

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DA MECANICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANA CAROLINA GOULART PITOLI

**CARACTERIZAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA DE 410 NiMo UTILIZANDO O
PROCESSO DE SOLDAGEM TIG**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

ANA CAROLINA GOULART PITOLI

**CARACTERIZAÇÃO DO CORDÃO DE SOLDA DE 410 NiMo UTILIZANDO O
PROCESSO DE SOLDAGEM TIG**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento da Engenharia Mecânica – DAMEC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Prof^a M^a Émillyn Ferreira Trevisani Olivio.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Mecânica
Curso de Engenharia Mecânica

FOLHA DE APROVAÇÃO

Ana Carolina Goulart Pitoli

**CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO DE 410 NiMo UTILIZANDO O
PROCESSO DE SOLDAGEM TIG**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 19h do dia 07/06/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Me(a). Émillyn Ferreira Trevisani Olivio - (Orientadora)

Prof(a). Carlos de Nardi - (Membro)

Prof(a). Genesio Lopes da Silva - (Membro)

Dedico este trabalho aos meus pais, familiares, meu namorado e amigos.

AGRADECIMENTOS

Para conseguir concluir este trabalho contei com a ajuda de muitas pessoas, sem elas eu não teria conseguido.

Primeiramente agradeço a Deus, pois sem ele nada disso seria possível. Agradeço a minha mãe, pelo apoio, companheirismo, compreensão e principalmente pela paciência durante todo esse período da universidade. Agradeço ao meu pai pelos valores passados e por me ensinar a buscar o que eu quero. Agradeço ao meu namorado Thiago por ter me incentivado em muitos momentos e pelo apoio nos momentos em que pensei que não iria conseguir. Também agradeço aos meus familiares por torcerem pelas minhas conquistas.

Agradeço a minha orientadora Émillyn por ter aceitado me orientar, pelo apoio e ajuda sempre que precisei durante esse período de execução do meu trabalho.

Agradeço aos funcionários da empresa JC Soldagens, para a realização procedimento de soldagem.

Agradeço meus amigos Adriano, Bruna, Bruno, Estevão, Jessika, José Mario, Leonardo, Marcus, Kaio, Paola, Ricardo entre outros amigos por terem me apoiado nos momentos ruins e pelos momentos de alegria que compartilhamos.

Por muitas vezes pensei em desistir, mas nessas vezes sempre tive o apoio de um ombro amigo para que não me deixassem desistir.

“De peito aberto e cabeça erguida segui em frente até conquistar os meus objetivos”

(Ana Carolina Goulart Pitoli)

RESUMO

PITOLI, Ana Carolina Goulart. *Caracterização do revestimento de 410 NiMo utilizando o processo de soldagem TIG*. 2016. 42f. Trabalho de Conclusão de Curso – Programa de Graduação de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

As pás das turbinas utilizadas nas hidrelétricas sofrem desgastes e por consequência o aparecendo de trincas. Essas pás necessitam de reparos para que haja segurança e eficiência no desempenho. Esse reparo pode ser feito a partir da deposição de material por procedimento de soldagem. Este trabalho estuda os parâmetros do processo de soldagem TIG com alimentação de vareta, para que seja realizado o procedimento de reparo. Os corpos de prova foram retirados de uma pá de turbina feita com aço inoxidável martensítico macio CA6NM e soldado com a adição de eletrodo ER410NiMo. O objetivo é avaliar a qualidade da solda através do ensaio de líquidos penetrantes e estimar os parâmetros na dureza dos cordões e da ZTA, além da avaliação da presença de ferrita na microestrutura.

Palavras-chave: Aços Inoxidáveis, TIG, CA6NM.

ABSTRACT

PITOLI, Ana Carolina Goulart. *Characterization of the 410 NiMo coating using TIG process of welding*. 2016. 42f. Undergraduate Work - Mechanical Engineering Undergraduate Program, Federal University of Technology – Parana. Cornélio Procópio, 2016

The turbine blades used in hydroelectric plants suffer from erosion and the consequent appearance of cracks. These blades need repairs in order to guarantee the safety and efficiency of its work. Such repairs can be done using the process of material deposition by welding procedure. The present work studies the parameters of the TIG welding process with rod feeding for the execution of the repair procedure. The samples were obtained from a turbine blade made of soft martensitic stainless steel CA6NM, and welded adding ER410NiMo electrode. The objective is to evaluate the weld quality through the liquid penetrant test, and also estimate the parameters on the weld bead hardness and on the Heat-affected zone (HAZ), plus the verification of the presence of ferrite in the microstructure.

Keywords: Stainless Steel, TIG, CA6NM

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Influência do percentual de Carbono na dureza da solda	18
Figura 2: Localização do aço CA6NM no diagrama de Scheaffler.	19
Figura 3: Soldagem TIG	21
Figura 4: Corpo de prova	26
Figura 5: Máquina de solda TIG	28
Figura 6: Pré-aquecimento com maçarico.....	29
Figura 7: Corpo de prova depois de realizado o passe de soldagem.....	30
Figura 8: Ensaio de Liquido Penetrante	32
Figura 9: Pontos de indentação	33
Figura 10: Valores de dureza do corpo de prova desde o topo até o metal de base.	34
Figura 11: Cordão de solda.....	35
Figura 12: Tamanho da área de reforço e da área de penetração.....	35
Figura 13: Imagem do cordão de solda após o ataque químico.....	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Tipo de corrente e gás para os materiais	24
Quadro 2: Parametros para soldagem	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição química material CA6NM	17
Tabela 2: Propriedades do material ASTM A 743 CA6NM.....	17
Tabela 3: Composição química material CA6NM.....	25
Tabela 4: Composição química do aço 410NiMo.....	27
Tabela 5: Valores de microdureza.....	33
Tabela 6: Valores de média e desvio padrão.....	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	12
1.1.1. Objetivo Geral.....	12
1.1.2. Objetivo Específico	13
1.2. JUSTIFICATIVAS	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. AÇOS INOXIDÁVEIS.....	14
2.2. AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS	15
2.3. AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO CA6NM.....	16
2.3.1. Soldabilidade do Aço Inoxidável CA6NM	18
2.4. VARETA DE AÇO INOXIDÁVEL SUPERMARTENSÍTICO ER410 NIMO....	20
2.5. PROCESSO DE SOLDAGEM TIG	20
2.5.1. Eletrodo Utilizado na Soldagem TIG.....	22
2.5.2. Parâmetros de Soldagem	22
3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	25
3.1. OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E METODO DE SOLDAGEM	25
3.1.1. Material de Base	25
3.1.2. Material de Adição.....	26
3.2. EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM.....	27
3.2.1. Condições de Soldagem.....	28
3.3. ANÁLISES REALIZADAS NO CORPO DE PROVA	30
3.3.1. Ensaio de Líquidos Penetrantes	30
3.3.2. Microdureza Vickers	31
3.3.3. Microscopia Ótica	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1. ENSAIO DE LIQUIDO PENETRANTE	32
4.2. ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS.....	32
4.3. ANALISE DE MACROGRAFIA.....	35
4.4. ANALISE DE MICROSCOPIA ÓTICA	36
5. CONCLUSÕES	37
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

Na indústria é muito comum encontrar falhas causadas pelos desgastes decorrente do tempo de utilização dos equipamentos e peças, porém com o avanço dos estudos descobriu-se maneiras de recuperar as trincas causadas por esses desgastes nessas peças ou equipamentos.

