



PROJETO DE GRADUAÇÃO

Análise microestrutural do cordão de solda
produzido por manufatura aditiva em aço
inoxidável 410 NiMo: Soldagem GMAW

Por,

David Scott Kilson Herzog

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO 2

Análise microestrutural do cordão de solda produzido por manufatura aditiva em aço inoxidável 410 NiMo: Soldagem GMAW

Por,

David Scott Kilson Herzog

Relatório submetido como requisito para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Alysson Martins Almeida Silva (orientador)

Prof. Guilherme Caribé de Carvalho(coorientador)

Eng. Leandro Bruno Alves Caio

Brasília, julho de 2019

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Alysson e ao meu coorientador, Prof. Guilherme Caribé, que me estimularam e apoiaram no desenvolvimento deste Projeto de Graduação. Aos técnicos do GRACO: Pereira, Artur e Alexandre e aos técnicos do SG-9, pelo precioso auxílio nas etapas experimentais deste trabalho. À Universidade de Brasília e seus funcionários que propiciaram as condições e a infraestrutura, contribuindo de maneira efetiva para a realização do meu curso.

À minha família, em especial, à minha mãe, por sempre me incentivar a estudar e me apoiar na construção da trajetória profissional. À minha namorada e aos amigos que me acompanharam e encorajaram a enfrentar os desafios do curso de engenharia mecânica. E a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para a minha formação.

Resumo

Este Projeto de Graduação objetiva a ampliação do conhecimento sobre as microestruturas de uma peça de aço inoxidável 410 NiMo, fabricada com o processo de manufatura aditiva, com a finalidade de estimar suas propriedades mecânicas. Os procedimentos metodológicos adotados compreendem a realização do experimento, iniciado pela retirada e preparação da amostra da peça, pela análise macrográfica por meio de ataque químico com uma mistura de reagente Villela e ácido crômico, pela análise micrográfica com reagente Kalling e HCL realizada nos microscópios confocal e eletrônico de varredura, além de uma análise de energia dispersiva para avaliar a composição química e por fim, foi feito o ensaio de dureza Rockwell. Espera-se que esta pesquisa contribua para o aprimoramento dos processos de manufatura aditiva e sua difusão para construção de peças metálicas em processos industriais.

Palavras-Chave: Manufatura aditiva; solda MIG/MAG (GMAW); Aço inoxidável 410 NiMo

Abstract

This Graduation Project aims to increase knowledge about 410 NiMo stainless steel part microstructures, fabricated by Additive Manufacturing process, in order to estimate its mechanical properties. This experience methodological procedures starts by removing and preparing apart sample and includes the sample chemical attack by a mix of Villela reagent and chromic acid to draw macrographic analysis, the micrographic analysis in a confocal microscope and scanning electron microscope by attacking with a reagent Kalling and HCL. In addition, to evaluate the part chemical composition is done a dispersive energy analysis. At last, the Rockwell hardness test is done. It is expected that this research contributes to improve additive manufacture processes and its diffusion of metal parts constructing processes in industry.

Key words: Additive manufacturing; MIG/MAG/GMAW welding; Stainless Steel 410 NiMo

Sumário

Agradecimentos	3
Resumo	4
Abstract	5
Lista de imagens.....	8
Lista de tabelas.....	10
1. Introdução.....	11
2. Referencial teórico	14
2.1. Manufatura aditiva	14
2.2. Soldagem.....	16
2.3. Processo MIG/MAG	19
2.4. Microestrutura	20
2.5. Tratamentos térmicos	23
2.6. Aço inoxidável AISI 410 NiMo	24
2.7. Metalografia	26
2.8. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)	27
2.9. Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)	28
2.10. Microscopia Confocal	29
2.11. Ensaio de dureza.....	29
3. Descrição do experimento	30
3.1. Processo de construção da peça	30
3.2. Procedimento utilizado na retirada da amostra	31
3.3. Preparo da amostra para micrografia.....	31
3.4. Preparo da amostra para macrografia.....	33
3.5. Metodologia utilizada para realização do ensaio de dureza	33

3.6. Procedimento adotado para análise no MEV e EDS	34
4. Resultados Experimentais	36
4.1. Caracterização microestrutural	37
4.2. Caracterização de dureza	42
4.3. Caracterização microestrutural no MEV	43
4.4. Análise de EDS.....	48
5. Conclusão.....	55
Referências Bibliográficas.....	57

Lista de imagens

Figura 2.1 - Imagem ilustrativa de uma impressora 3D	14
Figura 2.2 - Transformador de soldagem por resistência criado por Thomson.....	16
Figura 2.3 - Navios de guerra antigos	17
Figura 2.4 - Desenho esquemático do processo de Solda TIG (A), Solda MIG (B) e Solda de eletrodo (C).....	18
Figura 2.5 - Soldagem GMAW	19
Figura 2.6 - Estruturas cristalinas mais comuns dos sólidos metálicos. As dimensões a e c são os parâmetros de rede.....	21
Figura 2.7 - Microestrutura da austenita (a), Ferrita (b), cementita (c), Perlita (d) e Martensita (e).....	22
Figura 2.8 - microestrutura do aço inoxidável 410 temperado e revenido (a)	22
Figura 2.9 - Diagramas de fases do aço AISI 410 para percentual de cromo (A) e carbono (B).....	25
Figura 2.10 - Diagrama TTT aço 410	26
Figura 2.11 - Desenho esquemático para comparação entre microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura	28
Figura 2.12 - Penetrador de Dureza Rockwell.....	29
Figura 3.1 - Identificação dos lados da base da peça depositada	30
Figura 3.2 - Foto da peça de aço 410 NiMo cortada de forma transversal	31
Figura 3.3 - Máquina Politriz modelo POLIPAN-U 600 rpm e microscópio óptico modelo Olympus BX51	32
Figura 3.5 - Foto da macrografia de uma amostra de aço inoxidável 410 construído de cordões de solda	33
Figura 3.6 - Máquina de ensaio de dureza modelo ZwickRoell ZHU250	34
Figura 3.7 - Microscópio eletrônico de varredura modelos JEOL JSM-7100F	35
Figura 4.1 - Foto da construção do corpo da peça feita de cordões de solda de aço 410 NiMo	36

Figura 4.2 - Foto da câmera térmica tirada durante o processo de construção do corpo de prova de aço 410 NiMo	37
Figura 4.3 - Imagem esquemática da localização das imagens de microestrutura ao longo da amostra de aço 410 NiMo	38
Figura 4.4 - Metalografia feita com Kalling e aumento de 1000X de um aço 410 NiMo	39
Figura 4.5 - Metalografia feita com reagente a base de HCl e aumento de 1000X de trechos diferentes de amostra de aço 410 NiMo, “A” representando o trecho entre 0 e 30mm, “B” entre 40 e 60mm, “C” entre 70 e 80mm e “D” entre 90 e 100mm.	40
Figura 4.6 - Foto dos pontos em que foram medidas as durezas em um aço 410 NiMo	42
Figura 4.7 - Gráfico de medidas de dureza Rockwell em uma peça de aço 410 NiMo construída por camadas de cordão de solda	42
Figura 4.8 - Imagem feita no MEV com aumento de 1000X de uma amostra de aço 410 NiMo	44
Figura 4.9 - Imagem feita no MEV com aumento de 3000X de uma amostra de aço 410 NiMo	45
Figura 4.10 - Imagem feita no MEV com aumento de 18000X de uma amostra de aço 410 NiMo	46
Figura 4.11 - Imagem feita no MEV com aumento de 7000X de uma amostra de aço 410 NiMo	46
Figura 4.12 - Imagem feita no MEV com aumento de 3000X e 13000X da Figura 4.8D de amostra de NiMo.....	47
Figura 4.13 - Imagem feita no MEV com aumento de 10000X da Figura 4.8E de amostra de aço 410 NiMo	47
Figura 4.14 - Imagem feita no MEV com aumento de 8500 vezes da Figura 4.8F de uma amostra de aço 410 NiMo	48
Figura 4.15 – Espectro EDS da formação com alto percentual de oxigênio, alumínio, silício e manganês encontrada na amostra de aço 410 NiMo	49
Figura 4.16 - Espectro EDS da formação com alto percentual de oxigênio, alumínio, silício, titânio e manganês encontrada na amostra de aço 410 NiMo	50

Figura 4.17 - Espectro EDS da formação com alto percentual de carbono, oxigênio, nitrogênio, sódio, cloro e potássio encontrada na amostra de aço 410 NiMo 52

Figura 4.18 - Espectro EDS da formação com alto percentual de carbono, oxigênio, nitrogênio, alumínio e cálcio encontrada na amostra de aço 410 NiMo..... 53

Lista de tabelas

Tabela 1 - Composição química para o preparo do reagente Kalling nº1 32

1. Introdução

O contínuo desenvolvimento da sociedade demanda novas tecnologias para atender às necessidades que vão sendo criadas, o que afeta os processos produtivos, impondo-lhes maximização da eficiência e minimização de resíduos. A busca por competitividade motiva as empresas a seguirem as tendências da sociedade e inovarem em seus produtos e processos.

A manufatura aditiva é uma técnica que permite a construção de peças de variadas geometrias, camada a camada. Isto confere versatilidade e economia aos processos de fabricação, possibilitando a utilização de um mesmo equipamento para a construção de peças de diversos formatos. Este processo pode ser empregado tanto em escala artesanal, com o uso de uma impressora 3D de polímero, quanto em escala industrial, adotando-se técnicas de soldagem em metais.

O aperfeiçoamento de técnicas para produção de peças metálicas é de grande relevância devido à sua vasta utilização na indústria. Nesse sentido, têm-se ampliado as pesquisas sobre o aprimoramento da produção de sólidos por deposição de metal em camadas sucessivas com uso de robô soldador, também é conhecido como soldagem 3D ou Shaped Metal Deposition (SMD), dado o seu potencial de aplicação. Entretanto, ainda existem obstáculos a serem superados com a relação às limitações das formas geométricas dos sólidos depositados e ao desconhecimento das propriedades finais do material produzido.

Empresas como a Rolls-Royce e a Boeing têm diversas pesquisas sobre o emprego de manufatura aditiva na construção de peças para a indústria, que pode ser utilizada, por exemplo, para construção e revitalização de pás de turbinas de avião ou até de usinas hidroelétricas. O trabalho desenvolvido por AMRC (2011) afirma que o processo de manufatura aditiva pode reduzir até 60% no tempo de construção de novas peças, até 40% nos custos de manufatura e até 90% na redução de desperdício de material nos processos, além das economias pelo aumento na eficiência energética. Por essas razões grandes empresas vêm investindo nesse processo, que apesar de se mostrar promissor,

ainda não tem grande aceitação no mercado, por não haver conhecimento suficiente sobre as propriedades finais das peças fabricadas.

Este estudo tem o objetivo de analisar as microestruturas de uma peça metálica produzida no trabalho elaborado por Andrade (2013), que utilizou a técnica de manufatura aditiva orientada por um software desenvolvido na Universidade de Brasília, acoplando uma fonte de solda a um braço robótico. A peça analisada foi construída com a utilização do processo de soldagem MIG/MAG, amplamente adotado na indústria devido à facilidade de automatização, a alta taxa de deposição e a variedade de materiais que se pode soldar. Por esses motivos tal processo de soldagem pode ser considerado promissor para o uso em manufatura aditiva de materiais metálicos, como aços e alumínio que têm vasta aplicação na indústria.

As análises microestruturais da amostra retirada da peça compreendem a observação através de um microscópio confocal e um microscópio eletrônico de varredura (MEV), além de uma análise macrográfica e de um teste de dureza, realizado em vários pontos para verificação das propriedades mecânicas apresentadas.

O estudo desenvolvido, a seguir, amplia as pesquisas sobre a aplicação de manufatura aditiva em peças metálicas, contribuindo de maneira efetiva para o aprimoramento desta técnica e sua difusão, aumentando, assim, as possibilidades de otimização em linhas de produção, trazendo vantagens econômicas e agilidade na fabricação de peças.

O presente trabalho é composto por cinco capítulos, o primeiro traz uma breve introdução sobre o tema desenvolvido no trabalho.

O segundo apresenta o referencial teórico sobre os assuntos abordados, como manufatura aditiva, soldagem MIG/MAG (GMAW), fontes de solda, tratamentos térmicos, microestruturas, aço inoxidável AISI 410 NiMo, metalografia, microscópio eletrônico de varredura (MEV), microscopia confocal e ensaio de dureza.

O terceiro capítulo descreve a metodologia utilizada na parte experimental do trabalho, a ordem e descrição dos processos, como a construção da peça, a retirada e preparação da amostra, as análises nos microscópios e o ensaio de dureza.

No quarto é desenvolvida a análise dos dados retirados a partir da realização dos experimentos.

O quinto capítulo traz uma visão geral de todo o trabalho e apresenta a conclusão de acordo com os resultados obtidos no experimento.

A parte final é composta pela bibliografia utilizada no trabalho, como artigos, livros e sites usados como base para teórica este trabalho.

2. Referencial teórico

O embasamento teórico do experimento realizado considera os temas envolvidos em cada etapa da pesquisa.

2.1. Manufatura aditiva

A manufatura aditiva é um processo mecânico de adição de material, camada por camada, para se construir algo. Esta técnica moderna tem se popularizado com o advento das impressoras 3D (Figura 2.1) que associada a um software de CAD pode criar peças de decoração, utensílios domésticos, entre outros. Em geral, as impressoras 3D utilizam algum tipo de plástico ou resina para criar os objetos, que são feitos de várias camadas sucessivas de material.

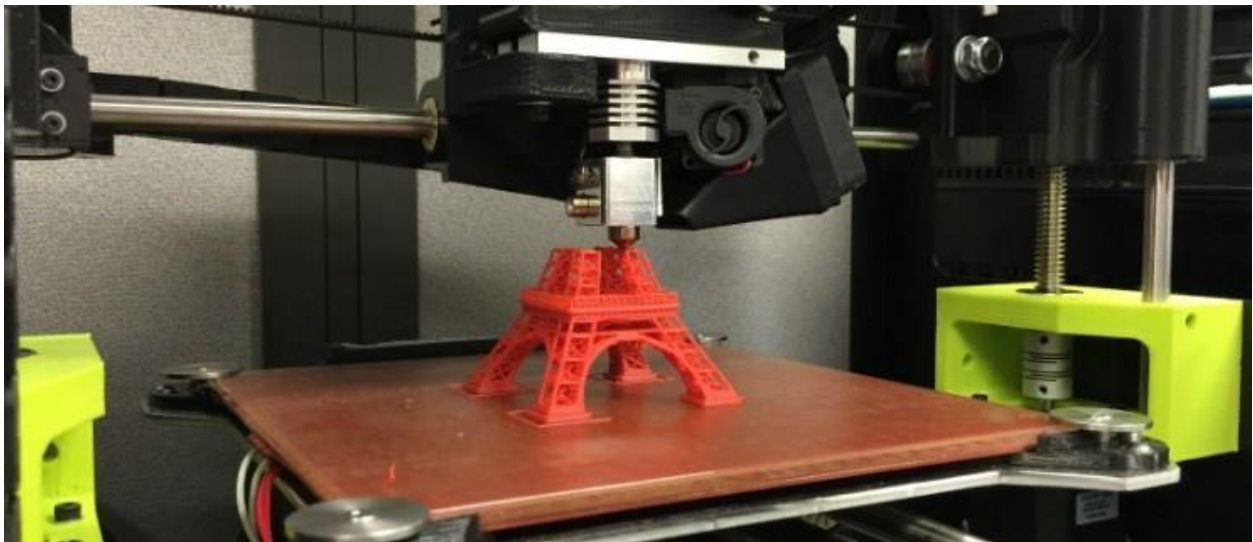


Figura 2.1 - Imagem ilustrativa de uma impressora 3D

Fonte: (scompositos)

Na indústria, esta técnica utiliza plástico, resina, metal ou cerâmicas, geralmente, com o emprego de alguma fonte de produção de calor, para a confecção das camadas.

