% P	0,00491	0,020 máx.
% S	0,00402	0,010 máx.
% Ni	0,12463	-----
% Cr	0,07382	-----
% Mo	0,09221	-----
% Cu	0,00394	-----
% Al	0,0905	0,015 mín.
% Nb	0,06007	0,09 máx.
% Ti	0,09578	0,15 máx.
% CE	0,40541	-----

Fonte: O Autor (2024).

De acordo com a composição química encontrada neste aço, é possível concluir que é similar ao Strenx 700MC Plus da SSAB.

4.1.2 Análise das macrografias

Figura 19: Macrografia: (a) AWS ER70S-6; (b) AWS ER110C-G H4



Fonte: O autor (2024).

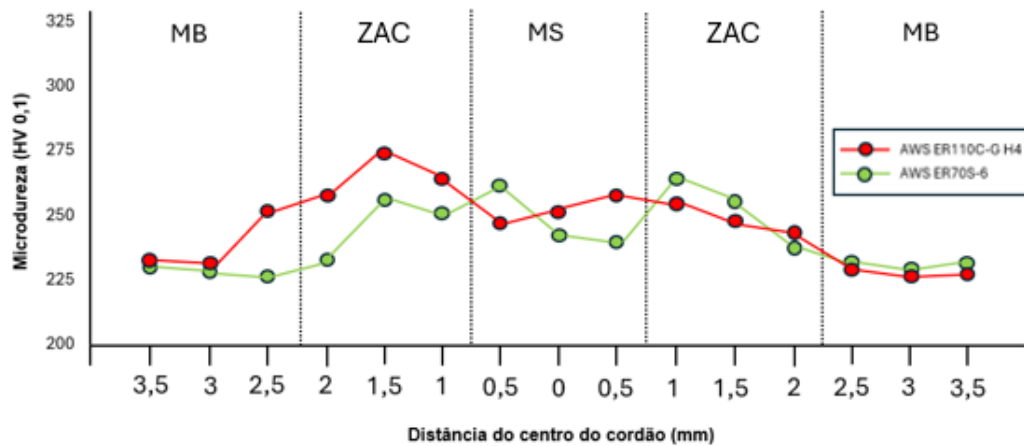
As macrografias das juntas soldadas com os consumíveis AWS ER70S-6 e AWS ER110C-G H4, conforme Figura 19, analisa-se que todas as juntas soldadas apresentaram penetração completa e ZAC similar em ambos os metais de adição.

Na amostra (b), apesar de ter penetração total, a distribuição do metal de adição não é o mesmo, no arame ER70S-6 observa-se que houve uma melhor distribuição de material assim como uma ZAC uniforme em ambos os lados, já para o ER110C-G H4 não temos uma distribuição uniforme.

4.1.3 Análise dos perfis de microdureza

Os perfis de microdureza dos cordões de solda foram medidos de forma transversal nas juntas de solda longitudinais, com o metal de adição AWS ER70S-6 e AWS ER110C-G H4, mantendo os parâmetros iguais. A Figura 20 apresenta os resultados da microdureza nos corpos de prova, ambos com energia de soldagem 0,702 kJ/mm.

Figura 20: Perfil de microdureza nos corpos de prova.