No ramo industrial onde mais se encontra trincas ocasionadas por desgaste é na geração de energia, essas trincas ocorrem nas pás das turbinas hidráulicas. Essas trincas são os problemas contantes encontrados na manutenção. Isso justifica os estudos para a recuperação dessas trincas com o objetivo de diminuir os prejuízos causados devido as paradas para manutenção (BEHENE, 2014).

O processo de soldagem TIG é muito utilizado para esse tipo de recuperação, nesse trabalho será estudado os efeitos da deposição de um material com a composição semelhante ao metal de base visando melhorias na recuperação de trincas.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Avaliar a influência no metal de solda e na zona termicamente afetada (ZTA) pelo processo de soldagem TIG para a soldagem de um aço inoxidável martensítico macio CA6NM com alimentação de vareta de aço 410 NiMo.

1.1.2. Objetivo Específico

Efetuar uma avaliação dos cordões de solda buscando avaliar as características e propriedades do corpo de prova. Para tanto serão realizados os seguintes ensaios e caracterizações:

- Líquido penetrante
- Dureza Vickers
- Macrografia
- Microscopia Ótica

1.2. JUSTIFICATIVAS

A recuperação de trincas pode ter inúmeras vantagens se utilizado o processo de soldagem TIG, sendo a principal delas uma menor zona termicamente afetada (ZTA). É na ZTA onde ocorre a transformação de fases e fragilização do material (BEHENE, 2014).

As trincas causadas por fadiga geralmente ocorrem na ZTA, uma vez que nessa região encontra-se maior concentração de ferrita, fase onde a concentração de carbono é maior e, portanto, mais frágil (BEHENE, 2014).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. AÇOS INOXIDÁVEIS

Aço inoxidável é o nome dado aos constituintes de um grupo de alta liga, formadas por ferro (Fe), carbono (C) e cromo (Cr), sendo que em sua composição deve conter no mínimo 10,5% de cromo. Essa concentração de Cromo permite a formação de um filme passivo de óxido, prevenindo a oxidação e corrosão do metal, protegendo o material em ambientes corrosivos (BEHENE, 2014). Há uma grande variedade de aços inoxidáveis com níveis progressivamente maiores de resistência a corrosão, isso é resultado da adição controlada de elementos de liga, cada um atribuindo características em relação à resistência mecânica (CARBÓ, 2008).

Como características dos aços inoxidáveis têm-se, além da alta resistência à corrosão, tanto em temperatura ambiente quanto a altas temperaturas, pode-se notar alta resistência mecânica, facilidade de conformação, facilidade de limpeza, baixa rugosidade, mantêm suas propriedades mecânicas quando se eleva ou abaixa a temperatura, tem uma favorável relação custo benefício e é um material reciclável (MODENESI, 2001). As características desse material mostram que ele pode ser usado em diversas áreas como, por exemplo, na indústria química, alimentícia, fabricação de alta durabilidade e instrumentos de precisão, entre outras aplicações (BEHENE, 2014).

Os aços inoxidáveis têm varias regulamentações em diversas associações internacionais, como por exemplo, AISI (American Iron & Steel Institute), ISO (International Standards Organization), ASTM (American Society for Testing Materials) e DIN (Deutsche Industrie Norm). Além das especificações regulamentadas alguns fabricantes adaptam os aços para aplicações especiais (CARBÓ, 2008).

Os aços inoxidáveis podem ser soldados, porém exigem procedimentos especiais. Na maioria dos casos, a soldagem gera modificações na microestrutura no metal de solda, de base e na ZTA. Resultando modificações nas propriedades, crescimento de grão e segregações de impurezas (BEHENE, 2014).

Todos os aços inoxidáveis são classificados, independente das especificações, de acordo com a estrutura metalúrgica em três grupos: austenítico, ferrítico e martensítico. Nesse estudo será analisado o aço martensítico.

2.2. AÇOS INOXIDÁVEIS MARTENSÍTICOS

Os aços inoxidáveis martensíticos são formados por ligas de ferro, cromo e carbono, sendo, segundo Mondenesi (2001), suas proporções de 12 a 18% de cromo e entre 0,1 a 0,5% de carbono. Essa concentração de carbono permite a transformação de ferrita em austenita em altas temperaturas e durante o resfriamento a austenita se transforma em martensita, fase onde o carbono se torna frágil e duro (CARBÓ, 2008).

Esses tipos de aços são endurecidos por meio de tratamento térmico, e sua resistência à corrosão é mais baixa, sendo resistente apenas em ambientes não muito agressivos (GASTALDO, 2010). Essa baixa resistência à corrosão é devido ao elevado teor de carbono e menor teor de cromo, o baixo teor de cromo e dos outros elementos de liga deixa o aço inoxidável martensístico mais barato que os outros tipos (BEHENE, 2014).

Para melhorar as propriedades dos aços inoxidáveis martensísticos é utilizado à adição de elementos de liga, cada elemento melhora uma característica no aço. Os elementos mais usados são: cromo, molibdênio, carbono e níquel.

- Cromo

É o principal elemento utilizado para tornar o aço inoxidável. Quando encontrado com teor acima de 10,5% ele gera uma camada fina de filme passivo de óxido, que previne a oxidação. Torna-se uma barreira protetora para o material (BEHENE, 2014).

- Molibdênio

A adição desse elemento na liga gera uma diminuição na taxa de corrosão. Porém deve ser usado com a concentração de 0 a 3% (BEHENE, 2014). Além disso, ele também aumenta a temperabilidade do aço (SCURACCHIO, 2009).

- Carbono

A dureza da martensita está ligada a porcentagem de carbono encontrado no material, então esse elemento deve estar em baixa porcentagem para que não prejudique a soldabilidade (BEHENE, 2014).

- Níquel

Esse elemento aumenta a resistência mecânica, nos processos à quente, a resistência a corrosão e a ductilidade (SCURACCHIO, 2009).

A alta dureza desse material justifica o uso dele na fabricação de peças que exijam uma resistência ao desgaste muito grande, um exemplo seria a fabricação de turbinas hidráulicas (CARBÓ, 2008).