Características fundamentais da manufatura aditiva são a redução do número de etapas e processos na fabricação de um objeto, a economia de material e a possibilidade de combinação inéditas geometria – materiais, eventualmente mais de um na mesma peça. Para a produção de uma única peça de geometria complexa por meios convencionais, pode ser necessário o

emprego de diversas máquinas, ferramental específico e de diversos processos de usinagem e de acabamento até o produto final, enquanto que uma máquina de manufatura aditiva pode produzir a peça em uma única etapa ou em um número significativamente menor de etapas. Uma vez que a peça é produzida por deposição de material, camada por camada, não haveria desperdício de materiais, como é o caso de cavacos produzidos pela usinagem. (RODRIGUES, ZANCUL, *et al.*, 2017)

Dentre os métodos industriais de manufatura aditiva de polímeros, a estereolitografia, que consiste na utilização de um laser para produzir peças a partir de polímeros fotossensíveis, destaca-se por apresentar melhor custo benefício e maior precisão.

Para confecção de peças de metal, os métodos de manufatura aditiva podem ser baseados em processos de soldagem. A deposição em camadas sucessivas, é uma técnica utilizada na prototipagem rápida de metais, conhecida como soldagem 3D ou SMD (Shaped Metal Deposition), que consiste na aplicação de cordões de solda sobrepostos até formar a geometria desejada. Essa técnica pode ser usada com diversos métodos de soldagem, por exemplo, a soldagem MIG/MAG, que utiliza cordões de solda para execução de camadas, de maneira similar ao processo realizado por uma impressora 3D.

Ainda que existam várias pesquisas relacionadas ao tema, o uso de manufatura aditiva em metais não está tão difundido quanto em polímeros. A necessidade de aperfeiçoamento do acabamento superficial da peça pronta é um dos fatores limitantes.

Outro aspecto a ser desenvolvido é a limitação da geometria da peça a ser fabricada, pois as camadas de solda precisam ter uma base de apoio. O aprimoramento dessas e outras questões podem ampliar o emprego da técnica, reduzindo o custo de produção das peças que ainda é elevado.

2.2. Soldagem

A soldagem é um processo extremamente relevante e amplamente utilizado na indústria e pode ser definido como: “Operação que visa obter a união de duas ou mais peças, assegurando, na junta soldada, a continuidade das propriedades físicas, químicas e metalúrgicas” (MODENESI, 2000). É um processo que tem como intuito unir, de forma definitiva, dois materiais iguais ou diferentes, por meio de adição de material, pressão ou atrito, podendo ter diferentes níveis de temperatura.

Desde a antiguidade, quando os metais começaram a ser usados por forjadores, a soldagem passou a ter grande importância. A técnica utilizada era similar à brasagem de hoje, em uma forma mais arcaica. Com o advento do ferro, os ferreiros aqueciam duas ou mais peças e as martelavam até ficarem soldadas. Durante milhares de anos essas técnicas foram necessárias para construção de estruturas metálicas de todo tipo, como partes de carruagens, espadas, escudos, armaduras, joias, entre outras.

No século XIX, começaram a aparecer novos métodos, quando James Joule conseguiu fundir vários pedaços de arame utilizando corrente elétrica, criando seu princípio de aquecimento e mais tarde quando Elihu Thomson criou um transformador de soldagem (*Figura 2.2*) e o patenteou. Tempos depois, ele veio a desenvolver máquinas de soldagem a ponto, costura, projeção e por ação de faísca.

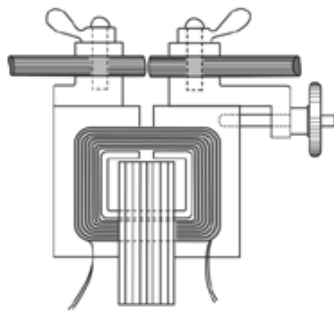


Figura 2.2 - Transformador de soldagem por resistência criado por Thomson.

Fonte: (WEMAN, 2005)

Outra técnica que utilizava eletricidade era a soldagem por arco elétrico, que foi apresentada na feira mundial de eletricidade em Paris pelo russo Nikolai Bernardos, em 1881. Ele também criou um arco elétrico entre um eletrodo de carvão e uma peça que precisava de um metal de adição, que mais tarde foi trocado por uma vareta metálica, que servia como eletrodo e metal de adição. No início do século XX, foram criados o eletrodo revestido e a solda MIG, que evoluíram dessa técnica de arco elétrico.

Com a crescente implementação de aço nas estruturas, as técnicas de soldagem foram desenvolvidas e se mostraram uma alternativa ao rebite, que era amplamente utilizado. Para a indústria naval a solda era essencial e com o começo da 1ª guerra mundial, a soldagem foi decisiva, tanto para manutenção quanto para construção de navios, blindados e armas em geral. Nessa época, foram criados diversos tipos de solda com um aumento significativo da utilização do processo. Técnicas como TIG (*Tungsten Inert Gas*), MAG (*Metal Active Gas*), arco submerso e outras foram desenvolvidas no período compreendido entre a primeira guerra até o final da segunda, em que foi preciso para a construção de navios e blindados, submarinos e aviões (Figura 2.3).



Figura 2.3 - Navios de guerra antigos

Fonte: (Inspeção de equipamentos, 2013)

Após as guerras, a corrida espacial e o desenvolvimento da indústria demandaram o aprimoramento dos métodos de soldagem existentes e o desenvolvimento de novos. Devido a essas necessidades, o processo MAG passou a utilizar gás carbônico, diminuindo seus custos. Além disso, foi desenvolvida a técnica utilizando arame tubular que se mostrou altamente produtiva.

Atualmente, existem diversos métodos de soldagem, cada um com suas peculiaridades, que podem ser subdivididos em dois grupos: os métodos que usam calor e os métodos que usam pressão. Métodos, como TIG/GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) (Figura 2.4(1)), MIG/MAG/GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) (Figura 2.4(2)) e eletrodo revestido/SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) (Figura 2.4(3)), são algumas das principais técnicas que usam o calor para fundir o material e uni-los. Processos, como Soldagem por explosão (*Explosive Welding*– EXW), Ultrassom (*UltraSonic Welding* – USW) e soldagem a frio (*Cold Welding* – CW), são alguns dos processos relevantes que usam pressão para unir as partes.



Figura 2.4 - Desenho esquemático do processo de Solda TIG (A), Solda MIG (B) e Solda de eletrodo (C)

Fonte: (A) (tig for beginners),(B) (indiamart) e (C) (Lowe's).

Estima-se que hoje em dia estão sendo utilizados mais de 70 processos de soldagem mundialmente, sendo este um número dinâmico, pois vários outros processos estão em desenvolvimento em nível de pesquisa e projetando para breves novas alterações no mercado de soldagem. (NERIS, 2012)

Com difusão da soldagem nas linhas de montagens nos dias atuais, a necessidade da utilização de um processo como maior produção e versatilidade, a soldagem GMAW

ganha espaço por poder unir diversos fatores, como a possibilidade de uma variada gama de metais e uma fácil automatização.

Esse trabalho tem foco no processo de soldagem GMAW que usa um arco elétrico para gerar calor com o objetivo de unir as duas partes metálicas.

2.3. Processo MIG/MAG

O processo de soldagem MIG/MAG, também conhecido como GMAW é um processo de soldagem, que cria a união de duas peças metálicas por meio de calor gerado por um arco elétrico criado quando o eletrodo, metálico contínuo e consumível, se aproxima a peça a ser soldada.

Quando o eletrodo funde, cria-se uma poça de fusão, essa poça de fusão é protegida por um escudo de gás, que evita contaminações, além de auxiliar a criação e a estabilidade do arco, como pode ser visto na Figura 2.5. Quando a soldagem utiliza um gás inerte, o processo é chamado MIG, geralmente é usado gás hélio ou argônio. Quando a soldagem utiliza um gás ativo, é chamado de MAG, geralmente é usado gás carbônico (CO_2) ou uma mistura de CO_2 , com argônio e O_2 .

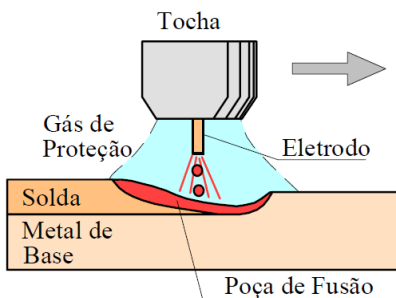


Figura 2.5 - Soldagem GMAW

Fonte: (MODENESI, 2000)

Os gases inertes puros geralmente são usados em metais e ligas não ferrosas, os gases inertes com adição de gases ativos são utilizados em aços liga e em misturas com maior

concentração de gás ativo ou gases ativos puros, são empregados na soldagem de aço carbono.

O processo é normalmente operado de forma semi-automática, podendo ser, também, mecanizado ou automatizado. É o processo de soldagem a arco mais usado com robôs industriais. Como trabalha com arame contínuo (o que permite um alto fator de ocupação do operador) e com elevadas densidades de corrente no eletrodo (elevada taxa de deposição) e apresenta uma elevada produtividade. Estes aspectos têm levado a uma utilização deste processo (e da soldagem com arames tubulares) em países desenvolvidos. (MODENESI, 2000)

O processo MIG/MAG apresenta produtividade elevada com baixo custo porque utiliza um eletrodo contínuo, que possibilita a soldagem de uma grande quantidade de peças sem a substituição do eletrodo. Podemos destacar como vantagens desse processo as taxas altas de deposição de metal e penetração, além da possibilidade de se soldar em qualquer posição. Este processo também possui algumas limitações, como a soldagem de juntas de difícil acesso, a sensibilidade do escudo de gás a correntes de ar e a geração de respingos.

2.4. Microestrutura

As alterações nas microestruturas do metal interferem nas características esperadas para as peças, nesse sentido, demandam especial atenção na análise.

Ao se observar no microscópio metalográfico a seção de um metal puro, polido e atacado convenientemente, pode-se notar que este é formado por grãos separados entre si por contornos de grãos. No nível atômico, os grãos são formados por um arranjo de átomos que pode ser descrito pela repetição, nas três dimensões, de uma unidade básica (célula unitária), isto é, um agrupamento de um pequeno número de átomos com uma configuração característica. Este arranjo de átomos forma a estrutura cristalina do material. Existem diferentes tipos de estruturas cristalinas, caracterizadas por suas células unitárias. A grande maioria dos metais, contudo, existe em uma, ou mais, de três estruturas básicas: Cúbica de Corpo Centrado (CCC), Cúbica de Face Centrada (CFC) e Hexagonal Compacta (HC), (Figura 2.6). (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012)

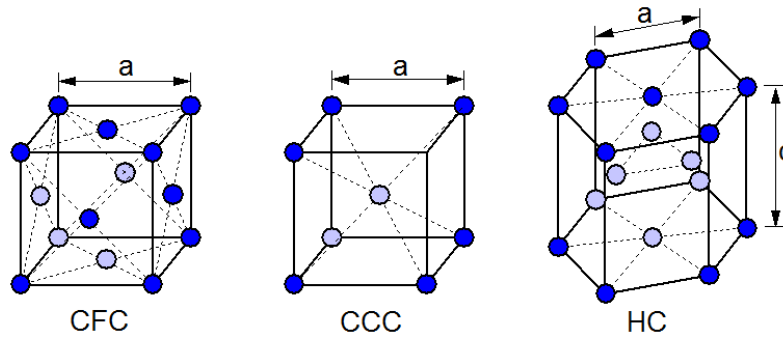


Figura 2.6 - Estruturas cristalinas mais comuns dos sólidos metálicos. As dimensões a e c são os parâmetros de rede.

Fonte: (MODENESI, MARQUES e SANTOS, 2012)

Cada tipo de estrutura cristalina possui suas características e particularidades, por exemplo, os metais que se cristalizam na configuração CFC tendem a ter ductilidade, tenacidade e condutividade, tanto elétrica quanto térmica, mais elevadas. A forma cristalina pode ser modificada de diversas maneiras, as mais usuais em tratamentos térmicos utilizam temperaturas e pressões diferentes, colocando o metal em uma determinada temperatura e com seu resfriamento controlado, para obter as características requisitadas.

As peças, normalmente, não são constituídas por metal puro. É mais comum trabalhar-se com ligas metálicas, que são misturas de um metal com outro ou com um material não metálico, para obtenção de propriedades diferentes. Por exemplo, o aço composto por ferro e carbono, apresenta resistência mecânica mais elevada quanto maior for o seu teor de carbono.

A constituição microestrutural do aço carbono, sofre diversas transformações na medida em que passa por resfriamento e se solidifica. Conforme o aço se resfria, as estruturas vão se modificando e se transformam em estruturas cristalinas que formam grãos com características diferentes, podendo ser alteradas com tratamentos térmicos. As diferentes configurações assumidas pelos grãos interferem nas propriedades do metal, que podem variar de acordo com o processo de resfriamento, formando os seguintes tipos de microestrutura: austenita, cementita, perlita e ferrita (Figura 2.7).

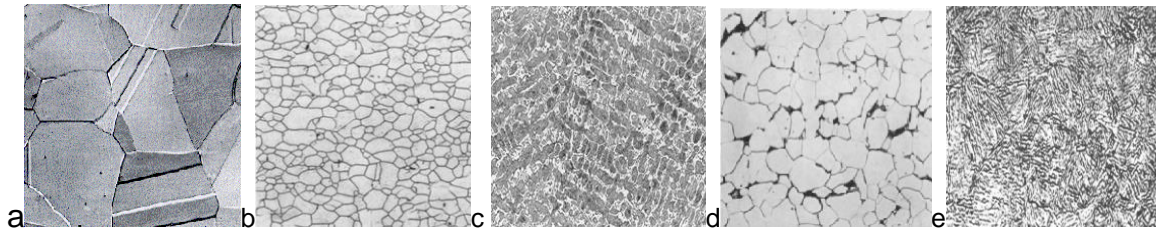


Figura 2.7 - Microestrutura da austenita (a), Ferrita (b), cementita (c), Perlita (d) e Martensita (e)

Fonte: (a), (b), (c) e (d) (fvnunes) e (e) (PASCOALI, 2008)

A austenita é uma solução sólida do ferro gama com estrutura CFC, formada por grãos poligonais irregulares que apresenta boa resistência mecânica e tenacidade. A ferrita é uma solução sólida do ferro alfa com estrutura CCC, possui baixa dureza e resistência à tração. A cementita é um carboneto de ferro, que apresenta dureza elevada e segundo (CHIAVERINI, 1988) é responsável pela dureza e resistência dos aços de alto carbono. A perlita é uma mistura de ferrita e cementita, aproximadamente 80% ferrita, possui características intermediárias, que dependem do tamanho das partículas de cementita. A martensita é composta por lâminas de austenita cisalhadas, criadas pelo resfriamento rápido do aço, possui aspecto de agulha longa e grande quantidade de tensões internas, apresenta um reticulado tetragonal e dureza muito elevada. A após o tratamento térmico de revenido, a martensita se transforma em uma estrutura chamada de martensita revenida (Figura 2.8), com o alívio de tensões, sua dureza é reduzida, sua estrutura deixa de ser tetragonal e se torna uma mistura de ferrita e cementita.

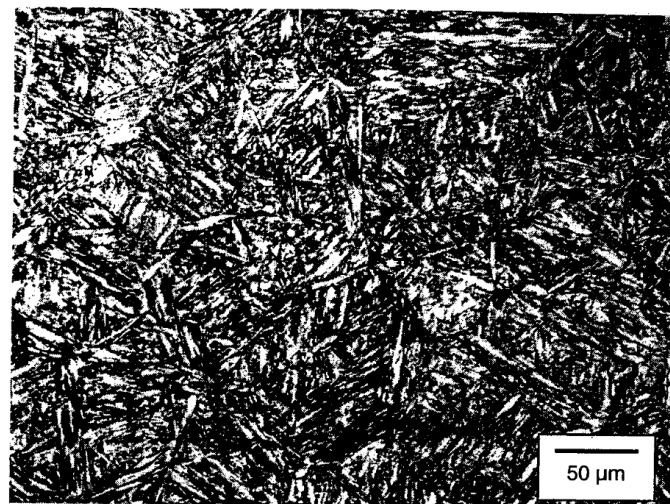


Figura 2.8 - microestrutura do aço inoxidável 410 temperado e revenido (a)

Fonte: (a) (LIPPOLD e KOTECKI, 2005)

Outro aspecto a ser analisado é a possibilidade de alteração nas microestruturas da zona termicamente afetada (ZTA), que pode prejudicar a resistência estrutural da peça da mesma forma que um defeito no cordão de solda. A ZTA é uma zona que fica em volta do cordão e quando se fragiliza pode criar uma falha tão destrutiva quanto um defeito no cordão.