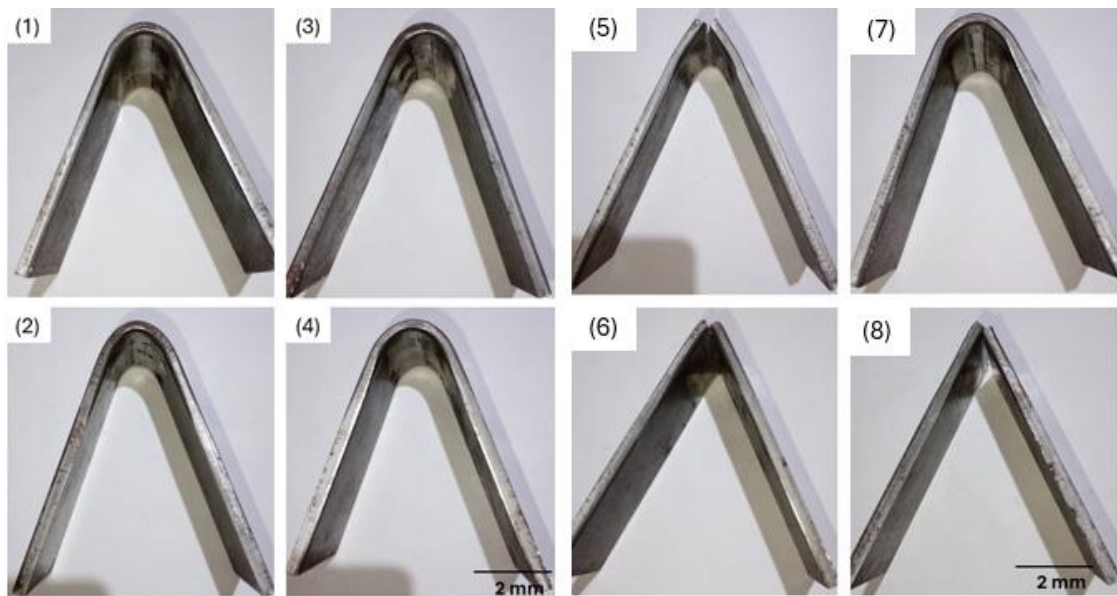
Fonte: O autor (2024).

Observa-se que a microdureza no MB apresenta pouca variação em relação com os dois tipos de consumíveis, como foi utilizado uma energia de soldagem intermediária, ou seja, nem muito alta, nem muito baixa, confirma-se os dados levantados na revisão bibliográfica. Na região da ZAC a variação da dureza foi maior e demonstrou-se instável. Já no metal de adição observou-se que a variação de dureza foi maior, de acordo com os dados da revisão bibliográfica, onde demonstra que o metal de adição ER70S-6 possui uma dureza menor do que o ER110C-G H4.

4.1.4 Análise dos ensaios de dobramento

A Figura 21 apresenta os corpos de prova soldados que foram submetidos ao ensaio de dobramento. As amostras de 1 a 4 foram soldadas com o metal de adição AWS ER70D-6 e as amostras 5 a 8 foram soldadas com o metal de adição AWS ER110C-G H4. As amostras 1 e 3, 5 e 7 foi aplicado o ensaio tracionando a raiz do cordão e as amostras 2 e 4, 6 e 8, tracionando a face do cordão de solda.

Figura 21: Amostras após ensaio de dobramento



Fonte: O autor (2024).

Após os ensaios de dobramento, foi inspecionado individualmente cada amostra. Os resultados encontrados para os corpos de prova com o metal de adição AWS ER70S-6 foram satisfatórios, onde pode verificar-se a penetração completa sem presença de trincas ou fissuras. Nas amostras do metal de adição AWS ER110C-G H4 os resultados encontrados não foram satisfatórios, com exceção da amostra três, onde ela obteve penetração completa sem presença de trinca ou fissura. De acordo com a norma ASTM E8/E8M de dobramento, para a amostra ser aprovada, não pode ocorrer quebra na face ou na raiz, quando ocorreu nas amostras, elas se tornaram reprovadas.