Neste trabalho o aço inoxidável que irá ser utilizado será o aço classificado pela ASTM é A743 grau CA6NM.

2.3. AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO CA6NM

Na década de 60, foi desenvolvida uma categoria de aços inoxidáveis martensíticos chamados de macios, visando melhorar a soldabilidade, com a redução de carbono e adição de níquel. Esses aços tem uma estrutura totalmente martensítica, mesmo no resfriamento lento. Nessa categoria está classificado o aço para estudo desse trabalho, o aço CA6MN (ALLENSTEN, 2007).

As principais razões que motivaram o desenvolvimento dessa nova categoria foram à necessidade de diminuir os defeitos causados durante a solidificação do material, como segregações. Esse problema tinha como resultado peças defeituosas e com baixa soldabilidade, que prejudicava a soldagem (ALLENSTEN, 2007).

Dentro dessa nova categoria de aços inoxidáveis está classificado o aço CA6NM. Onde, segunda a classificação da ASTM, a primeira letra (C) é referente à sua resistência em meio corrosivos, a segunda letra (A) referência o teor de níquel, o numero 6 indica a porcentagem de carbono e as ultimas duas letras correspondem à primeira letra dos elementos de liga do material, nesse metal são (N) Níquel e (M) Molibdênio (ALLENSTEN, 2007).

A composição química do aço CA6NM está na Tabela 1:

Tabela 1: Composição química material CA6NM

COMPONENTES	PESO EM %
C (máx)	0,06
Mn (máx)	1,0
Si (máx)	1,0
Cr	11,5 – 14
Ni	3,5 - 4,5
Mo	0,4 – 1
P (máx)	0,04
Si (máx)	0,03

Fonte: ASTM A 743, 1998.

As propriedades mecânicas do material, segundo a norma da ASTM A743 estão na Tabela 2:

Tabela 2: Propriedades do material ASTM A 743 CA6NM.

	TIPO	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO		RESISTÊNCIA AO ESCOAMENTO	
		Ksi	Mpa	Ksi	Mpa
CA6NM	12cromo, 4 níquel	110	755	80	550

Fonte: ASTM A 743, 1998.

2.3.1. Soldabilidade do Aço Inoxidável CA6NM

Os aços inoxidáveis martensíticos apresentam um baixo teor de carbono, compensado pela adição de níquel para garantir uma maior formação de uma estrutura martensítica com menor retenção de ferrita, com isso sua soldabilidade é baixa. Sua dureza está diretamente ligada com a concentração de carbono mostrado na Figura 1 (BEHENE, 2014).

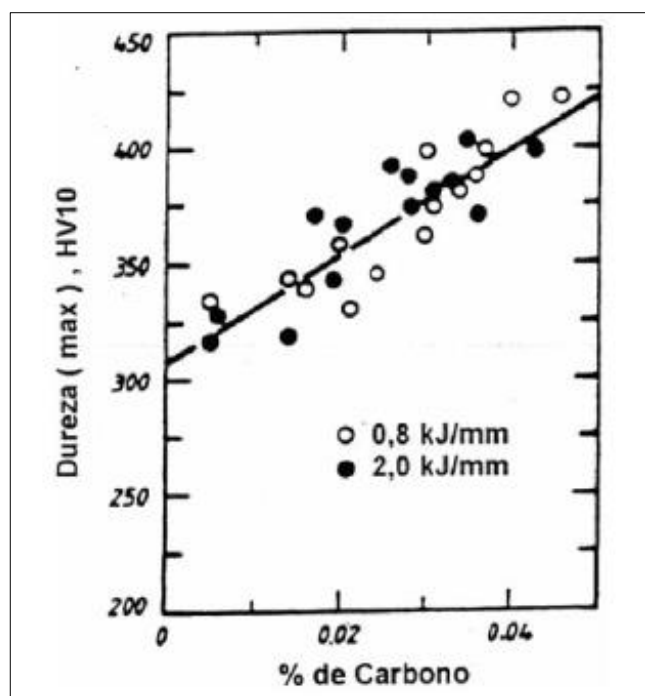


Figura 1: Influência do percentual de Carbono na dureza da solda
Fonte: BEHENE, 2014.

No processo de soldagem a velocidade de resfriamento é alta, então a ferrita não possui tempo suficiente para se transformar em austenita. E por consequência dessa velocidade de resfriamento e dos elementos estabilizadores dessa fase, a austenita se transforma parcialmente em martensita. Tendo como resultado uma estrutura de aço inoxidável martensítico macio composto por martensita e uma quantidade de ferrita, entorno de 20%. Essa austenita é importante para o aumento da tenacidade desse aço (BEHENE, 2014).

Como resultado final a microestrutura de um aço supermartensítico na condição soldada é composta por martensita na presença de austenita e ferrita (BEHENE, 2014).

O aço CA6NM no diagrama de Shaeffler encontra-se próximo a linha de 100% de martensita, porém com baixos teores de ferrita, isso pode ser observado na Figura 2 (BEHENE, 2014).