2.5. Tratamentos térmicos

Tratamentos térmicos são processos que utilizam o calor de forma controlada para modificar as propriedades dos materiais. Estes tratamentos modificam as características do material utilizando operações sob condições controladas de aquecimento, tempo, velocidade de resfriamento, temperatura e atmosfera. Há diversos tipos de tratamentos térmicos, os mais utilizados em metais são: o recozimento, a têmpera, o revenido e a normalização.

O recozimento é um tratamento adotado para remover tensões devidas à tratamentos mecânicos a quente ou a frio, melhorar a usinabilidade de materiais muito duros, modificar propriedades mecânicas e características magnéticas dos metais, remover gases do material, entre outras funções. O recozimento pode ser total ou pleno, isotérmico ou cíclico, para alívio de tensões, entre outros. O recozimento total, consiste no aquecimento do aço acima da zona crítica, durante o tempo necessário para se obter uma solução em sua fase gama, seguido de resfriamento lento dentro do forno ou fora com controle de velocidade de resfriamento. No recozimento isotérmico, o processo de aquecimento é equivalente ao do recozimento total, mas o resfriamento ocorre de modo rápido até a faixa de temperatura de transformação da fase gama e mantém-se até a transformação completa das fases. O recozimento por alívio de tensões consiste no aquecimento lento até a faixa de 500° C, podendo tornar-se mais rápido até o limite inferior da zona crítica, sem que ocorram mudanças de fases ou grandes alterações nas propriedades mecânicas do material.

Outro tratamento bastante utilizado é a normalização, que compreende no aquecimento do material a temperatura acima da zona crítica e no resfriamento, normalmente, ao ar livre. É aplicada para refinar a granulação grosseira de aços fundidos, laminados e forjados, além de ser empregada como tratamento preliminar à têmpera, por diminuir a tendência de empenamento e facilitar a solução de elementos de liga e carbonetos.

A têmpera é um tratamento em que se aquece o material a uma temperatura superior à crítica e, em seguida, se resfria rapidamente. Esse processo pode ser feito com resfriamento em óleo, água, salmoura ou no ar. Tem como objetivo alterar a microestrutura do material, criando estruturas martensíticas, que aumentam a resistência do material. Frequentemente, o material fragiliza-se após a têmpera, precisando de outro tratamento para aliviar suas tensões e melhorar sua ductilidade.

O revenido é um tratamento comumente utilizado após a têmpera ou para melhorar a ductilidade de um material. É um tratamento em que se aquece o material a temperaturas relativamente baixas, em geral entre 200° C e 300° C, para aliviar tensões e aumentar a ductilidade. O revenido modifica a microestrutura da peça temperada, transformando a martensita em martensita revenida.

Para este trabalho os tratamentos são relevantes, pois durante a aplicação dos cordões de solda para produção da peça o material foi reaquecido, se manteve aquecido e teve resfriamento lento, tratando termicamente camada a camada, podendo haver modificações nas microestruturas do material e modificações nas suas propriedades mecânicas.

2.6. Aço inoxidável AISI 410 NiMo

Os aços inoxidáveis são um grupo muito importante tanto para a indústria quanto para o dia a dia das pessoas, por serem resistentes à corrosão, que os torna aplicáveis em ambientes hostis, em contato com químicos corrosivos ou em situações em que não se possa ter risco de contaminação, como em cirurgias ou no preparo de alimentos. Com a adição de cromo, os aços tornam-se mais resistentes à corrosão pelo ar e pela umidade, esta liga é conhecida como aço inoxidável, que contém a partir de 10,5% de cromo.

O aço inoxidável AISI 410 NiMo estudado neste trabalho é um material de grande relevância para indústria e tem ampla aplicação na engenharia. É um aço inox martensítico, este tipo de aço é convencionalmente utilizado quando se requer uma boa resistência à tração, à fadiga, à fluência em ambientes que necessitam de resistência à corrosão e ao calor moderada, aproximadamente 600° C. Este aço é utilizado em turbinas a vapor e gás, em indústrias como a de petróleo e de fabricação de equipamentos, além de ser usado na indústria petroquímica.

O material utilizado na confecção da peça a ser analisada é um aço inoxidável 410 NiMo, composto por ferro, carbono, cromo, níquel e molibdênio, com baixa concentração de carbono, por volta de 0,06% e com concentração de cromo de aproximadamente 13%. Podemos observar algumas propriedades nos gráficos apresentados na Figura 2.9.

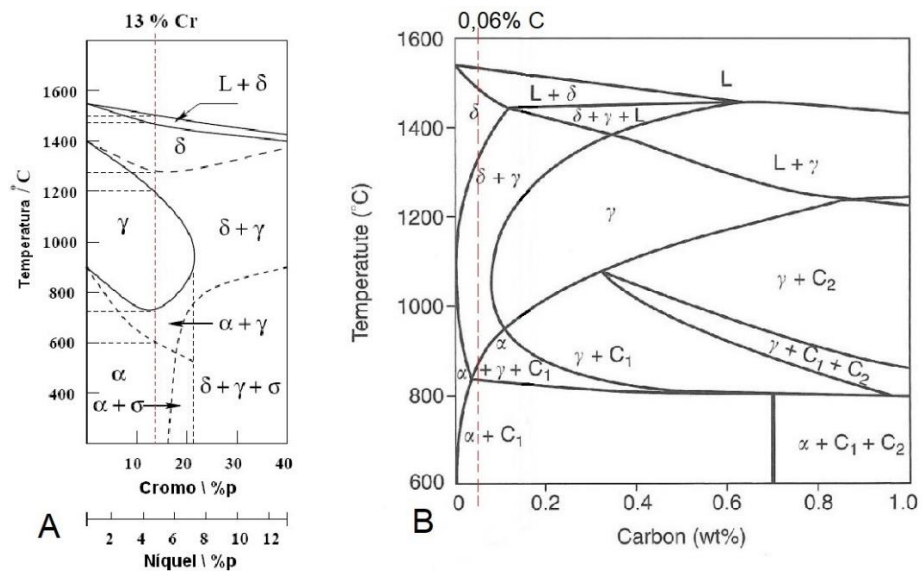


Figura 2.9 - Diagramas de fases do aço AISI 410 para percentual de cromo (A) e carbono (B)

Fonte: (A) (FOLKHARD, 1988) modificado e (B) (LIPPOLD e KOTECKI, 2005) modificado

O gráfico, Figura 2.9A, mostra as fases de um aço com relação a concentração de cromo e a temperatura de resfriamento, com resfriamento extremamente lento, sendo o aço 410 NiMo com 13% de cromo identificado pela linha pontilhada vermelha. No gráfico, Figura

2.9B, que apresenta a variação da concentração de carbono em função da temperatura de resfriamento, a linha vermelha indica uma concentração inferior a 0,2% de carbono, caracterizando o metal analisado.

O diagrama demonstra como ocorre o resfriamento do aço 410 NiMo com 13% de cromo, desde sua fase líquida, passando por várias fases, apresentando uma forma gama, assim que se solidifica e depois a austenita começa a se transformar em ferrita alfa, criando-se uma fase com a mistura das duas e depois a ferrita torna-se predominante. Essas mudanças podem ser observadas na Figura 2.10.

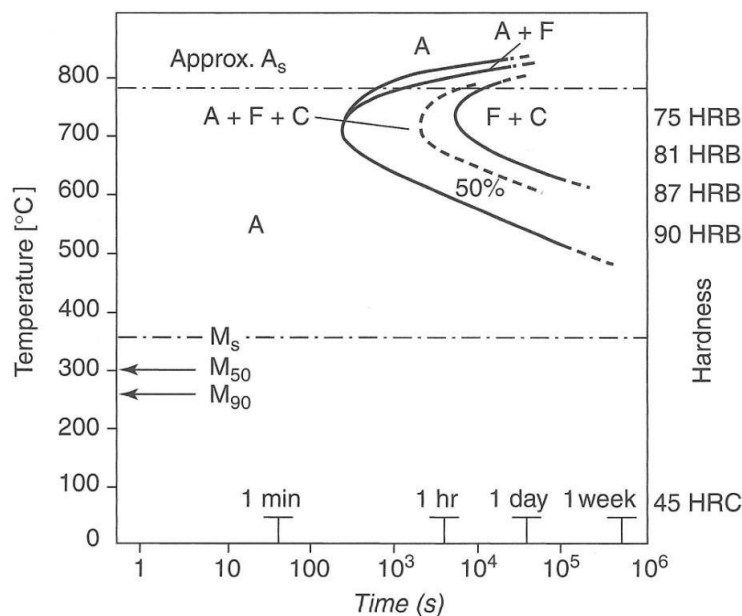


Figura 2.10 - Diagrama TTT aço 410

Fonte: (LIPPOLD e KOTECKI, 2005)

Durante o resfriamento de uma solda, que geralmente ocorre de forma mais rápida, a austenita se transforma em martensita, esta transformação tem início abaixo de 400°C e se completa a temperatura próxima da ambiente, proporcionando maior resistência mecânica ao material.

2.7. Metalografia

A metalografia é um processo em que uma parte do metal é cortada, lixada, polida e atacada com reagente químico, de forma que se possa ter uma visão nítida e clara no microscópio óptico da microestrutura do metal, podendo-se fazer análises dos tipos de grãos presentes, das misturas de grãos e impurezas presentes na peça. Com essas informações é possível ter se uma ideia das propriedades mecânicas do material e saber se as propriedades almeçadas estão de acordo com as conseguidas no metal.

A metalografia além de permitir observar as microestruturas do cordão de solda e arredores, também possibilita análise de porosidade, trincas e outros defeitos que possam ocorrer no cordão durante a solidificação do metal líquido. Possibilita também a análise da continuidade das microestruturas das duas peças após a junção, podendo mostrar se houve continuidade ou descontinuidade não visível a olho nu.

2.8. Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

A microestrutura pode ser analisada por meio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), que utiliza um feixe de elétrons em vez de uma lâmpada (Figura 2.11), diferente dos microscópios ópticos. O feixe de elétrons tem uma maior resolução que os fótons de luz, podendo ser usado para mapear a superfície e procurar possíveis contaminações. O microscópio utiliza um filamento metálico aquecido para produzir um feixe de elétrons, que podem ter vários diâmetros. A imagem é formada não pela reflexão dos raios, como no ótico, mas pela interação entre o feixe e as partículas do material.

“Um microscópio eletrônico de varredura (MEV) utiliza um feixe de elétrons no lugar de fótons que são utilizados nos microscópios ópticos convencionais, o que permite solucionar o problema de resolução relacionado com a fonte de luz branca.” (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007)

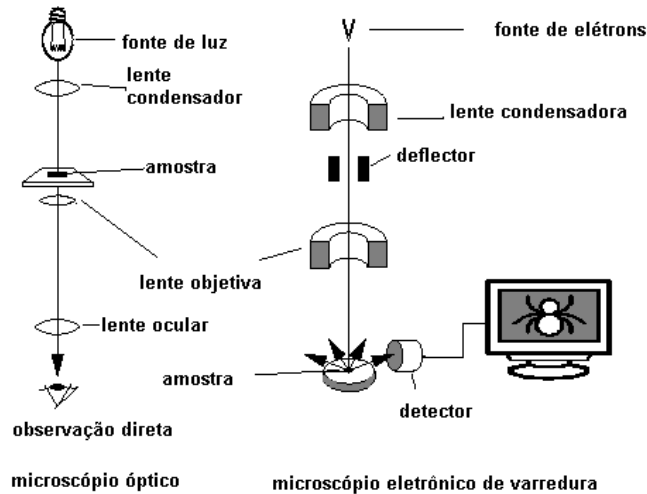


Figura 2.11 - Desenho esquemático para comparação entre microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura

Fonte: (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007)

2.9. Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS)

A Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) é um teste utilizado para mapeamento dos elementos do material que usa a estimulação por elétrons para mostrar a composição química do material, podendo apontar as possíveis mudanças químicas ou identificara composição de uma substância desconhecida na peça analisada.

O EDS utiliza um feixe de elétrons que estimula os átomos dos elementos para emitirem uma radiação no espectro do Raio-X. Cada elemento químico emite uma radiação diferente quando estimulado, assim é possível distinguir os diferentes elementos presentes em uma amostra.

O EDS é muito utilizado em conjunto com um MEV, pois aproveita os feixes de elétrons produzidos pelo microscópio para estimular a amostra. Além de informar os elementos presentes, o EDS pode quantificar cada elemento, mensurando a quantidade de radiação que cada um emite e calculando a quantidade de cada elemento presente na amostra.

2.10. Microscopia Confocal

É um microscópio que utiliza uma iluminação por varredura de feixes de laser para criar uma imagem que proporciona melhor noção de profundidade. O equipamento emite um feixe laser difratado e refletido por um espelho, possibilitando que os feixes foquem em vários planos, fazendo uma reconstrução tridimensional da topologia do material ou criando imagens de melhor resolução que um microscópio óptico comum.

2.11. Ensaio de dureza

O ensaio de dureza permite medir a resistência do material, se o material apresenta dureza elevada é mais frágil e se é muito macio possui baixa resistência. Os ensaios de dureza utilizam uma máquina que aplica pressão ao material com o controle da carga, das dimensões do penetrador e do tempo para calcular sua dureza.

O ensaio de dureza o Rockwell, pode-se usar um penetrador com uma esfera temperada ou um penetrador cônico de diamante (Figura 2.12). O ensaio de dureza Rockwell pode ser aplicado a um leque de materiais maior do que o de dureza Brinell, além de ter uma leitura mais fácil, usando somente o marcador, sem necessitar de cálculos, com a escala selecionada. Para se fazer um ensaio de dureza Rockwell, primeiro se aplica uma pré-carga, para garantir um contato firme entre material e penetrador, depois se aplica a carga e o mostrador indica a dureza, de acordo com a escala, HRB ou HRC por exemplo.

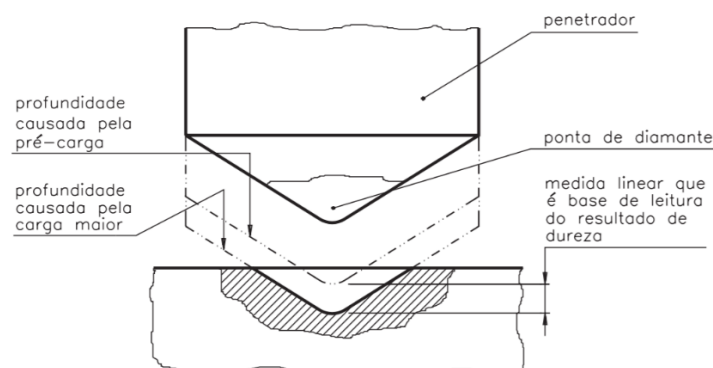


Figura 2.12 - Penetrador de Dureza Rockwell

Fonte: (UFPR)

3. Descrição do experimento

3.1. Processo de construção da peça

O presente trabalho teve como ponto de partida o Projeto de Graduação desenvolvido pelo discente (ANDRADE, 2013), orientado pelo professor Guilherme Caribé, no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, intitulado “Desenvolvimento de Software de Fatiamento de Sólidos Tipo Casca e Geração de Trajetórias para Fabricação de Peças por Deposição de Metal em Camadas Sucessivas Utilizando o Processo GMAW”. Neste trabalho, foi realizado um cordão de solda, através do processo MIG/MAG com um corpo de prova de geometria piramidal, de aço inoxidável 410 NiMo. Foram tiradas medidas das distâncias internas entre as camadas, que em média são: L1 a L3 de 137,82 mm e L2 a L4 de 137,74 mm, conforme a Figura 3.1.

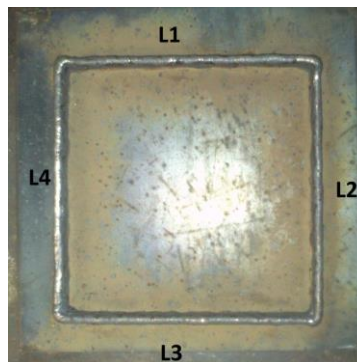


Figura 3.1 - Identificação dos lados da base da peça depositada

Fonte: (ANDRADE, 2013)

Para a construção da peça foi utilizado um arame Tubrod 410 NiMo MC com 1,2mm de diâmetro, utilizando mistura argônio com CO₂ como gás de proteção. Os parâmetros iniciais adotados foram: a velocidade de alimentação do arame de, 5 m/min, a tensão de 18V, a velocidade de soldagem de 10mm/seg e uma corrente esperada por volta de 180A. Ao final do processo foi medida uma velocidade de alimentação do arame de 2,5 m/min e uma tensão 15,5V. Outro parâmetro definido foi a taxa de crescimento de 1 mm/volta, assim parâmetros como velocidade de alimentação do arame e tensão foram modificados para manter a estabilidade do processo de construção.