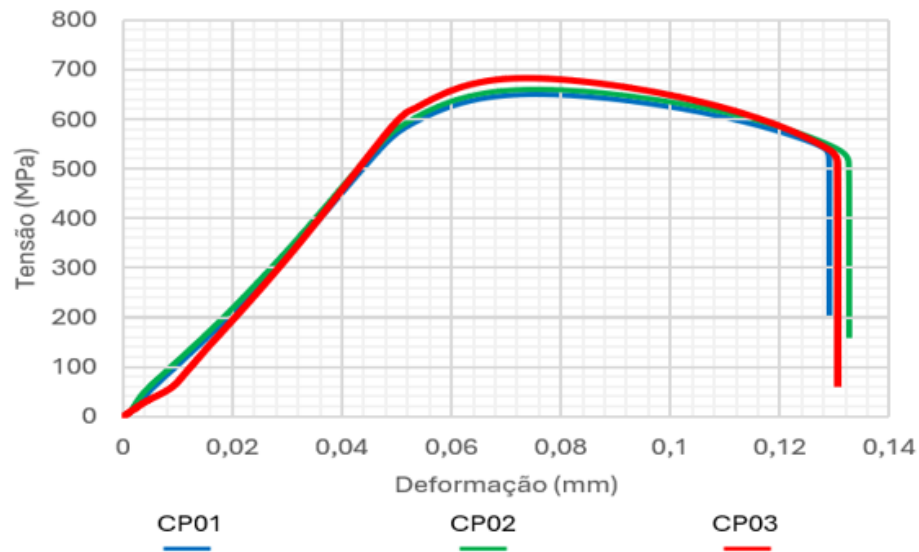
Ainda analisando as amostras do metal de adição AWS ER110C-G H4, aquelas que falharam durante o ensaio, observou-se que elas não obtiveram penetração completa, gerando assim uma fragilidade no material. A amostra três que não apresentou falha, estava em um ponto mais central do corpo de prova, onde o metal

base já estava sob o aquecimento do processo de soldagem, com isso, aumentou a ZAC.

4.1.5 Análise dos ensaios de tração

Na Figura 22 demonstra o gráfico de tensão x deformação das amostras soldadas com o metal de adição AWS ER70S-6.

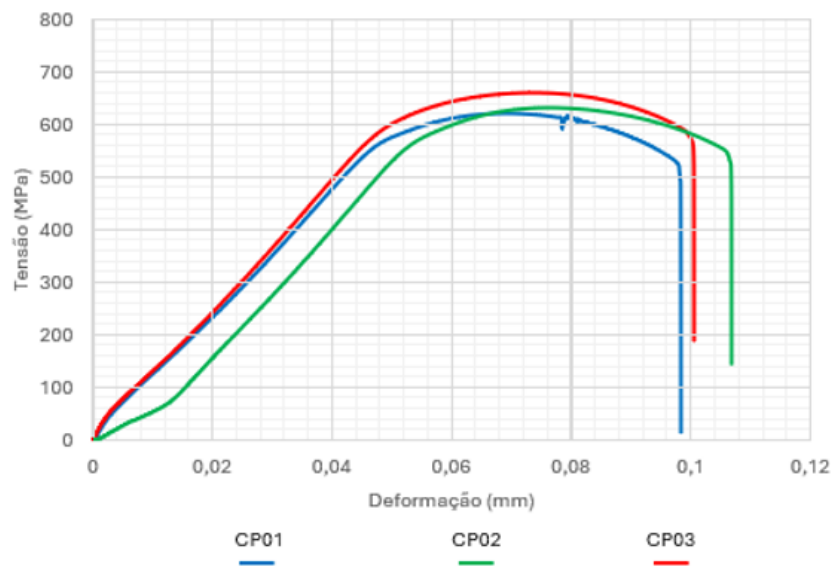
Figura 22: Tensão x Deformação AWS ER70S-6



Fonte: O autor (2024).

Na Figura 23 demonstra o gráfico de tensão x deformação das amostras soldadas com o metal de adição AWS ER110C-G H4.

Figura 23: Tensão x Deformação AWS ER110C-G H4



Fonte: O autor (2024).

Com estes dados pode-se considerar que estão dentro do padrão aceitável, tanto do metal base quanto dos metais de adição.

4.1.6 Região da fratura dos corpos de prova do ensaio de tração

Na Figura 24 é possível verificar que os corpos de prova das juntas soldadas com o metal de adição AWS ER70S-6, romperam bem próximo à solda, ou seja, a fratura ocorreu na ZAC, como avaliado no perfil de microdureza é a região que apresentou uma dureza mais elevada.