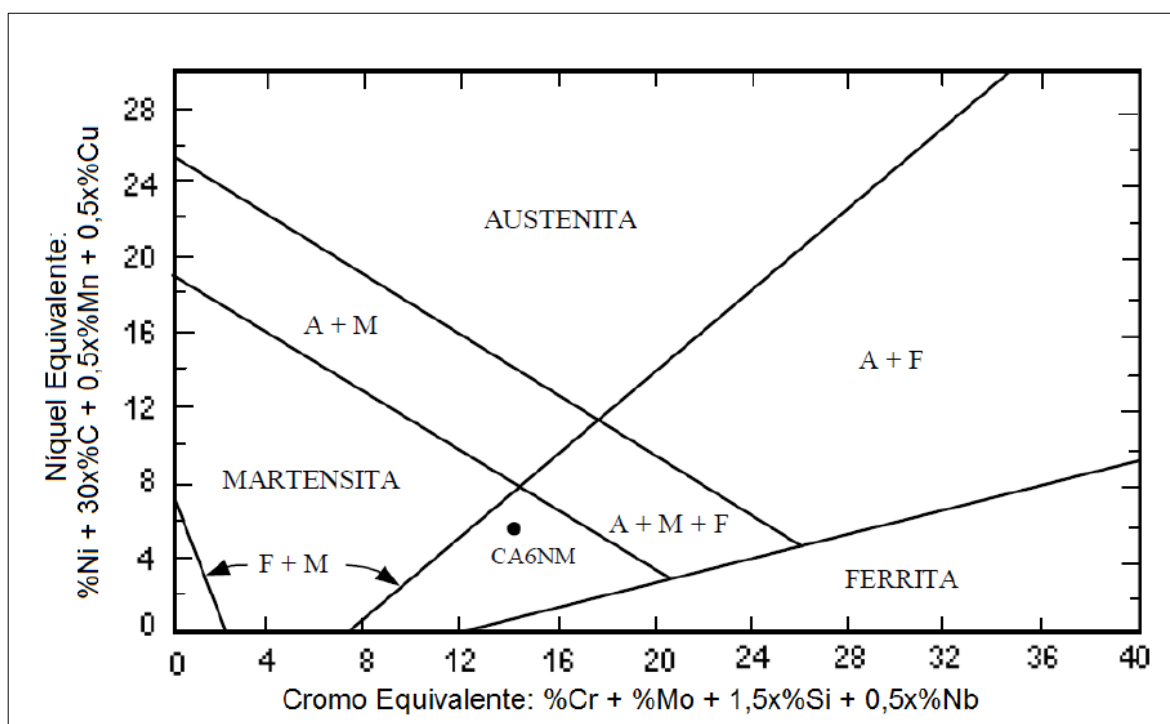


Figura 2: Localização do aço CA6NM no diagrama de Scheaffler.
Fonte: BEHENE, 2014.

A presença de ferrita na zona fundida é indesejável, pois não consegue controlar suas propriedades por tratamentos termínicos pós-soldagem e a ferrita ainda pode ser frágil, prejudicando a tenacidade da solda (MODENESI, 2001).

O tratamento térmico pós-soldagem tem como função revenir ou recozer a zona fundida e ZTA com a intenção de diminuir a dureza e aumentar a tenacidade e diminuir as tensões residuais da soldagem. Após a realização as propriedades da região de solda, ficam semelhantes ao metal de base (MODENESI, 2001).

2.4. VARETA DE AÇO INOXIDÁVEL SUPERMARTENSÍTICO ER410 NiMo

É muito comum a utilização de consumíveis com composição química similar ao metal de base (SANTOS, 2013), isso justifica o uso da vareta de metal ER410 NiMo, pois buscamos características mecânicas equivalentes ao metal de base (BEHENE, 2014).

O aço 410 NiMo é classificado como aço inoxidável martensítico, pois contém o teor de cromo suficiente para criar o filme de óxido passivo que garante a resistência à corrosão (PEREIRA, 2000), assim como o metal CA6NM.

2.5. PROCESSO DE SOLDAGEM TIG

O nome TIG vem da abreviação de Tungsten Inert Gas (gás inerte de tungstênio). Esse processo utiliza eletrodos não consumíveis feitos de ligas de tungstênio (ZIEDAS; TATINI, 1997).

Esse processo permite ou não a utilização do metal de adição, dependendo da aplicação (ZIEDAS; TATINI, 1997). O material de adição é fornecido por uma vareta ou arame, que se funde quando é superaquecido (GOUVEIA, 2008).

O superaquecimento é obtido através de um arco elétrico gerado entre um eletrodo não consumível e a peça a ser soldada (ZIEDAS; TATINI, 1997).

A poça de solda é protegida por um gás de proteção inerte como mostra a Figura 3, normalmente utiliza-se argônio, hélio ou uma mistura deles. Esse processo gera uma solda com alto padrão de qualidade e garante possibilidade de soldagem em todas as posições, sendo possível a automatização (ZIEDAS; TATINI, 1997).

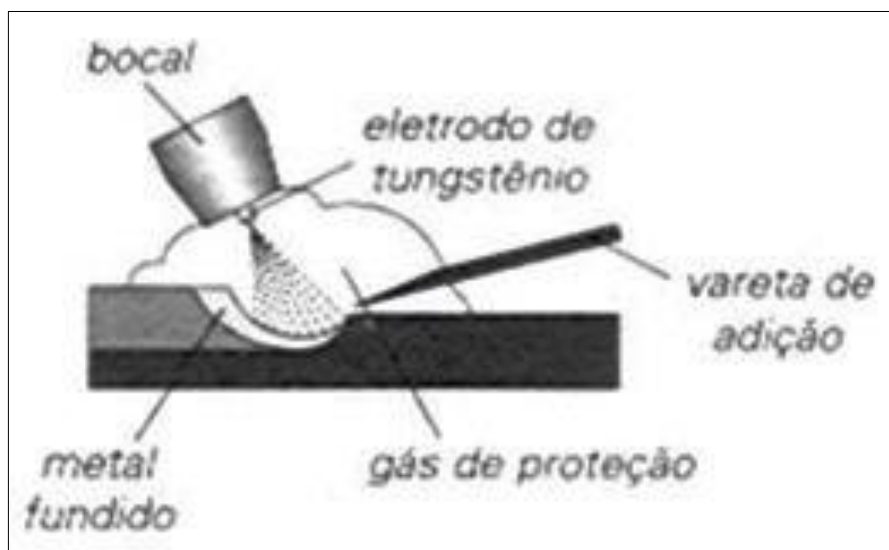


Figura 3: Soldagem TIG
Fonte: ZIEDAS; TATINI (1997).

O processo de soldagem TIG pode ser aplicado em todos os tipos de juntas e chapas finas, sendo assim é um processo adequado a quase todos os metais, com, por exemplo, nos aços inoxidáveis. Sendo assim ele é muito utilizado em soldagem de tubos e em trabalhos de reparação (ZIEDAS; TATINI, 1997).

Na soldagem TIG consegue-se ter um excelente controle da energia transferida para a peça, isso devido ao controle independente da fonte de calor e da adição de metal. Tornando esse processo adequado para peças de pequenas espessuras, obtendo ótimos resultados em materiais de difícil soldabilidade, isso se for aliado a uma proteção de gás eficiente contra a contaminação. A estabilidade do arcoelétrico produz soldas com bom acabamento e não exige muita limpeza após a operação (MARQUES; MONDENESI; BRACARENSE, 2005).

A produtividade do processo é baixa e o custo do equipamento e dos consumíveis são altos, o que pode limitar as situações de aplicação do processo. Normalmente esse processo é operado manualmente e pode ser feito em qualquer posição e é possível sua automatização (MARQUES; MONDENESI; BRACARENSE, 2005).

2.5.1. Eletrodo Utilizado na Soldagem TIG

O eletrodo que se utiliza na soldagem TIG é o de tungstênio, esse material tem mais facilidade em emitir elétrons para auxiliar a estabilidade do arco. O eletrodo pode ser de tungstênio puro ou com ligas de zircônio ou tório (ZIEDAS; TATINI, 1997).

A utilização de eletrodo de tungstênio puro tem mais vantagens, pois apresenta menor custo, porém existe uma maior dificuldade na abertura do arco e menor durabilidade (ZIEDAS; TATINI, 1997).