3.2. Procedimento utilizado na retirada da amostra

Este Projeto de Graduação teve início com a retirada de uma amostra do corpo de prova construído por (Andrade, 2013) no laboratório do Grupo de Automação e Controle (GRACO) da Universidade de Brasília (UnB), com a utilização do robô ABB R2000, usando uma fonte de soldagem GMAW, em uma chapa de aço doce fazendo vários cordões de solda, um em cima do outro, até finalizar a forma.

A partir da amostra retirada foi realizada a análise metalográfica, de microscopia confocal e eletrônica de varredura e o ensaio de dureza, com o objetivo de averiguar as características mecânicas e as possíveis alterações microestruturais ocorridas durante o processo construtivo.

Para corte do material para retirada de uma amostra foi utilizada uma serra de fita, sob refrigeração constante para evitar influência do aquecimento na microestrutura dos cordões de solda produzidos Figura 3.2.

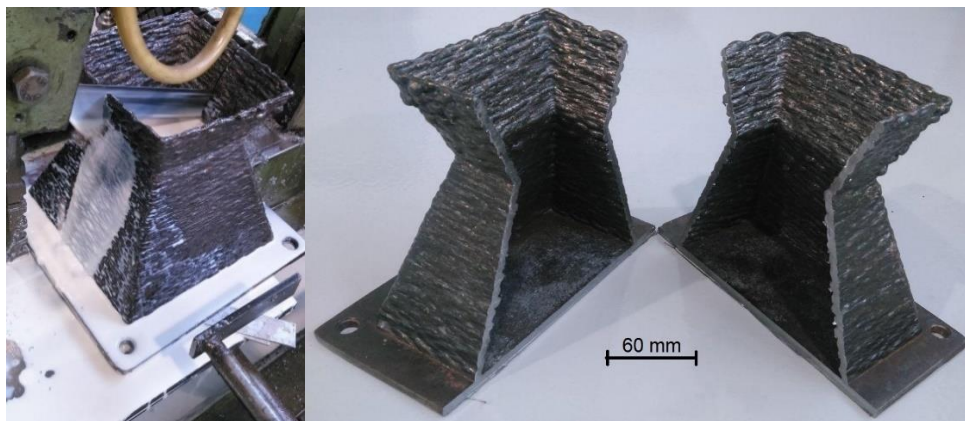


Figura 3.2 - Foto da peça de aço 410 NiMo cortada de forma transversal

3.3. Preparo da amostra para micrografia

O material cortado foi lixado e polido, na Politriz de modelo PANTEC POLIPAN-U 600rpm (Figura 3.3), com lixas 120#, 220#, 320#, 400#, 600#, 800# e 1200#. O polimento da peça foi feito com uma solução de alumina 1 μ m.



Figura 3.3 - Máquina Politriz modelo POLIPAN-U 600 rpm e microscópio ótico modelo Olympus BX51

Após o polimento, foi feita a limpeza da amostra em água corrente com passes suaves de algodão e, em seguida, foi limpa e seca com um jato de ar pressurizado. Posteriormente, a peça foi atacada com uma solução Kalling nº1 (Tabela 1), em imersão durante 2 minutos, para iniciar a micrografia, por meio de microscopia óptica, na máquina de modelo Olympus BX51 (Figura 3.3), identificando as fases formadas, a microestrutura de grãos dos cordões de solda e as zonas termicamente afetadas.

Tabela 1 - Composição química para o preparo do reagente Kalling nº1

Composto químico	Fórmula	Estado	Quantidade
Cloreto de cobre	CuCl_2	Pó	1,5g
Ácido clorídrico	HCl	Líquido	33mL
Etanol	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	Líquido	33mL
Água destilada	H_2O	Líquido	33mL

Dando continuidade à análise metalográfica foi utilizado, também, um microscópio confocal para melhor visualização das microestruturas, utilizando um conjunto de lentes com capacidade de aumento de 1000X.

Posteriormente, a amostra novamente lixada, com lixas a partir da 800# e foi feito outro ataque, parecido com o anterior, desta vez, com uma solução de HCL e etanol, em que

foi usado 90ml de HCL e 50ml de etanol. Depois a peça foi novamente analisada no microscópio confocal. O segundo ataque foi feito para se ter uma maior revelação das microestruturas da amostra.

3.4. Preparo da amostra para macrografia

Na sequência do experimento, a amostra foi lixada outra vez com lixa 1200# na politriz, para retirar o ataque anterior e fazer outro ataque com uma mistura de reagente Villela e ácido crômico com duração de 2 minutos para realização da macrografia (Figura 3.4). Foi aplicado um reagente diferente porque os anteriormente utilizados na micrografia apresentaram pouca revelação dos cordões de solda.



Figura 3.4 - Foto da macrografia de uma amostra de aço inoxidável 410 construído de cordões de solda

3.5. Metodologia utilizada para realização do ensaio de dureza

O ensaio de dureza Rockwell foi executado utilizando-se o equipamento ZwickRoell ZHU250(Figura 3.5). Este ensaio testou a dureza da peça. Os dados coletados no ensaio permitem analisar as propriedades mecânicas da amostra, considerando cada camada, buscando-se verificar as mudanças microestruturais que possam afetar suas propriedades mecânicas. Para isso foram feitas diversas verificações em cordões diferentes.



Figura 3.5 - Máquina de ensaio de dureza modelo ZwickRoell ZHU250

3.6. Procedimento adotado para análise no MEV e EDS

Após o ensaio de dureza, foi feita uma análise por meio de Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), localizado no laboratório de ciências dos materiais da UnB. Os ensaios de MEV foram realizados em equipamentos FEI QUANTA 200F e JEOL JSM-7100F (*Figura 3.6*). Para isso a amostra foi dividida em quatro amostras menores, que foram polidas e atacadas com o reagente Kalling, nos mesmos parâmetros do ataque feito anteriormente. Com essa análise foi possível avaliar suas características superficiais e possíveis defeitos com maior precisão, devido ao maior poder de ampliação do MEV. Concomitantemente, uma análise de energia dispersiva (EDS) foi realizada, para verificar a composição de possíveis contaminações e/ou oxidações.



Figura 3.6 - Microscópio eletrônico de varredura modelos JEOL JSM-7100F

4. Resultados Experimentais

A peça analisada foi fabricada no trabalho elaborado por ANDRADE (2013), conforme descrito no tópico 3.1, utilizando um robô e uma fonte de solda MIG/MAG (GMAW), fazendo vários cordões sobrepostos, conforme ilustrado na Figura 4.1.



Figura 4.1 - Foto da construção do corpo da peça feita de cordões de solda de aço 410 NiMo

Fonte: (ANDRADE, 2013)

A variação de coloração indicada na imagem feita pela câmera térmica, conforme a Figura 4.2, mostra que há uma diferença de temperatura entre as camadas de solda, durante o processo construtivo, que cria um gradiente de temperatura. As camadas inferiores apresentam temperaturas mais baixas, aproximadamente entre 400°C e 500°C, enquanto as camadas superiores, se mostram com temperaturas mais elevadas, próximas ou acima de 550° C.

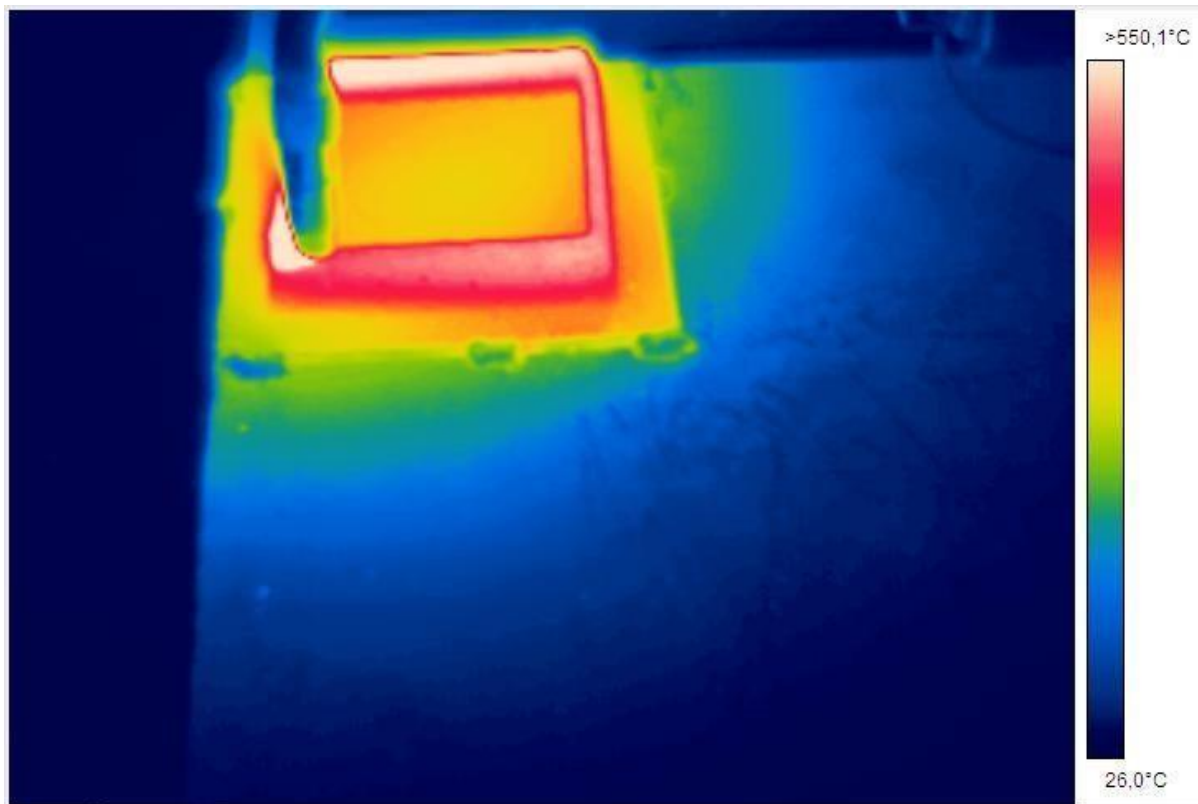


Figura 4.2 - Foto da câmera térmica tirada durante o processo de construção do corpo de prova de aço 410 NiMo

Fonte: (ANDRADE, 2013)

4.1. Caracterização microestrutural

As microestruturas do metal foram analisadas a partir de uma amostra retirada da peça em aço 410 NiMo, com comprimento aproximado de 100 mm. Essa amostra passou por dois ataques efetivos, um com o reagente Kalling e outro com HCl, como descrito no tópico 3.3. Depois de cada ataque, a amostra foi examinada no microscópio confocal com aproximação de 1000X. Durante as observações foram feitas imagens a cada 10mm.

O reagente Kalling deu maior visibilidade às microestruturas dos pontos extremos da amostra. Dessa forma, foram selecionadas as imagens dos pontos marcados a partir da base da amostra a 0mm e a 100mm, ilustrados na (Figura 4.4A) e na (Figura 4.4B).

O ataque com HCL possibilitou a retirada de diversas imagens das microestruturas ao longo de toda amostra. Selecionaram-se as imagens mais representativas de cada trecho retiradas dos pontos situados entre 0mm e 35mm, 35mm e 65mm, 65mm e 85mm e de 85mm a 100mm, conforme o esquema apresentado a Figura 4.3.

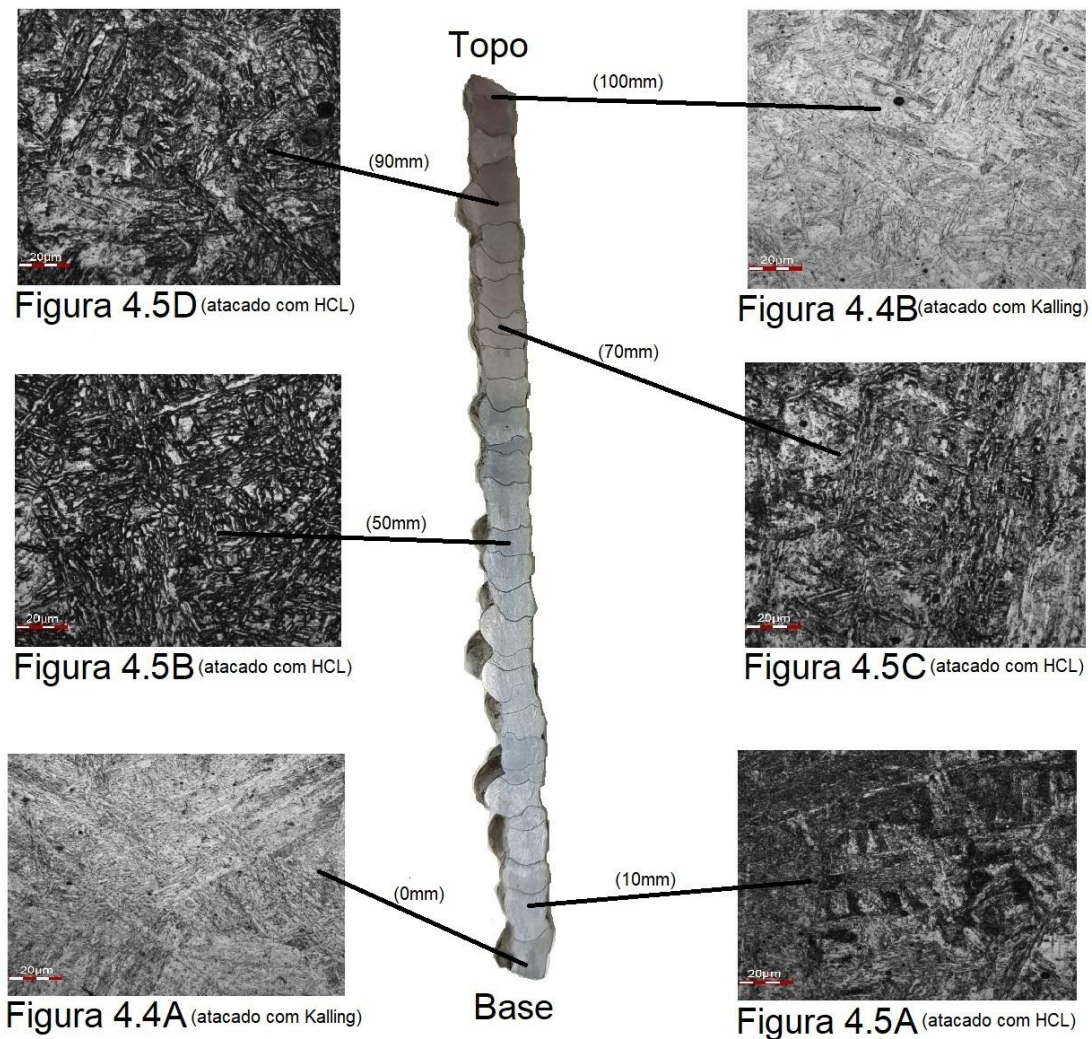


Figura 4.3 - Imagem esquemática da localização das imagens de microestrutura ao longo da amostra de aço 410 NiMo

A Figura 4.4. mostra as imagens retiradas através do microscópio confocal após o primeiro ataque realizado com o reagente Kalling. A Figura 4.4A mostra uma área

próxima à base da amostra e enquanto a Figura 4.4B apresenta uma imagem tirada do outro extremo, aproximadamente a 100mm da base da amostra.