Figura 24: Corpos de prova de tração (AWS ER70S-6)



Fonte: O autor (2024).

Nos corpos de prova soldadas com o metal de adição AWS ER110C-G H4, a fratura também ocorreu na região próxima a solda, na ZAC, ou seja, teve resultados similares ao do metal de adição AWS ER70S-6. Como podemos verificar na Figura 25.

Figura 25: Corpo de prova de tração (AWS ER110C-G H4)



Fonte: O autor (2024).

4.2 DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS

Na Tabela 10, está demonstrado os dados que foram encontrados.

Tabela 10: Dados coletados

	AWS ER70S-6	AWS ER110C-G H4
	Encontrado	Encontrado
Limite de escoamento (MPa)	600	610
Resistência a Tração (MPa)	690	680
Alongamento (%)	9,1	5,92
Dureza ZAC (HV)	251,28	257,91
Dureza Cordão de Solda (HV)	249,97	252,05
Dureza Metal Base (HV)	228,35	240,1

Fonte: O autor (2024).

A análise dos resultados traz que as soldas realizadas com o metal de adição AWS ER70S-6 mostraram dados superiores ao que o fabricante informa para limite de escoamento e resistência a tração. Porém quando analisado a porcentagem de alongamento, coletado durante o ensaio de tração, ficou bem abaixo do mínimo informado pelo fabricante.

Ao analisar o metal de adição AWS ER110C-G H4 verificou-se que os dados encontrados ficaram bem abaixo do que o fabricante informa, justifica-se isso pois o fabricante recomenda o pré-aquecimento do metal base, a fim reduzir a formação martensítica que se forma na ZAC, mesmo assim os resultados ficaram parecidos com os encontrados no metal de adição AWS ER70S-6.

A análise dos resultados de dureza indica que a escolha do consumível influencia diretamente a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas da junta soldada. Mesmo que não tenha sido executado o pré-aquecimento do metal base, observa-se que para atingir o mínimo recomendado, devemos soldar com os metais de adição corretos.

Quanto a ductibilidade da junta soldada, as soldas realizadas com o metal de adição AWS ER70S-6 mostraram maior alongamento (9,1%), concluiu-se ter uma

melhor ductibilidade em comparação com o metal de adição AWS ER110C-G H4 (5,9 %).

Quando comparado os dados referentes a resistência à tração, tanto as soldas realizadas com o metal de adição AWS ER110C-G H4 e com o metal de adição AWS ER70S-6, apresentaram resistência a tração bem similares (690 e 680 MPa) respectivamente.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que a escolha do consumível tem um impacto significativo nas propriedades mecânicas da junta soldada. O consumível AWS ER110C-G H4, embora mais caro, proporciona melhores resultados em termos de resistência à tração e ductilidade, enquanto o AWS ER70S-6, de menor custo, mostrou-se menos eficaz, com uma maior incidência de descontinuidades e falhas na zona afetada pelo calor (ZAC).

Este estudo contribui significativamente para a compreensão da influência dos consumíveis na soldagem do aço Strenx 700, um material de alta resistência amplamente utilizado em aplicações estruturais. Através de análises detalhadas de dureza, resistência à tração e microestrutura, foi possível identificar as vantagens e limitações de cada consumível, fornecendo uma base sólida para futuras pesquisas e aplicações industriais.

Em suma, a pesquisa realizada demonstra a importância de se considerar não apenas o custo, mas também a performance dos consumíveis de solda na fabricação de estruturas de aço de alta resistência. A escolha de consumíveis adequados, como o AWS ER110C-G H4, é fundamental para garantir a integridade estrutural e a longevidade das juntas soldadas, contribuindo para a segurança e a eficiência das operações industriais.