2.5.2. Parâmetros de Soldagem

Para uma boa qualidade de um cordão de solda precisa-se escolher o procedimento adequado para cada tipo de trabalho, para isso deve-se considerar alguns parâmetros de soldagem. Os parâmetros que normalmente se utiliza são, o comprimento do arco, a velocidade de soldagem, a vazão do gás e a corrente de soldagem (ZIEDAS; TATINI, 1997).

2.5.2.1. Comprimento do Arco

O comprimento é definido a partir da distância entre a ponta do eletrodo e o metal de base, esse comprimento influencia no cordão de solda, se ele for muito curto ou muito longo o arco torna-se instável, favorecendo a formação de porosidades ou falta de fusão (ZIEDAS; TATINI, 1997).

2.5.2.2. Velocidade de Soldagem

A velocidade de soldagem influencia sobre a penetração e a largura do cordão, sendo que se a velocidade aumenta a penetração e a largura do cordão diminui. Quando a velocidade é maior, a produtividade e a eficiência da solda são maiores, reduzindo os custos de produção. Porém velocidades altas de mais podem causar descontinuidades na solda, devida à baixa penetração (ZIEDAS; TATINI, 1997).

2.5.2.3. Vazão do Gás

A vazão do gás esta diretamente ligada a proteção da poça de solda. Uma vazão elevada pode causar turbulência no fluxo de gás causando defeitos ou descontinuidades, instabilidade do arco e maior custo de soldagem (ZIEDAS; TATINI, 1997).

Para se definir uma vazão ideal é necessário levar em consideração a distância entre o bocal e a peça, o tipo e a posição da tocha, tipo de junta, diâmetro do bocal, velocidade e posição de soldagem e o tipo de metal a ser soldado (ZIEDAS; TATINI, 1997).

Para determinar a vazão ideal é necessário fazer um teste, iniciando com uma vazão elevada e ir diminuindo aos poucos até começar uma oxidação superficial no cordão de solda, dessa maneira sabe-se que a vazão ideal será superior ou próxima a essa (ZIEDAS; TATINI, 1997).

2.5.2.4. Corrente de Soldagem

Cada tipo de material exige uma corrente de soldagem ideal. O Quadro 1 pode ajudar a selecionar o gás e a corrente recomendadas para os materiais.

Quadro 1: Tipo de corrente e gás para os materiais

Material	Manual						Automatica						
	Espessura						Espessura						
	≤ 3,2mm			> 3,2mm			≤ 3,2mm				> 3,2mm		
	Ar	Ar-He	He	Ar	Ar-He	He	Ar	Ar-He	He	A ₂ -H ₂	Ar	Ar-He	He
Alumínio e ligas	•			•			•					•	▲
Aço Carbono	▲			▲			▲					▲	▲
Aço Inoxidável	▲				▲			▲		▲			▲
Níquel e ligas	▲				▲			▲	▲				▲
Cobre		▲				▲		▲					▲
Titânio e ligas	▲				▲		▲	▲					▲

• - corrente alternada, alta frequência

▲ - corrente contínua, polaridade direta

Ar-He - contém acima de 75% de Hélio

A₂-H₂ - contém acima de 15% de Hidrogênio

Fonte: Adaptado de (ZIEDAS; TATINI, 1997).

Devido a grande versatilidade de espessuras e ligas soldáveis e a produção de soldas com ótimas qualidades o processo TIG se destaca, porém ele é relativamente caro, lento e com baixa produtividade. Assim a sua utilização na indústria é, basicamente, na união de metais difíceis de serem soldados por outros processos, em situações em que exige um controle rigoroso de calor cedido a peça e nas situações em que a qualidade da junta soldada é mais importante que o custo de produção (MARQUES; MONDENESI; BRACARENSE, 2005).

3. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização do experimento foi soldado corpo de prova (CP), sendo feito apenas um passe. Após a finalização da soldagem do CP foi feita uma análise de inspeção visual usando o método de líquido penetrante e posteriormente mediu-se a microdureza do cordão e do material de base, buscando analisar a diferença entre eles. Além desses ensaios foi feito um ataque químico para a avaliação microestrutural para a verificação de ferrita em sua microestrutura, usando um microscópio óptico (MO).

3.1. OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA E METODO DE SOLDAGEM

3.1.1. Material de Base

Para ser utilizado como metal de base foi escolhido o aço inoxidável supermartensítico macio classificado como ASTM 743 grau CA6NM, sua composição química é mostrada na Tabela 3. Esse material foi o mesmo utilizado por Behene, 2014.

Tabela 3: Composição química material CA6NM.

COMPONENTES	PESO EM %
C	0,02
Si	0,38
Mn	0,66
Cr	11,9
Ni	4,5
Mo	0,4
S	0,001

Fonte: BEHENE, 2014.

O material foi retirado de uma pá de turbina, levado para fresadora para retirar um tarugo com tamanho aproximado das dimensões finais, após feitos os procedimentos de usinagem o material foi retificado.



Figura 4: Corpo de prova
Fonte: Aatoria Propria

Como mostra a Figura 4 as dimensões finais do corpo de prova foram 80x55x12,5 mm.

3.1.2. Material de Adição

O metal de aporte que foi utilizado é o aço AWS ER410NiMo, é um arame maciço que apresenta uma composição similar ao do aço CA6NM. Sua composição esta demonstrada na Tabela 4.

Tabela 4: Composição química do aço 410NiMo

COMPONENTES	PESO EM %
C	0,03
Si	0,3
Mn	0,45
Cr	13
Ni	3,7
Mo	0,34
S	0,003

Fonte: BEHENE, 2014.

O material de aporte foi utilizado em forma de vareta com diâmetro de 2,4 mm e foi alimentado manualmente pelo soldador.

3.2. EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM

A bancada utilizada para o procedimento foi a da empresa JC Soldagem. Essa bancada é constituída por um equipamento de soldagem AC/DC 315P da Escudo (Figura 5). Esse equipamento possui uma tocha de soldagem da marca Sumig modelo SU 18 refrigerada a água, tubo de gás de proteção, um dispositivo para abertura do arco, uma fonte de corrente elétrica, cabos e mangueiras para as ligações.



Figura 5: Máquina de solda TIG
Fonte: Autoria propria

A tocha possui uma pinça que segura o eletrodo de tungstênio com 2,5 mm de diâmetro e faz o contato elétrico e também possui um bocal para o direcionamento gás de proteção de forma apropriada.

Como fonte de gás de proteção utilizou-se um cilindro de gás de argônio e reguladores de pressão e vazão do gás.

3.2.1. Condições de Soldagem

Os parâmetros fixados e mantidos durante a realização do cordão de solda, foram baseados no trabalho Pereira, 2000, e estão apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Parametros para soldagem

PARAMETROS	VALORES
Velocidade de soldagem	Manual
Distancia tocha peça	10 mm
Corrente	$I_p = 180 \text{ A}$ $I_b = 140^a$
Vazão do gás de proteção	11,0 l/min
Temperatura de pré aquecimento	120°C
Pressão do gás (Argônio)	150 kgf/cm ²
Diâmetro da vareta	2,4 mm

Fonte: Autoria Propria.