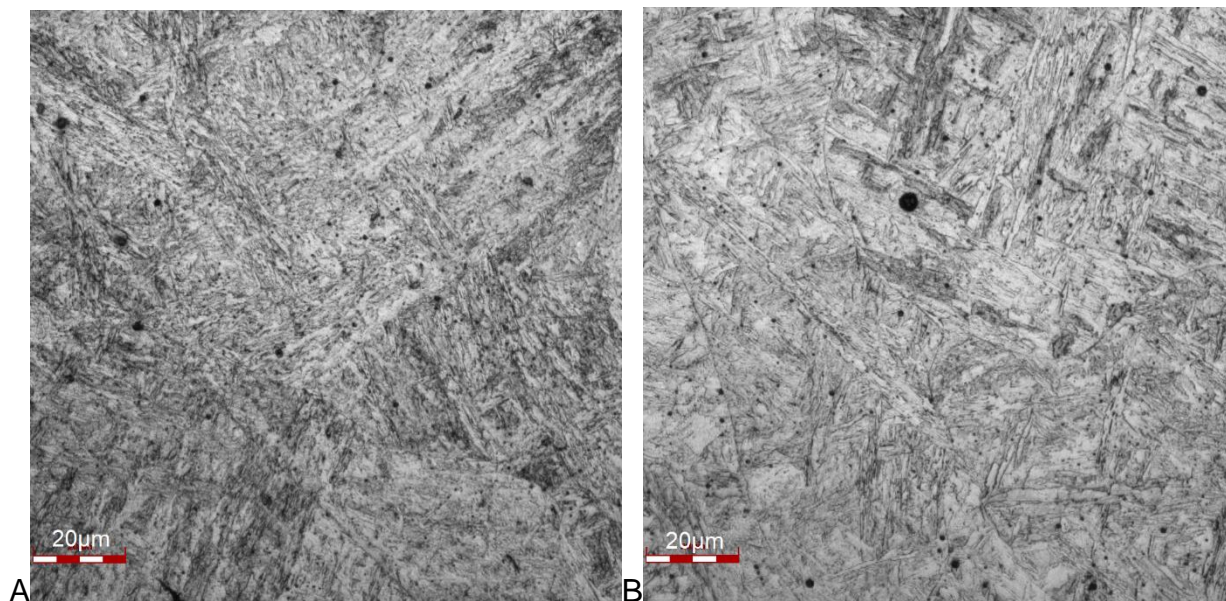


Figura 4.4 - Metalografia feita com Kalling e aumento de 1000X de um aço 410 NiMo

Observa-se na Figura 4.4A e na Figura 4.4B que a morfologia da amostra apresenta uma estrutura em agulhas, típica de uma estrutura martensítica, sendo que a primeira parece ter uma estrutura mais refinada, podendo ser uma martensita revenida.

Nota-se, ainda, a existência de alguns pontos pretos que podem ser porosidades, precipitações ou alguma contaminação da amostra. Esses defeitos que, possivelmente, ocorreram durante a produção da peça, foram examinados no MEV e foi feito um EDS para análise de suas composições químicas.

O segundo ataque foi realizado com um reagente a base de HCl, utilizando-se o método descrito no tópico 3.3, que resultou nas imagens obtidas no microscópio confocal, indicadas nas Figura 4.5.

A Figura 4.5 representa o padrão aproximado de microestrutura encontrada entre 0 e 35mm da base da amostra. Já a Figura 4.5B representa o padrão de microestrutura do trecho entre 35 a 65mm da base da amostra. A Figura 4.5C representa o padrão do trecho entre 65 a 85mm da base da amostra e a Figura 4.5D representa a parte final da amostra, de 85 a 100mm da base da amostra.

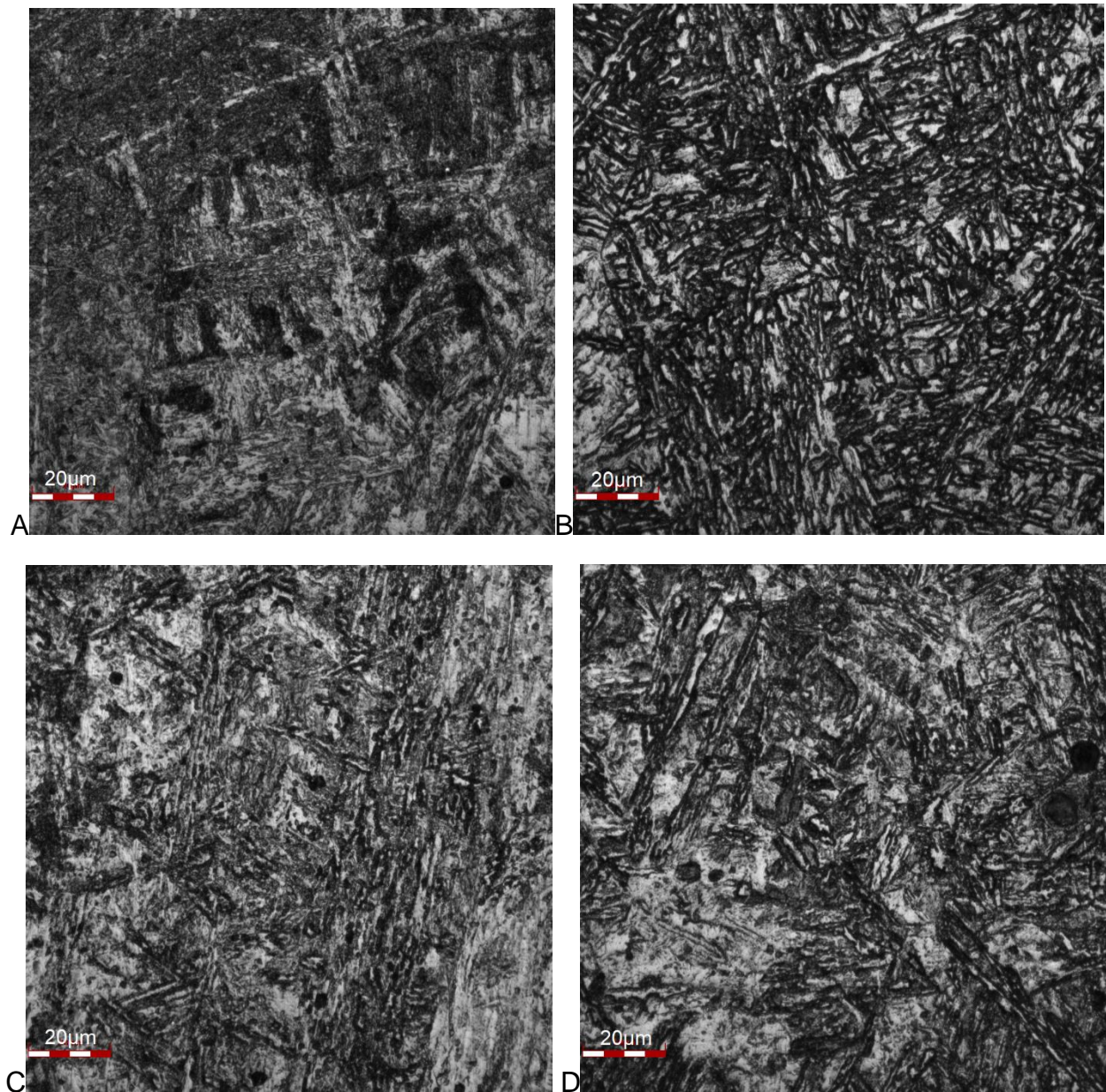


Figura 4.5 - Metalografia feita com reagente a base de HCl e aumento de 1000X de trechos diferentes de amostra de aço 410 NiMo, "A" representando o trecho entre 0 e 30mm, "B" entre 40 e 60mm, "C" entre 70 e 80mm e "D" entre 90 e 100mm.

As imagens da Figura 4.5 mostram que houve mudança na microestrutura da peça de acordo com a construção em camadas. Quando uma estrutura é soldada em camadas, as camadas inferiores são reaquecidas na medida em que a camada que se sobrepõe está sendo aplicada, isto provoca alteração das estruturas já formadas e também funciona como um pré-aquecimento no processo construtivo, o que altera as estruturas

que vão ser construídas. Todos esses fatores interferem na formação da microestrutura e funcionam como tratamento térmico.

Verificando-se os extremos da amostra indicados na Figura 4.5A (entre 0 e 35mm da base) e na Figura 4.5D (entre 85 e 100mm da base), observa-se que na imagem retratada na Figura 4.5A há estruturas em agulhas, caracterizando estruturas martensíticas, mostrando uma estrutura mais fina que na Figura 4.5D, que pode indicar uma martensita revenida, como visto em Santos (2013) e em Lippold (2005), provavelmente, causada por um revenimento provocado pelo reaquecimento e pelo fato da peça ter se mantido aquecida.

Quando se compara o segmento da amostra apresentado na Figura 4.5A (entre 0 e 35mm da base) com o trecho mostrado na Figura 4.5B, que representa as microestruturas do trecho de 35 a 65mm da base da amostra, percebe-se que o grau de refinamento da microestrutura aumentou, aparentando maior revenimento. A diferença entre ambas pode ser atribuída a uma pausa ou interrompimento no processo de fabricação no trecho entre 30 e 40 mm. Tal diferença pode ter sido acentuada por uma redução no intervalo entre os passes do cordão de solda, o que sugere um resfriamento mais lento nestas camadas do que em outras.

Examinando-se as partes finais da amostra, indicadas pela Figura 4.5C (65 a 85mm da base) e pela Figura 4.5D (85 a 100mm da base) não se observam mudanças significativas. Entretanto, ao se comparar esses trechos com o pedaço da amostra representado pela Figura 4.5B, verifica-se que as microestruturas do meio são mais refinadas que as das pontas, o que pode ter sido ocasionado por outra parada no processo construtivo da peça. Avaliando-se a microestrutura da amostra, nos trechos Figura 4.5C e Figura 4.5D mencionados, nota-se que são mais compatíveis com uma estrutura martensítica, sem ou com menos revenimento que as estruturas mostradas nas Figura 4.5A e a Figura 4.5B, possivelmente, por terem passado por um resfriamento mais rápido do que as outras estruturas.

4.2. Caracterização de dureza

Depois da macrografia da amostra, descrita no tópico 3.4 e ilustrada na Figura 3.4, foi realizado o ensaio de dureza Rockwell para medir a dureza nos cordões de solda, como relatado no tópico 3.5. Assim, torna-se possível avaliar se houve mudança expressiva entre os cordões de solda. A Figura 4.6 indica os pontos em que as medidas foram realizadas.



Figura 4.6 - Foto dos pontos em que foram medidas as durezas em um aço 410 NiMo

A medição foi executada em 30 pontos, começando pelo lado esquerdo, onde fica a base da amostra apresentada na Figura 4.6. O resultado do ensaio apresentou os valores medidos, conforme o gráfico da Figura 4.7.

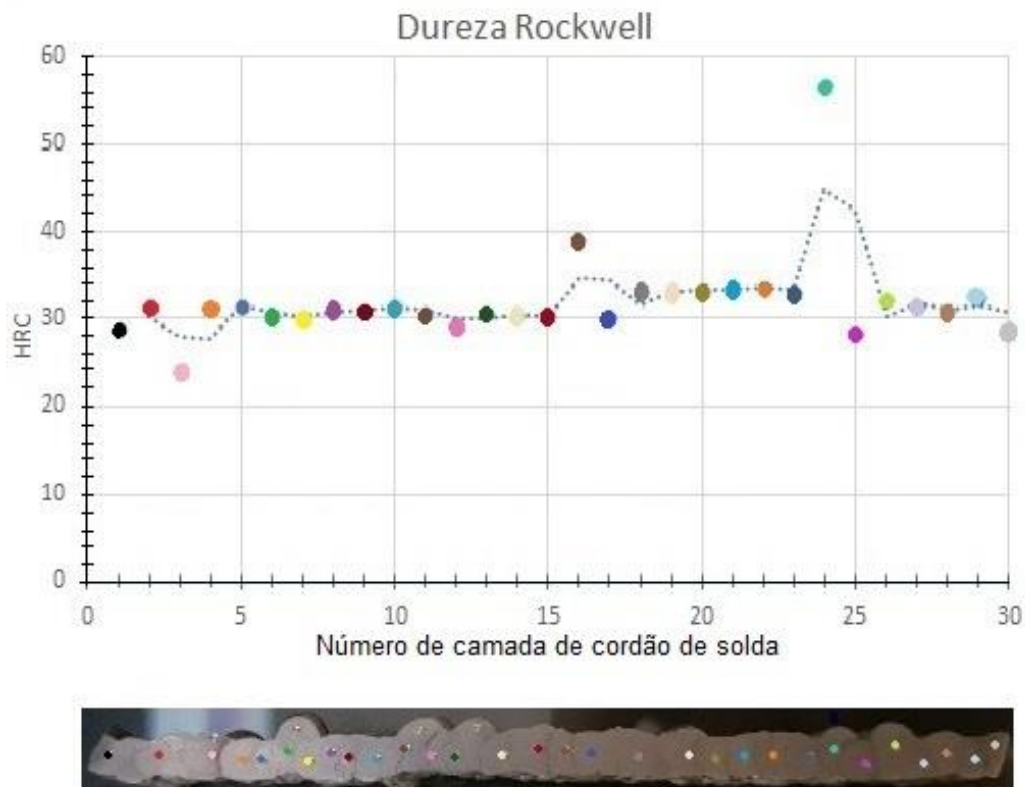


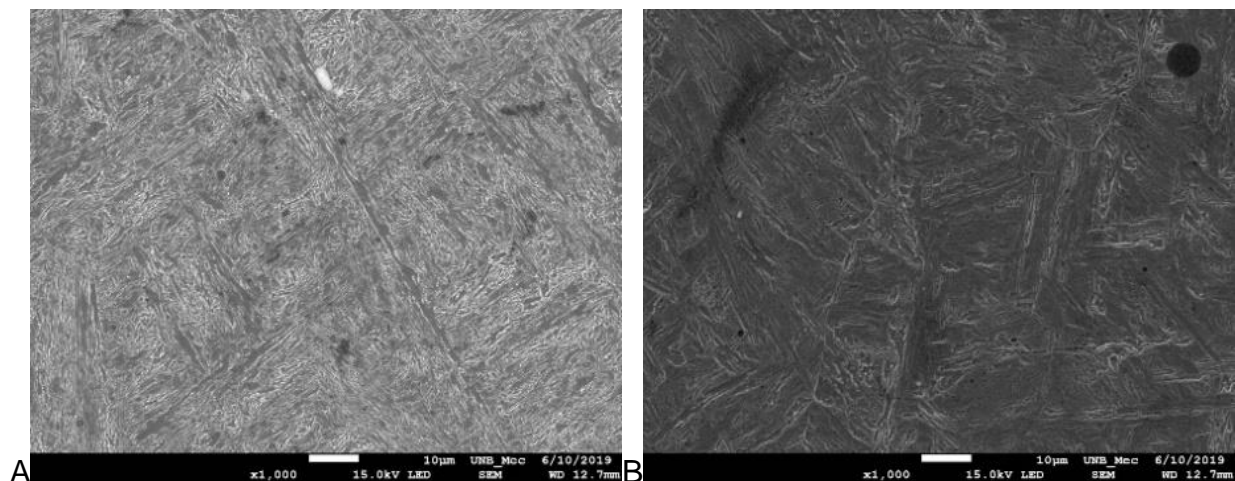
Figura 4.7 - Gráfico de medidas de dureza Rockwell em uma peça de aço 410 NiMo construída por camadas de cordão de solda

Os valores medidos demonstram poucas variações ao longo do comprimento da amostra, mais frequentes a partir do meio para o final, aproximadamente no trecho de 60 a 100mm, isso mostra que a dureza no meio para o final é um pouco mais elevada. Essa diferença pode ter ocorrido por uma falta de continuidade no processo construtivo ou por um resfriamento mais rápido no final da construção, fazendo com que a parte final da peça tenha sido menos revenida.

O material usado para construção da peça tem uma dureza máxima de aproximadamente 35 HRC (LIPPOLD e KOTECKI, 2005), antes de qualquer tratamento que possa ter ocorrido durante o processo de soldagem. As medições realizadas durante o ensaio indicaram a média de dureza em torno de 32 HRC, o que demonstra a ocorrência de um tratamento térmico durante o processo, provavelmente o revenido.

4.3. Caracterização microestrutural no MEV

A amostra foi analisada no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) como relatado no tópico 3.6. Por questões de limitação de comprimento de objeto a ser examinado no aparelho, foi necessário dividir a amostra em quatro amostras menores, que foram lixadas, polidas e atacadas com o reagente Kalling. Em seguida, as amostras preparadas foram colocadas juntas no MEV que gerou imagens de vários trechos das amostras, conforme visualiza-se na Figura 4.8.