Este trabalho também abre caminho para futuras pesquisas. Estudos subsequentes podem explorar a utilização de outros tipos de consumíveis e métodos de soldagem, bem como a otimização dos parâmetros de soldagem, como a corrente e a velocidade de soldagem, para maximizar a eficiência e a qualidade das juntas soldadas. Além disso, investigações sobre o impacto de diferentes tratamentos térmicos pós-soldagem poderiam fornecer insights adicionais sobre como melhorar ainda mais a resistência e a durabilidade das soldas em aços de alta resistência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, R. P. **Tecnologia Mecânica: metalurgia da soldagem, soldabilidade dos materiais**. Minas Gerais: Editado pelo autor, 2007.

BERGER, D. R. **Determinação dos melhores parâmetros de processo para a soldagem robotizada do aço LNE 700**. Trabalho de final de curso, FAHOR, 2012.

BRANDÃO, J. E. **Tecnologia da Soldagem**. 1 ed. Belo Horizonte, 2021.

BRANDI, S. D.; WAINER E.; MELLO, F. D. H. **Soldagem: Processos e metalurgia**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2004. p. 99- 132.

DALCIN. R. L. **Efeitos da energia de soldagem e consumíveis sobre a resistência à flexão de juntas “T” soldadas em perfis tubulares**. Dissertação de Mestrado. - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

DOKUMEN. **Metallurgical Modelling of Welding**. Disponível em: <<https://dokumen.pub/metallurgical-modelling-of-welding-2-ed-9781591249610-1591249619-9781861250360-1-86125-036-3.html>> Acesso em 24 de março de 2024;

ESTRELA, C. **Metodologia Científica**. 3 ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 2018.

GIMENES JR, L.; RAMALHO, J. P. **Conceitos de soldagem MIG/MAG**. 1º ed, São Paulo: 2005, 65p

He, Y. et al. (2018). **Effects of microstructural features on the mechanical properties of 700 MPa grade dual-phase steels**. Materials Science and Engineering: A, 712, 11-19. doi: 10.1016/j.msea.2017.11.005

INFOSOLDA. Disponível em: < <https://infosolda.com.br/>> Acesso em 12 de abril de 2024;

MARQUES. P. V.; MODENESI. P. J.; BRACARENSE. A. Q. **Soldagem: Fundamentos e tecnologia**. 3 ed. Atualizada. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.

Soldagem I: Descontinuidades e inspeção em juntas soldadas. Belo Horizonte: Editado pelo autor, 2001.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman Editora LTDA, 2013.

PAIT, R. P. **Welding energy and its effect on weld metal toughness**. Welding Journal, vol. 89, no 7, 2010, pp. 32-36.

PRIMO, J. **Ensaio não destrutivo**. 1 ed. Sorocaba, 2023.

PROCHENKA, P. **Assessment of Mechanical Properties of Laser Beam Welded Joints Made of Steel Strenx S700MC Subjected to High Impact Load**. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa. N° 2. 2018.

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

SANTOS, J. C., et al. **Evaluation of Mechanical Properties of Welded Joints in Steel S460N**. Procedia Manufacturing, vol. 10, 2017, pp. 826-833.

SILVA, A. L.; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. 3 ed. São Paulo, 2010.

SILVA, V. P.; PANNONI, F. D. **Estrutura de Aço para Edifícios**. 1 ed. São Paulo, 2010.

SMITH, J. **Challenges in Welding Strenx 700 Steel**. International Journal of Welding and Joining, vol. 15, no. 2, 2022, pp. 45-56.

SSAB TUNNPLAT. **Sheet steel joining handbook: joining of high strength steels**. Sweden: SSAB Tunnplat AB, 2004.

SUMIG. **Tudo que você precisa saber sobre o processo de soldagem MIG/MAG**. Disponível em < <https://www.sumig.com/pt/blog/post/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-processo-de-soldagem-mig-mag> > Acesso em: 09 de abril de 2024.

TONEL, Pablo. **Análise das propriedades mecânicas de juntas soldadas sobre o aço TMCP com consumíveis Undermatching e Overmatching**. Trabalho de final de curso, FAHOR, 2016.

WANG, Z., et al. **Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Joints**. Materials Science and Engineering: A, vol. 527, no. 29-30, 2010, pp. 7914-7922.