Antes de iniciar soldagem foi feita uma remoção de qualquer impureza existentes na superfície após, foi feito um pré-aquecimento com maçarico. Como mostra a Figura 6.

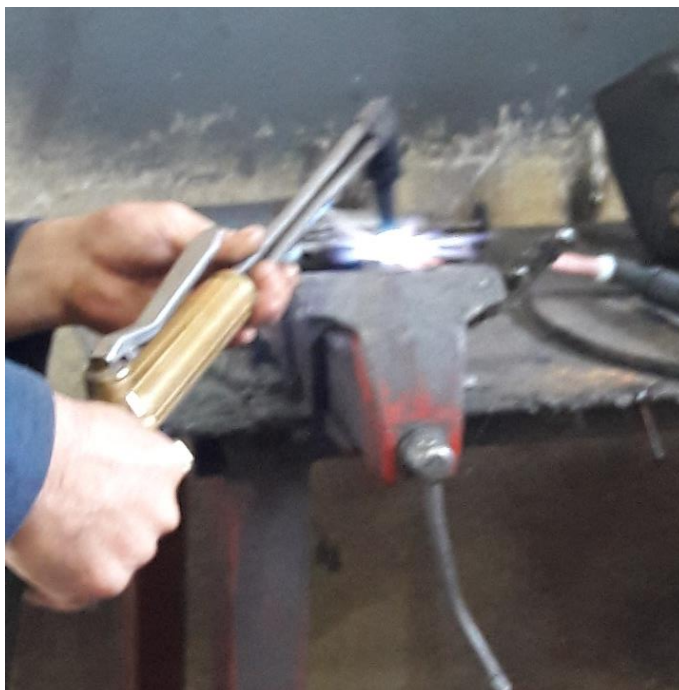


Figura 6: Pré-aquecimento com maçarico
 Fonte: Autoria própria

Depois dos ajustes dos parâmetros ajustados iniciou-se o procedimento de soldagem, onde foi feito apenas um cordão de revestimento, como mostra a Figura 7. Após a solda ter sido realizada houve um resfriamento lento.



Figura 7: Corpo de prova depois de realizado o passe de soldagem
Fonte: Autoria Propria

3.3. ANÁLISES REALIZADAS NO CORPO DE PROVA

Depois de feito o revestimento iniciou-se a preparação dos corpos de prova para os ensaios mecânicos, cortando uma pequena amostra para realizar os ensaios.

3.3.1. Ensaio de Líquidos Penetrantes

Após obtenção dos corpos de prova soldados, foi realizado o ensaio visual de Líquidos Penetrantes, cuja finalidade é detectar discontinuidades na superfície do material, tanto na seção transversal quanto ao longo dos cordões de solda.

3.3.2. Microdureza Vickers

Nesta etapa, foram medidas as microdurezas em diferentes pontos do cordão de solda, buscando analisar as diferenças entre o cordão, a ZTA e o metal de base, afim de avaliar a influência nas propriedades mecânicas da peça. O equipamento utilizado foi o Microdurômetro HMV Shimadzu do Laboratório de Materiais e Superfícies (LAMATS) da UFPR.

3.3.3. Microscopia Ótica

Para avaliação microestrutural foi feito um ataque químico com o reagente Nital 8% na peça para observar no microscópio óptico. As imagens para análise microscópica foram obtidas pelo microscópio Olympus BX51, do Laboratório de Materiais e Superfícies (LAMATS) da UFPR.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. ENSAIO DE LIQUIDO PENETRANTE

A Figura 8 mostra, os aspectos da amostra quando analisados pela inspeção visual através do ensaio de liquido penetrante. O objetivo é avaliar a presença de descontinuidades na superfície, poros e trincas no cordão e na seção transversal.

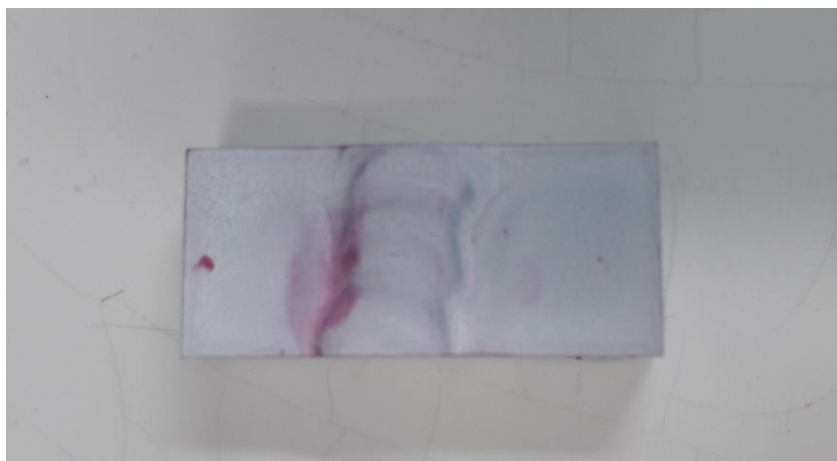


Figura 8: Ensaio de Líquido Penetrante
Fonte: Autoria própria

A partir das análises, não foi detectada a presença de trincas, porosidades e descontinuidades no cordão solda.

4.2. ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

A Figura 10 mostra os locais das medições de microdureza vickers, foi utilizado uma carga de 300 g por 15 segundos.

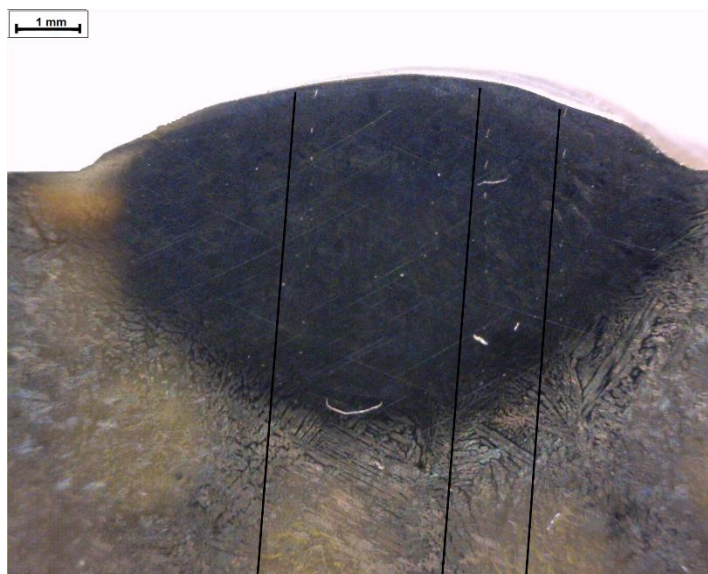


Figura 9: Pontos de identificação
Fonte: Autoria própria

A Tabela 5, mostra os valores mensurados de dureza.