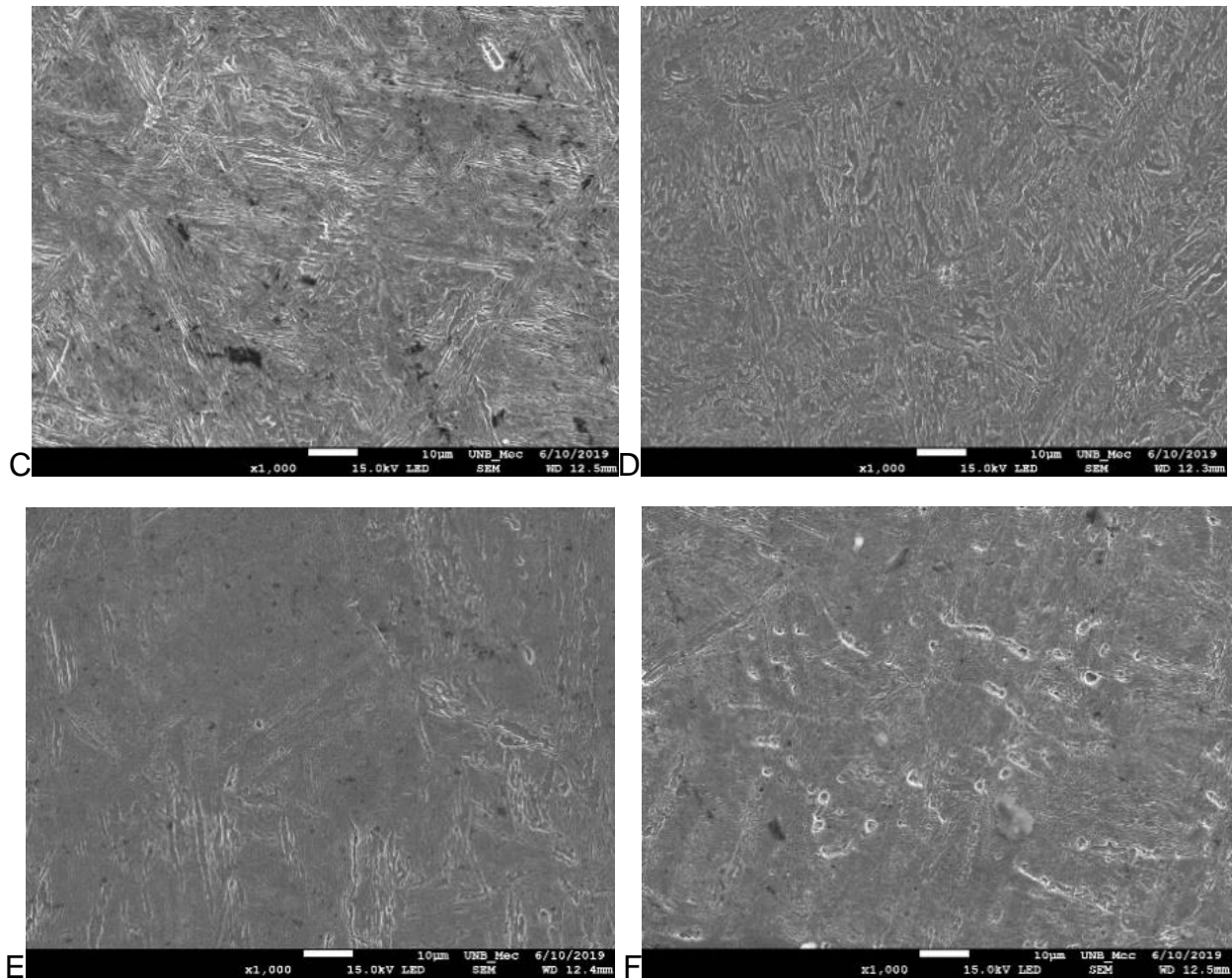


Figura 4.8 - Imagem feita no MEV com aumento de 1000X de uma amostra de aço 410 NiMo

As imagens apresentadas na Figura 4.8 apontam que as amostras possuem estruturas em agulhas, similares às estruturas da martensita, como citado anteriormente, validando as descobertas feitas no microscópio confocal, que mostram o predomínio de uma microestrutura formada por uma mistura de fase martensítica com outra que se assemelha a martensita revenida.

A elevada resolução do MEV possibilita, além da visualização da microestrutura, a observação dos defeitos e pontos com formações diferenciadas, não visualizados com precisão no microscópio confocal. Considerando esta diferença, os pontos que se distinguem do resto foram observados com maior aproximação em outras imagens feitas no MEV.

É possível distinguir-se na Figura 4.8A um ponto com formação diferente, que se diferencia do resto da microestrutura da amostra. Este ponto é apresentado na Figura 4.9 com ampliação de 3000X e na Figura 4.10 com ampliação de 18000X.

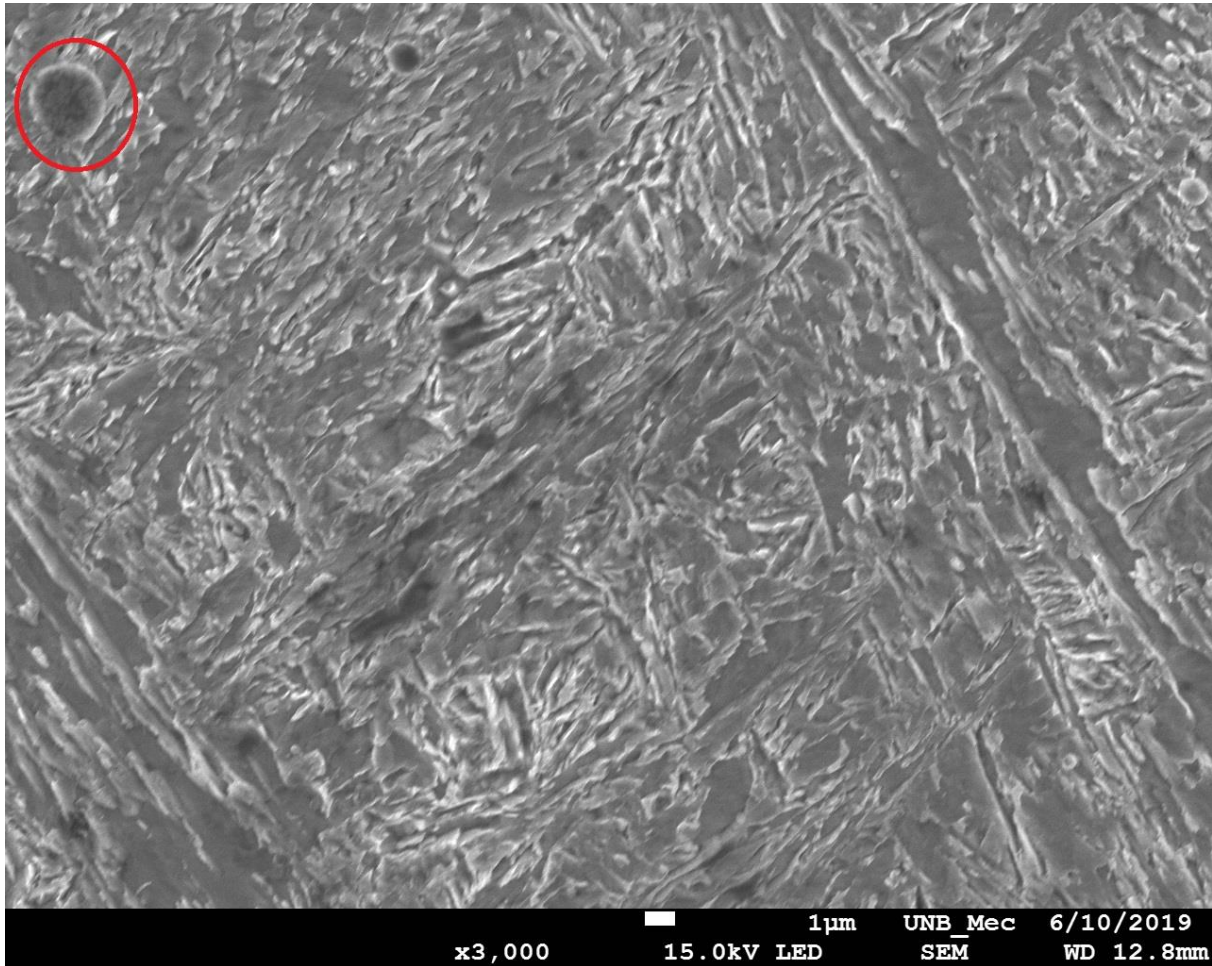


Figura 4.9 - Imagem feita no MEV com aumento de 3000X de uma amostra de aço 410 NiMo

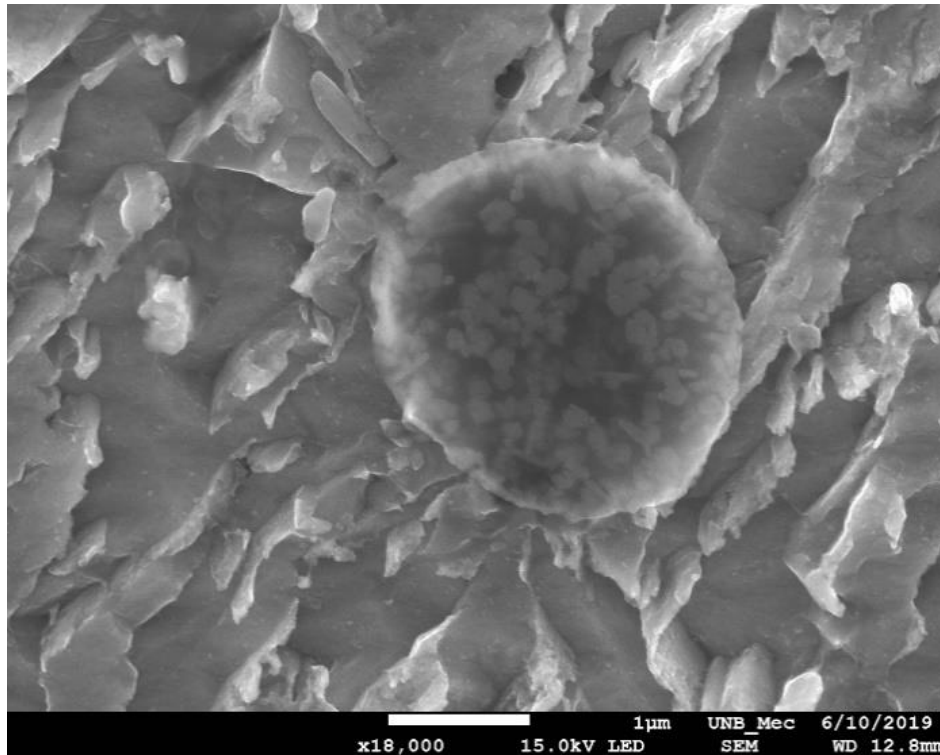


Figura 4.10 - Imagem feita no MEV com aumento de 18000X de uma amostra de aço 410 NiMo

O ponto diferenciado, avistado na Figura 4.8B, é apresentado com ampliação de 7000X na Figura 4.11.

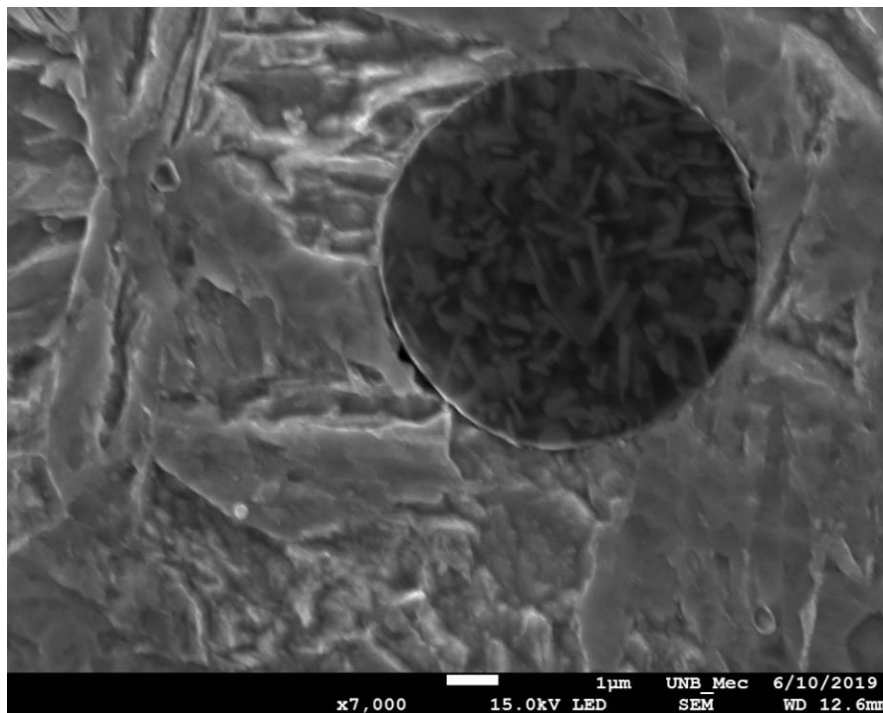


Figura 4.11 - Imagem feita no MEV com aumento de 7000X de uma amostra de aço 410 NiMo

Na amostra podem ser vistos outros tipos de defeitos, como porosidades encontradas em vários pontos, observadas na Figura 4.8D e vistas com ampliação de 3000X e 13000X na Figura 4.12.

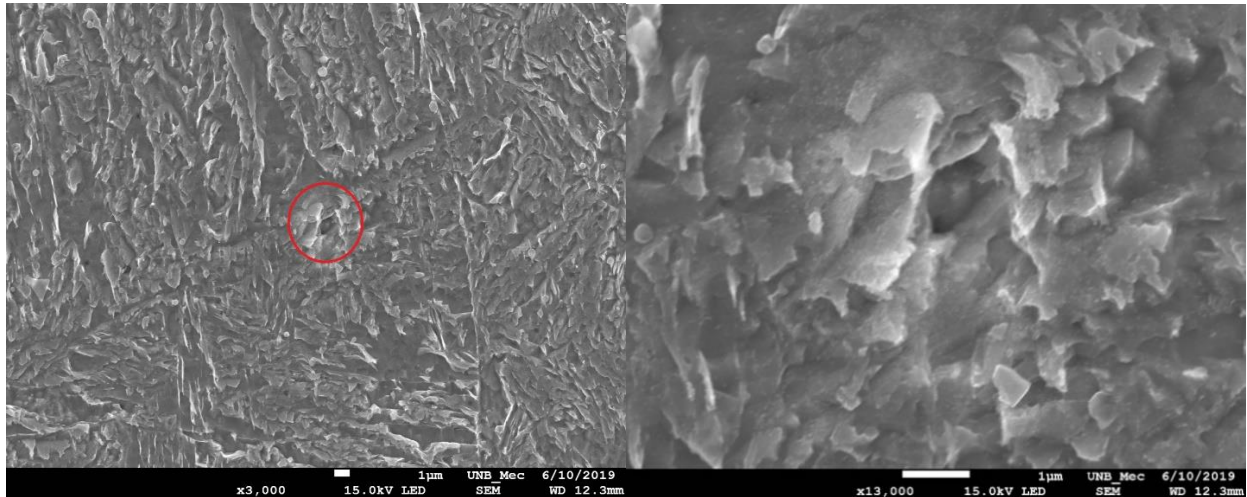


Figura 4.12 - Imagem feita no MEV com aumento de 3000X e 13000X da Figura 4.8D de amostra de NiMo

As porosidades também são visualizadas na Figura 4.8E e mostradas com aproximação de 10000X na Figura 4.13.

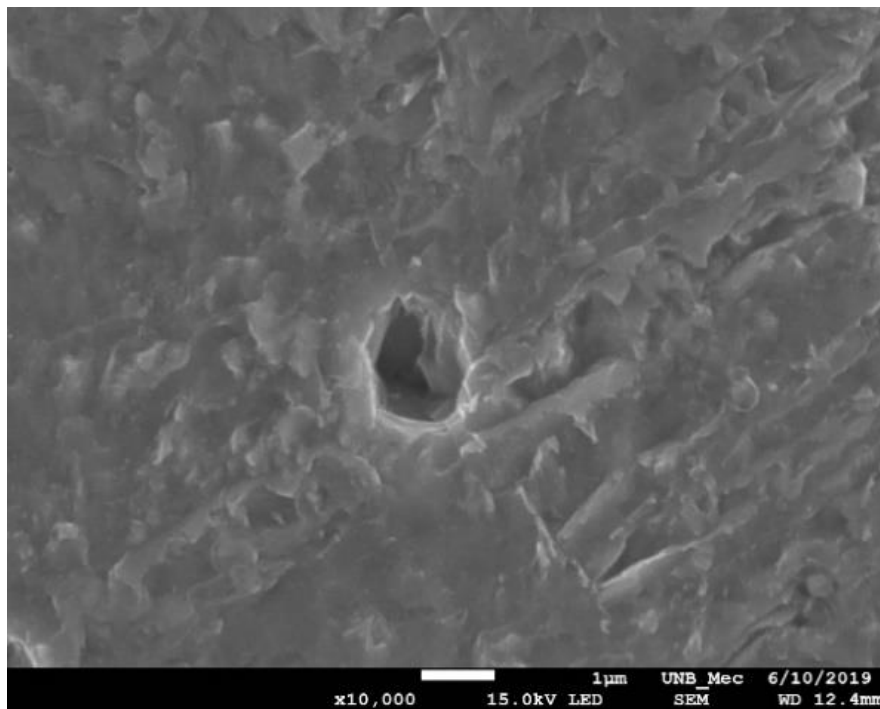


Figura 4.13 - Imagem feita no MEV com aumento de 10000X da Figura 4.8E de amostra de aço 410 NiMo

Outras porosidades são verificadas na Figura 4.8F e amplificadas 8500X na Figura 4.14.