Tabela 5: Valores de microdureza

Pontos	Perfil		
	1	2	3
1	347	388	370
2	368	355	386
3	393	390	400
4	372	390	373
5	385	364	365
6	368	371	376
7	395	370	350
8	391	375	357
9	369	383	400
10	369	410	409
11	402	420	432
12	384	393	425
13	362	408	408
14	361	375	386
15	365	385	379
16	364	357	360

Fonte: Autoria própria

A Figura 10 mostra o gráfico com os valores de microdureza medido no corpo de prova desde o topo até o metal de base.

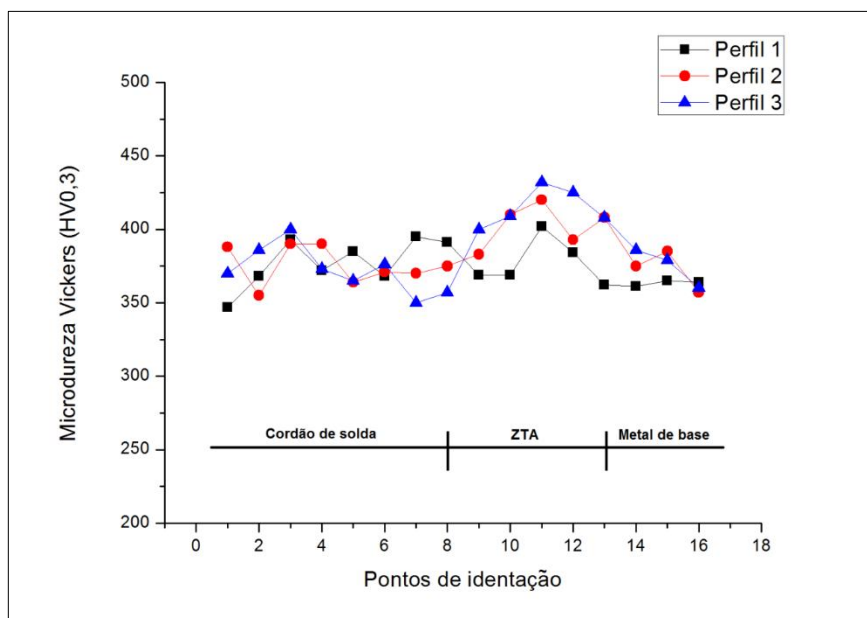


Figura 10: Valores de dureza do corpo de prova desde o topo até o metal de base. Fonte: Autoria Propria

Observa-se uma pequena variação na dureza entre o cordão de solda, ZTA e metal de base. Os valores de dureza variam entre 450 a 325 HV.

Os valores de dureza na região da ZTA são maiores que do metal de base e do cordão de solda.

Foi calculado o desvio padrão dos valores pelo programa Excel, os valores obtidos estão na Tabela 6.

Tabela 6: Valores de média e desvio padrão

	Perfil		
	1	2	3
Média	374,6875	383,375	386
Desvio Padrão	15,13811	18,63643	24,31735
Média geral	381,3542		
Desvio Padrão Geral	19,91417		

Fonte: Autoria Propria

4.3. ANÁLISE DE MACROGRAFIA

Com a análise de macrografia consegue-se ver o tamanho do reforço, largura e penetração do cordão de solda, como mostra a Figura 11.

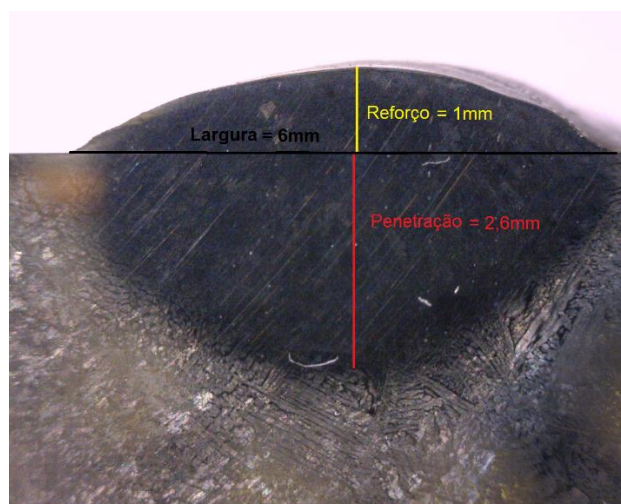


Figura 11: Cordão de solda
Fonte: Autoria propria

Com o auxílio do programa AutoCAD, foi calculado o tamanho das áreas de reforço e penetração (Figura 12).

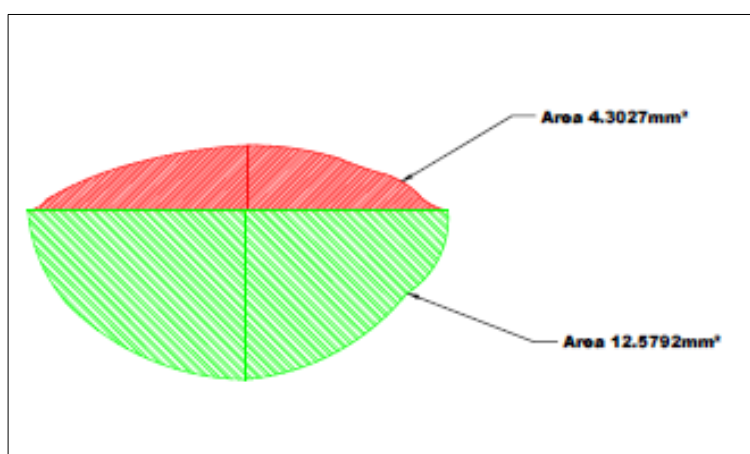


Figura 12: Tamanho da área de reforço e da área de penetração
Fonte: Autoria propria

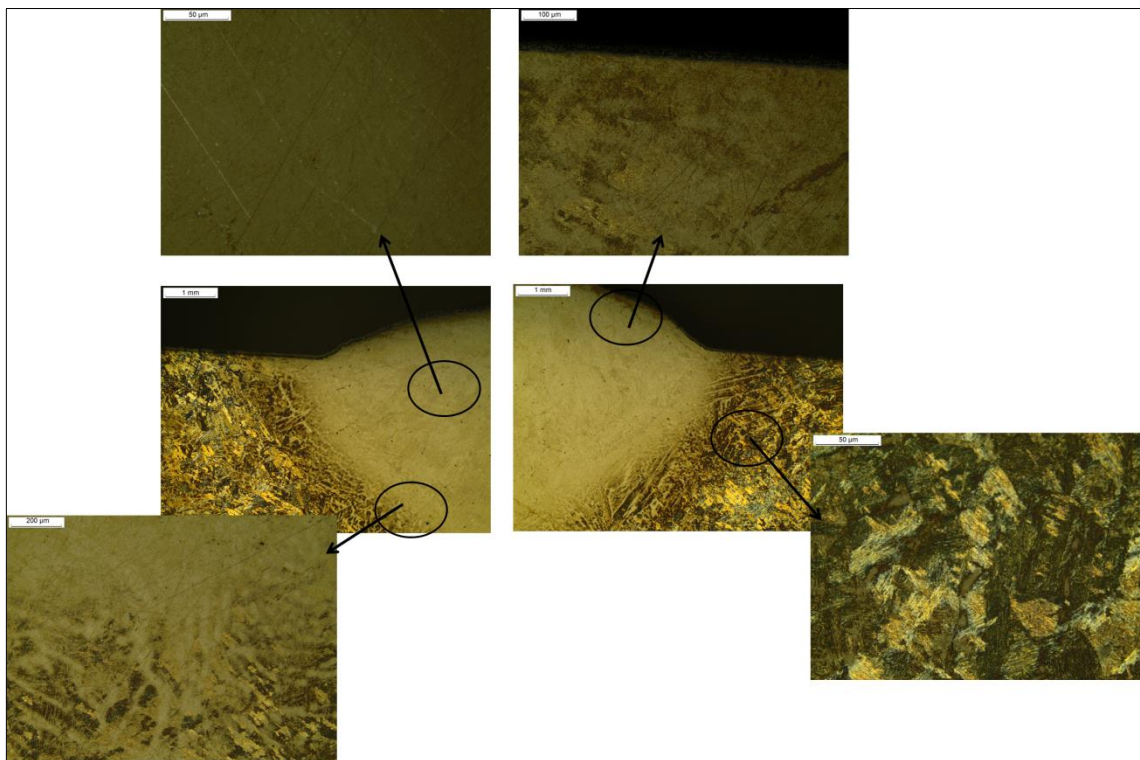
A partir dos valores das áreas, pode-se calcular a diluição do cordão, com a seguinte equação:

$$D = \frac{B}{A + B} \times 100[\%]$$

Sendo A a área de reforço e B a área de penetração. Após o cálculo, obteve-se o valor da diluição igual a 74,51234%.

4.4. ANALISE DE MICROSCOPIA ÓTICA

Após preparação metalográfica a amostra foi atacada com Vilela para revelação da microestrutura. A Figura 13 mostra a imagem feita com o microscópio ótico.



**Figura 13: Imagem do cordão de solda após o ataque químico.
Fonte: Autoria própria**

Pode-se observar na imagem um cordão livre de defeitos, trincas ou poros. A ZTA é pequena, como já esperado da soldagem TIG. Observa-se grãos grosseiros na ZTA, como já espedado.

5. CONCLUSÕES

A inspeção visual através da técnica de líquidos penetrantes demonstrou que o metal adicionado pelo processo TIG não apresentou discontinuidades, tendo uma boa qualidade e bom acabamento.

No ensaio de microdureza, percebeu-se um aumento da dureza na ZTA, porém o desvio padrão obtido foi relativamente baixo, podendo concluir que não há uma discrepância no valor da dureza entre o cordão de solda, ZTA e o metal de base. Garantindo assim as propriedades mecânicas semelhantes em ambas as partes.

Através da análise de micrografia e macrografia a diluição foi alta, porém o metal de adição tem a composição química semelhante ao metal de base, assim através do ensaio de microdureza pode-se confirmar que não há uma grande mudança de dureza no perfil da amostra. Ainda na micrografia e macrografia observou-se que não há nenhuma discontinuidade no cordão de solda, também não foi observado a presença de poros.

Conclui-se que foi possível depositar a vareta de 410NiMo no metal de base CA6NM mantendo as propriedades mecânica semelhante, segundo a microdureza.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Análise microestrutural para observar as fases que se formam após a soldagem.
- Repetir a soldagem, porém utilizando o processo com corrente contínua.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLENSTEIN, Ângela Nardelli. **Estudo da Resistência à Cavitação do Aço Inoxidável Martensítico CA6NM Nitretado por Plasma**. 2007. 113 F. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Curitiba, 2007.

ASTM, ASTM 743/A 743M – 98ae1: **Standard specification for castings, iron-chromium, iron-chromium-nickel, corrosion resistant, for general application**. American Society for Testing and Materials, 1998.

BEHENE, LUCAS. **Estudo da Alteração de Parâmetros de Soldagem Plasma com Alimentação de Vareta em Substrato de Aço ASTM 742 Tipo CA6NM**. 2014. 109 F. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Do Paraná. Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica, Curitiba, 2014.

CARBÓ, Héctor Mario. **Aço Inoxidável: Aplicações e Especificação**. 2001. 83 F.

GASTALDO; Felipe Tolo. **Efeitos do Tratamento de Superfície a Laser na Microestrutura e na Resistência ao Desgaste do Aço Inoxidável Martensítico**. 2010. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, 2010.

GOUVEIA; Ruimar Rubens de. **A Influência da Temperatura de Interpasse na Tenacidade do Metal de Solda na Soldagem Multipasse do Aço Inoxidável Martensítico CA6NM pelo Processo TIG**. 2008. 88 F. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica, Curitiba, 2008.

MARQUES, Paulo Villani; MODENESI, Paulo José; BRACARENSE, Alexandre Queiroz. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 2. ed. Minas Gerais: UFMG, 2005. 362 p. (Didática).

MONDENESI, Paulo J. **Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis**. São Paulo: Escola SENAI “Nardir Dias Figueredo”, 2001.

PEREIRA, Aldo Santos. **Desenvolvimento de Procedimento de Reparo por Soldagem em Aços Inoxidáveis Martensíticos, com Metal de Adição Similar sem TTP**. 2000. 136 F. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2000.

SANTOS, Matheus Tabata. **Determinação da Emissividade e Análise Microestrutural do Aço Inoxidável Martensítico ASTM 743 CA6NM Decorrente da Soldagem GMAW em Múltiplos Passos com Metal de Deposição AWS 410 NiMo**. 2013. 133 F. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília. Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas da Universidade de Brasília. Brasília, 2013.

SCURACCHIO, Bruno Geoffroy. **Influência dos Elementos de Liga no Intervalo de Solidificação do Aço Inoxidável Martensítico CA6NM**. 2009. 99 F. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Unisverdade de São Paulo. São Paulo, 2009.

ZIEDAS, Selma; TATINI, Ivanisa (Org.) **Soldagem**. São Paulo: SENAI, 1997.