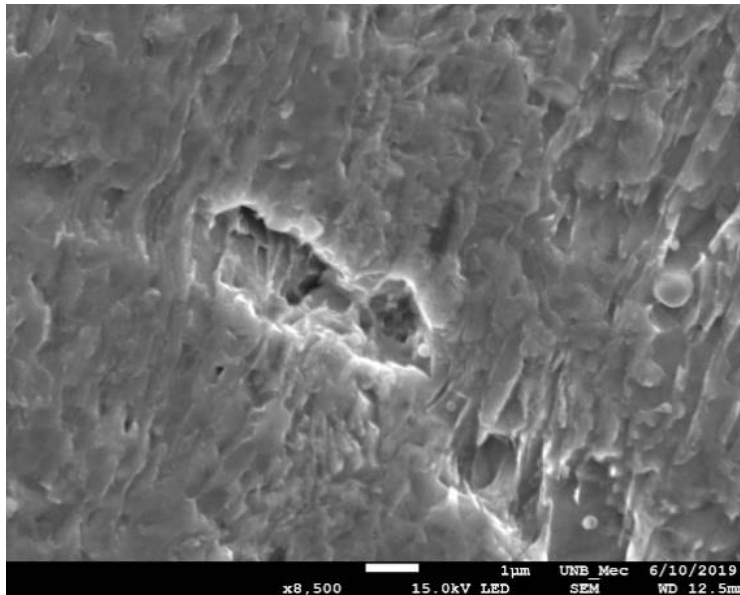


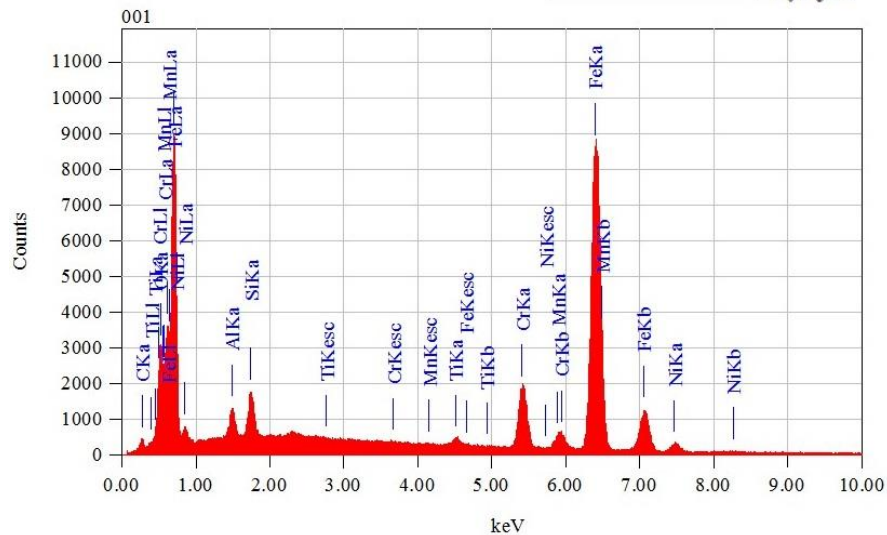
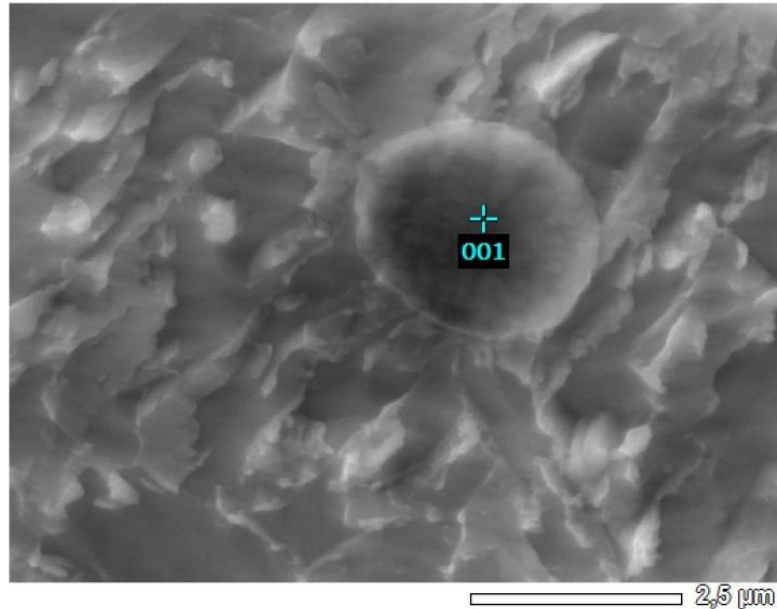
Figura 4.14 - Imagem feita no MEV com aumento de 8500 vezes da Figura 4.8F de uma amostra de aço 410 NiMo

Os defeitos apresentados nessas imagens ocorrem por diversas razões, as discontinuidades encontradas nas Figura 4.10 e Figura 4.11 podem ser causadas por alguma impureza ou por terem reagido e apresentado formações diferentes do resto das estruturas. Já as porosidades encontradas nas imagens da Figura 4.12, Figura 4.13 e Figura 4.14 podem ter sido causadas por gases que ficaram presos dentro do material, durante o processo de construção. Esse tipo de defeito costuma fragilizar a peça, criando concentradores de tensões que geram trincas e diminuem a vida útil da peça construída. O revenido ajuda a retirar esses defeitos, provavelmente, por isso as últimas camadas da amostra apresentam maior ocorrência de porosidade.

4.4 Análise de EDS

As análises EDS foram realizadas paralelamente às análises feitas no MEV para verificação da constituição química das discontinuidades, podendo-se entender e avaliar seus impactos na estrutura das amostras.

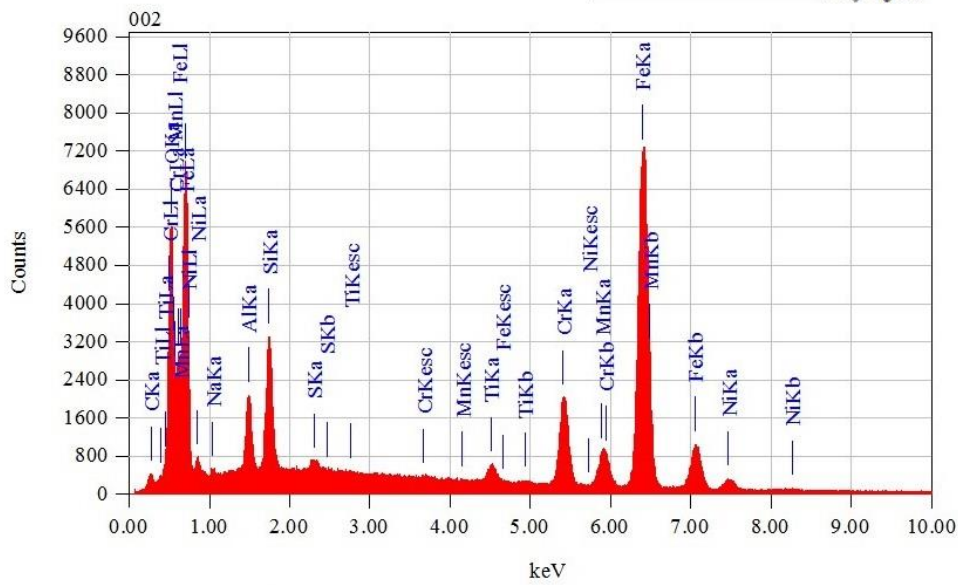
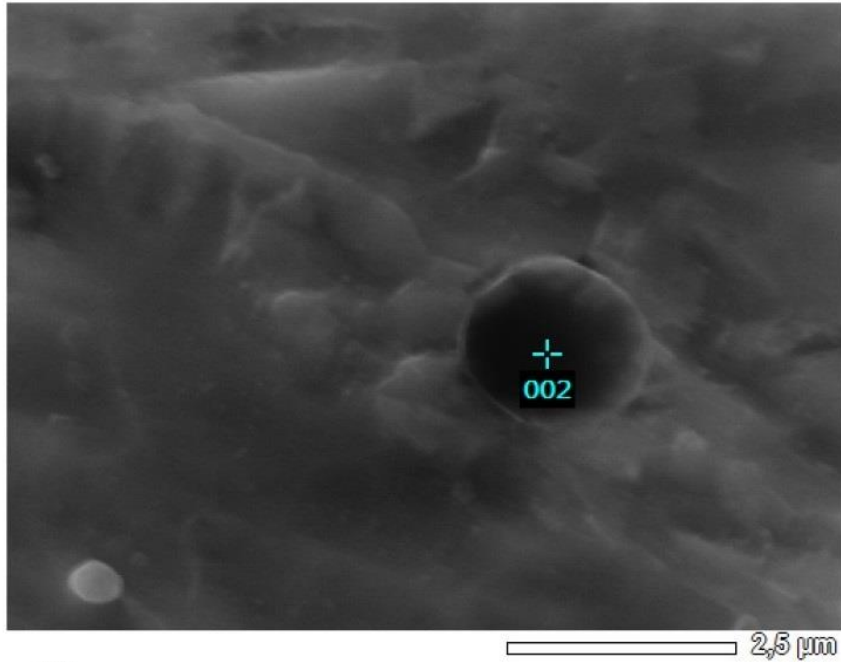
A análise de EDS mostra a composição química dos pontos vistos na Figura 4.10 e na Figura 4.11, localizados no início da mostra, no trecho entre 0 e 25mm, conforme apresentam a Figura 4.15 e a Figura 4.16.



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis
 Fitting Coefficient : 0.0396

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C	0.277	1.93	0.03	7.17				0.5485
O	0.525	5.96	0.07	16.62				8.3199
Al	1.486	1.05	0.03	1.73				0.6618
Si	1.739	1.53	0.03	2.43				1.1078
Ti	4.508	0.66	0.03	0.61				0.6849
Cr	5.411	8.44	0.09	7.25				9.5150
Mn	5.894	2.00	0.06	1.62				1.9506
Fe	6.398	75.01	0.33	59.96				73.9752
Ni	7.471	3.43	0.10	2.61				3.2361
Total		100.00		100.00				

Figura 4.15 – Espectro EDS da formação com alto percentual de oxigênio, alumínio, silício e manganês encontrada na amostra de aço 410 NiMo



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

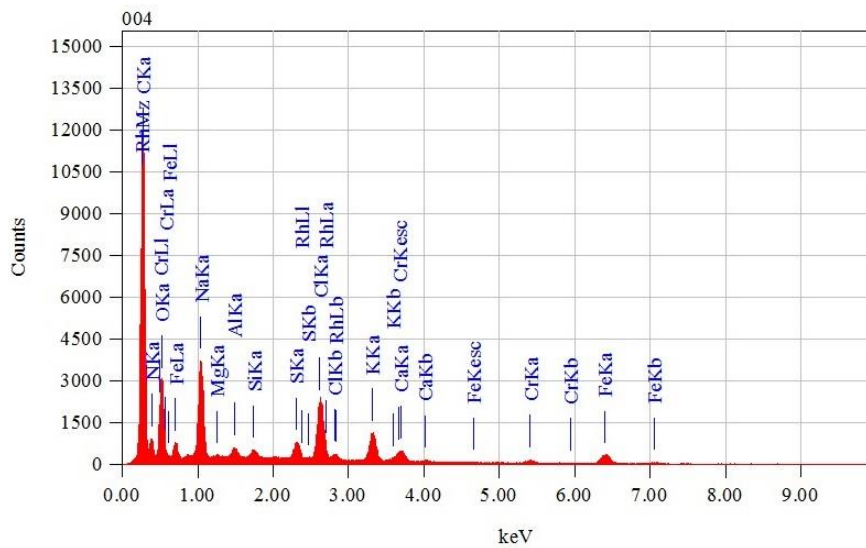
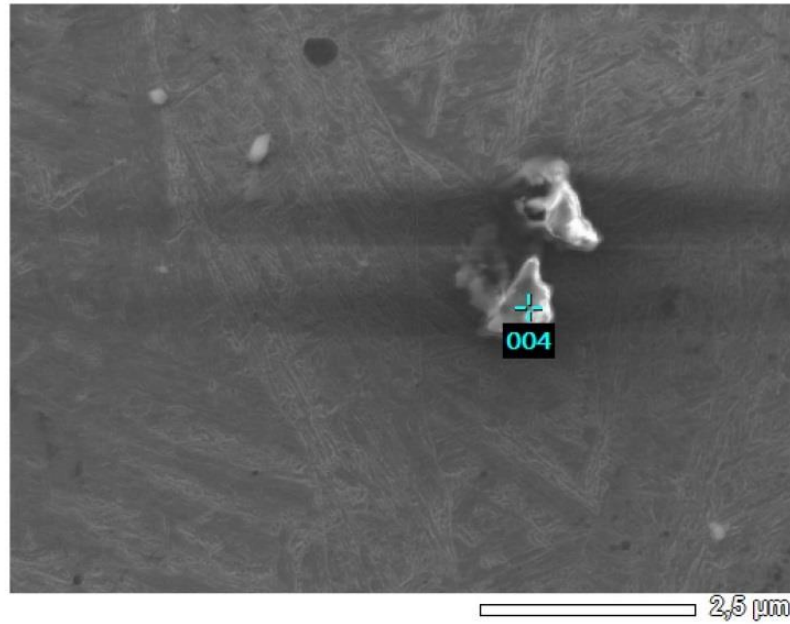
Fitting Coefficient : 0.0343

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C	0.277	1.94	0.03	6.08				0.5260
O	0.525	13.81	0.11	32.51				18.6950
Na	1.041	0.32	0.02	0.52				0.1408
Al	1.486	2.04	0.03	2.84				1.3204
Si	1.739	3.27	0.04	4.39				2.3908
S	2.307	0.25	0.01	0.30				0.2419
Ti	4.508	1.23	0.03	0.97				1.2568
Cr	5.411	8.91	0.09	6.45				9.6368
Mn	5.894	4.18	0.08	2.86				4.0001
Fe	6.398	60.80	0.30	40.99				58.7627
Ni	7.471	3.25	0.10	2.09				3.0286
Total		100.00		100.00				

Figura 4.16 - Espectro EDS da formação com alto percentual de oxigênio, alumínio, silício, titânio e manganês encontrada na amostra de aço 410 NiMo

Percebe-se que ambas análises EDS possuem vários pontos em comum, entre estes têm a detecção de magnésio, alumínio, silício e enxofre, que são impurezas normalmente encontradas em aços, que são muito difíceis de serem eliminadas. O magnésio é um metal que contribui para a redução de possíveis defeitos provocados pelo excesso de enxofre, além de ajudar na temperabilidade dos aços, mas em excesso pode diminuir a ductilidade da peça. O alumínio ajuda a diminuir porosidades se ligando com o oxigênio e formando alumina. O silício aumenta a resistência e tenacidade do material. O enxofre cria porosidades e ao se ligar com o ferro gera um sulfeto que pode aumentar a ocorrência de fratura frágil no metal.

Observou-se, também, outros tipos de discontinuidades, que foram analisadas quimicamente pelo EDS, como mostra a Figura 4.17 e a Figura 4.18.

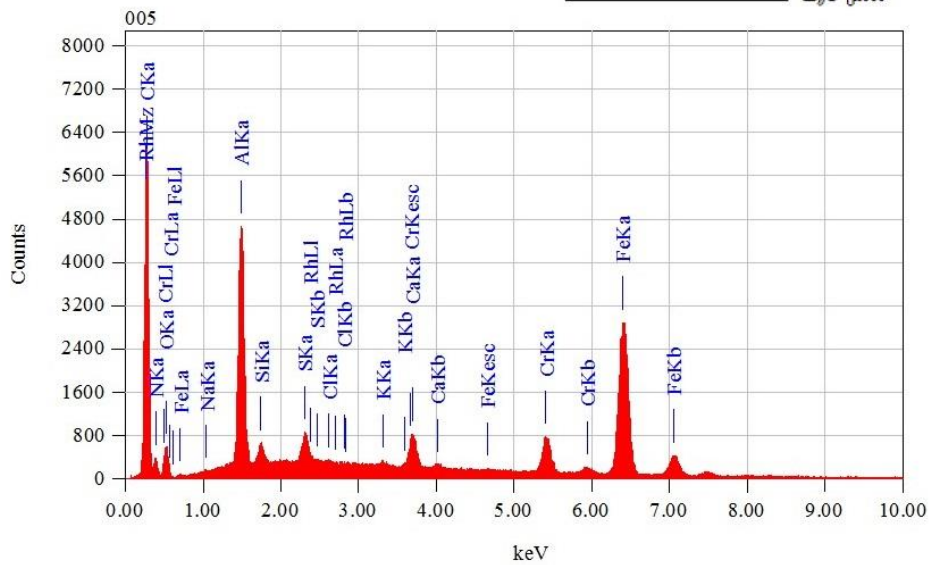
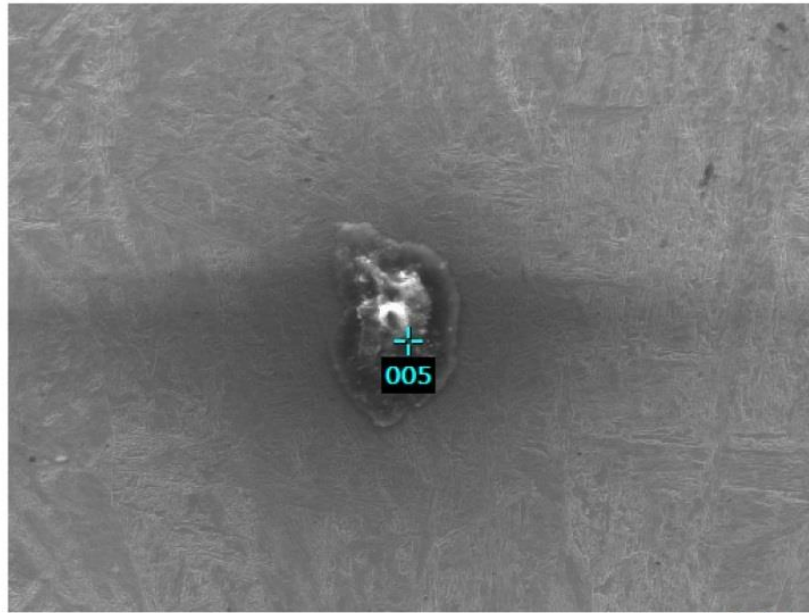


ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.0196

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C	0.277	40.58	0.10	49.37				34.1068
N	0.392	22.73	0.29	23.71				24.4516
O	0.525	23.21	0.22	21.20				18.4331
Na	1.041	3.49	0.03	2.22				4.7625
Mg	1.253	0.08	0.01	0.05				0.1030
Al	1.486	0.26	0.01	0.14				0.4168
Si	1.739	0.20	0.01	0.10				0.3367
S	2.307	0.62	0.01	0.28				1.2248
Cl	2.621	2.72	0.03	1.12				5.4140
K	3.312	1.75	0.03	0.65				3.3912
Ca	3.690	0.79	0.02	0.29				1.5885
Cr	5.411	0.41	0.02	0.11				0.6790
Fe	6.398	2.52	0.06	0.66				4.0887
Rh	2.696	0.64	0.03	0.09				1.0034
Total		100.00		100.00				

Figura 4.17 - Espectro EDS da formação com alto percentual de carbono, oxigênio, nitrogênio, sódio, cloro e potássio encontrada na amostra de aço 410 NiMo



ZAF Method Standardless Quantitative Analysis

Fitting Coefficient : 0.0323

Element	(keV)	Mass%	Sigma	Atom%	Compound	Mass%	Cation	K
C	0.277	39.50	0.14	61.02				21.9732
N	0.392	12.03	0.25	15.93				11.5549
O	0.525	5.05	0.11	5.85				4.3938
Na	1.041	0.02	0.01	0.02				0.0226
Al	1.486	5.74	0.05	3.95				7.0108
Si	1.739	0.48	0.02	0.32				0.6045
S	2.307	0.80	0.02	0.46				1.2682
Cl	2.621	0.10	0.01	0.05				0.1677
K	3.312	0.17	0.02	0.08				0.2805
Ca	3.690	1.70	0.04	0.79				3.0106
Cr	5.411	4.10	0.07	1.46				6.4540
Fe	6.398	30.27	0.24	10.06				43.2111
Rh	2.696	0.04	0.03	0.01				0.0480
Total		100.00		100.00				

Figura 4.18 - Espectro EDS da formação com alto percentual de carbono, oxigênio, nitrogênio, alumínio e cálcio encontrada na amostra de aço 410 NiMo

Essas discontinuidades, provavelmente, resultam de alguma partícula ou de algum conjunto de gases que pode ter reagido e se transformado em partícula sólida. Na Figura 4.17 e na Figura 4.18, podem ser vistas quantidades mais elevadas de nitrogênio, oxigênio, além de sódio, cloro e alumínio, que provavelmente, vieram de contaminação gerados por resíduos do ataque químico, do polimento e de partículas do ar.

As amostras apresentaram, também, várias partículas de alumina, que possivelmente, são resquícios do polimento feito com alumina, não removido completamente.

5. Conclusão

As análises e ensaios realizados no decorrer deste estudo permitem traçar um panorama das mudanças macro e microestruturais ocorridas na peça durante seu processo de fabricação com utilização de manufatura aditiva, assim como, de suas características finais.

O experimento foi realizado a partir de uma amostra retirada da peça, preparada para ser observada através dos microscópios confocal e eletrônico de varredura (MEV) para verificação microestrutural. Foi realizada também uma análise macrográfica por meio de ataque químico. A verificação das propriedades mecânicas foi executada através do ensaio de dureza Rockwell.

A observação micrográfica mostrou as alterações nas camadas da peça e o tratamento térmico criado durante sua construção que formou uma microestrutura assemelhada a uma estrutura martensítica, que provavelmente, foi revenida por causa do processo construtivo.

As análises da micrografia, apontaram descontinuidades e porosidades na amostra, concentradas na parte final da peça, o que leva a concluir que o tratamento térmico pode ter ajudado a reduzir a incidência de defeitos na parte inicial da peça.

Outras descontinuidades identificadas podem ter sido causadas por contaminação durante o processo construtivo, provocada por alguma partícula ou gás dentro da peça. Observou-se, ainda, que em diversos pontos da amostra, além da contaminação, havia uma formação de magnésio, alumínio, silício e enxofre, com formato bem definido e microestrutura própria, que demandam estudos mais aprofundados para se verificar suas influências nas características mecânicas da peça construída.

A macrografia indicou com maior precisão a posição das microestruturas em relação ao cordão de solda, possibilitando uma análise de dureza mais acurada.

O resultado do ensaio de dureza indicou que a amostra apresenta uma dureza média de aproximadamente 32 HRC, que possui pouca variação entre suas camadas.

Ao final do experimento foram verificadas poucas alterações nas características mecânicas da amostra, destacando que a maior incidência de defeitos foi observada na parte final da peça. Isto pode ter ocorrido porque os seguimentos finais da amostra tendem a passar por um tratamento térmico com menor duração e com resfriamento mais rápido.

O estudo desenvolvido neste Projeto de Graduação permite concluir que existe uniformidade nas características estruturais da peça metálica produzida com o emprego da técnica de manufatura aditiva, utilizando o processo de soldagem MIG/MAG (GMAW), o que valida a ampliação de uso desta técnica para construção de peças metálicas em escala industrial. Contudo, a investigação realizada aponta a necessidade de aperfeiçoamentos no processo construtivo que passam por uma redução nas espessuras de cordão de solda e/ou a aplicação de tratamento térmico, que pode ser um revenido, ao final do processo.

Dessa forma, será possível executar peças metálicas com processos construtivos otimizados, proporcionando maior agilidade e economia de recursos para atender ao mercado consumidor que demanda constantes evoluções tecnológicas.

Referências Bibliográficas

AMERICAN WELDING SOCIETY. American Welding Society. **AWS**. Disponível em: <<https://awo.aws.org/glossary/gas-tungsten-arc-welding-gtaw/>>.

AMRC. **Shaped metal deposition**. AMRC, University of Sheffield. Sheffield. 2011.

ANDRADE, R. C. **Desenvolvimento de Software de Fatiamento de Sólidos Tipo Casca e Geração de Trajetórias para Fabricação de Peças por Deposição de Metal em Camadas Sucessivas Utilizando o Processo GMAW**. UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA. Brasília. 2013. (TG-nº 20/2012,).

ARCOVERDE JÚNIOR, A.; MOTTA, D. D. S. **Desenvolvimento do sistema de monitoramento remoto e aquisição de dados de uma fonte de soldagem didática**. [S.l.]: [s.n.], 2011.

ASM HANDBOOK. **Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. 10th Edition. ed. [S.l.]: [s.n.], v. Volume 1, 1990.

ASM HANDBOOK. **Alloy Phase Diagrams**. [S.l.]: [s.n.], v. Volume 3, 1992.

BRACARENSE, A. Q. **Processo de Soldagem TIG - GTAW**. Belo Horizonte: [s.n.], 2000.

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais Uma Introdução**. 8 edição. ed. [S.l.]: LTC, 2012.

CAMPBELL, R. I.; BOURELL, D.; GIBSON, I. . Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age. **Rapid Prototyping Journal**, p. 255 - 258, 2012.

CARDOSO, F. História da Soldagem. **Soldagem e brasagem**, 2012. Disponível em: <<http://soldagemembrasagem.blogspot.com/2012/04/historia-da-soldagem.html>>.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 6ª. ed. São Paulo: ABM, 1988.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. Microscopia Eletrônica de Varredura Aplicações e preparação de amostras. **Microscopia Eletrônica de Varredura Aplicações e preparação de amostras Materiais Poliméricos, metálicos e semicondutores**, PORTO ALEGRE, 2007.

DINO. A história da soldagem e sua evolução para os dias atuais. **Terra**, 2018. Disponível em: <<https://www.terra.com.br/noticias/dino/a-historia-da-soldagem-e-sua-evolucao-para-os-dias-atuais,c07e70e81e9395a88218eea4301aa43bw9wbf nab.html>>.

DUARTE, L. C. et al. Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros. **Pesquisas em Geociências**, Porto Alegre, p. 14p, setembro 2003.

ESAB. **ESAB**. Disponível em:
<http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_tig_gtaw.cfm>.
Acesso em: 27 junho 2019.

FOLKHARD, E. **Welding Metallurgy of Stainless Steels**. 1 edição. ed. Kapfenberg: Springer-Verlag Wien New York, 1988.

FVNUNES. **fvnunes engenharia**. Disponível em:
<http://www.fvnunes.com/_es/ciencia_dos_materiais.php>. Acesso em: out. 2018.

HEAT TECH. **Tratamento Térmico de Aços Inoxidáveis Martensíticos**. Heat Tech. [S.l.]. 2009.

INDIAMART. **indiamart**. Disponível em:
<<https://www.indiamart.com/proddetail/panasonic-mig-welding-machine-14952697897.html>>. Acesso em: 27 junho 2019.

INSPEÇÃO de equipamentos. **Inspeção de equipamentos**, 2013. Disponível em:
<<http://inspecaoequipto.blogspot.com/2013/11/caso-050-fratura-fragil-dos-navios.html>>.

LIPPOLD, J. C.; KOTECKI, D. J. **Welding Metallurgy and Weld Ability of Stainless Steels**. Hoboken/New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005.

LOWES. **Lowe's**. Disponível em: <<https://www.lowes.com/pd/Lincoln-Electric-120-Volt-Stick-Welder/3478779>>. Acesso em: 27 junho 2019.

MANUFATURA aditiva. **Medium Corporation**. Disponível em:
<<https://medium.com/tend%C3%AAs-digitais/manufatura-aditiva-e-suas-diversas-poss%C3%AAdveis-aplica%C3%A7%C3%B5es-870bf2452817>>. Acesso em: 15 junho 2019.

MATILAINEN, V.-P.; PEKKARINEN, J.; SALMINEN, A. Weldability of Additive Manufactured Stainless Steel. **Physics Procedia**, 2016.

MODENESI. **Introdução aos processos de soldagem**. Belo Horizonte: [s.n.], 2000.

MODENESI, P. J. **Fontes de Energia para a Soldagem a Arco**. Belo Horizonte: [s.n.], 2009.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. **Introdução à Metalurgia da Soldagem**. Belo Horizonte: [s.n.], 2012.

NERIS, M. M. **Soldagem**. São Paulo: [s.n.], 2012.

O que é e como funciona a solda TIG? **soldador AOTAI**, 2017. Disponível em:
<<http://www.soldador.com.br/o-que-e-e-como-funciona-a-solda-tig>>. Acesso em: 15 outubro 2018.

OLIVEIRA, T. S. D. et al. **Softening Mechanisms of the AISI 410 Martensitic Stainless Steel Under Hot Torsion**. [S.l.]: [s.n.], 2016.

OLIVEIRA, T. S. D. et al. Softening Mechanisms of the AISI 410 Martensitic Stainless Steel Under Hot Torsion Simulation. **Materials Research**, PPGEM, Instituto Federal do Maranhão; Universidade Ceuma, 2017. ISSN 20(2): 395-406.

PASCOALI, S. **Tecnologia dos Materiais I**. Araranguá: [s.n.], 2008.

PROCESSO de Soldagem: MIG/MAG (GMAW). **ESAB**. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_mig_mag_gmaw.cfm>. Acesso em: 15 junho 2019.

RODRIGUES, V. P. et al. **Additive manufacturing: state-of-the-art and application framework**. G E P R O S: Gestão da Produção, Operações e Sistemas. [S.I.]. 2017. (10.15675/gepros.v12i3.1657).

SALES, V. Análise do comportamento dos aços inoxidáveis AISI 304 e SAF 2205 em diferentes condições de dobramento, CEFET-MG, janeiro 2013.

SANTOS, A. P. et al. **Estudo comparativo do reparo por soldagem dos aços inoxidáveis martensíticos AISI 410 e CA-6NM**. UFPR. [S.I.].

SANTOS, M. T. **Determinação da Emissividade e Análise Microestrutural do Aço Inoxidável Martensítico ASTM A743 CA6NM Decorrente da Soldagem GMAW em Múltiplos Passos com Metal de Deposição AWS 410 NiMo**. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília. Brasília, DF, p. 125p. 2013.

SANTOS, M. T. Estudo do efeito da temperatura de interpasse e de pré-aquecimento no processo de soldagem por múltiplos passos no reparo de pás de turbinas hidráulicas, BRASÍLIA, 23 fevereiro 2018.

SCCOMPOSITOS. **SC fibras e resinas compostos**, 2018. Disponível em: <<http://sccompositos.com.br/site/2018/05/17/mark-one-a-impressora-3d-que-trabalha-com-fibra-de-carbono/>>. Acesso em: 27 junho 2019.

SCHWEDERSKY, B. et al. **Soldagem TIG de Elevada Produtividade: Influência dos Gases de Proteção na Velocidade Limite para Formação de Defeitos**. Florianópolis: [s.n.], 2011.

SILVA, C. B. T. Influência da Temperatura de Revenimento Sobre a Microestrutura de Metais de Solda 13%Cr, 4%Ni E 0,4%Mo, Belo Horizonte, 2017.

TAVARES, S. S. M. et al. Effects of Post Weld Heat Treatments on the Microstructure and Mechanical. **Materials Research**, PGMEC, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense – UFF e Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Ceará – UFC, 5 outubro 2014.

TIGFORBEGINNERS. **tig for beginners**. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/tigforbeginners/home/how-to-set-up-a-tig-welder>>. Acesso em: 27 junho 2019.

UFPR, D. Departamento de Engenharia Mecânica – DEMEC | UFPR. **demec UFPR**.
Disponível em:
<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EngMec_NOTURNO/TM336/durezabrinell.pdf>.

WEMAN, K. Uma história da Soldagem. **ESAB 100 anos**, 2005.