

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CAMILA BRAGA TEIXEIRA SILVA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE REVENIMENTO SOBRE A
MICROESTRUTURA DE METAIS DE SOLDA 13%Cr, 4%Ni E 0,4%Mo**

BELO HORIZONTE

2017

CAMILA BRAGA TEIXEIRA SILVA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE REVENIMENTO SOBRE A
MICROESTRUTURA DE METAIS DE SOLDA 13%Cr, 4%Ni E 0,4%Mo**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz

BELO HORIZONTE

2017

CAMILA BRAGA TEIXEIRA SILVA

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE REVENIMENTO SOBRE A
MICROESTRUTURA DE METAIS DE SOLDA 13%Cr, 4%Ni E 0,4%Mo**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia de Materiais no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cláudio Turani Vaz - Orientador

Profa. Dr(a). Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Profa. M^a. Aline Silva Magalhães

BELO HORIZONTE

2017

DEDICATÓRIA

*A minha família
e ao Renan.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Cláudio Turani agradeço pela orientação, paciência e conselhos, se não fosse por você eu teria desistido.

Aos meus pais pela paciência e confiança, estar longe de vocês deixou o desafio maior ainda.

Ao meu irmão Leonardo, por sempre estar sorrindo e disposto a me ouvir.

Ao Renan, por estar ao meu lado sempre e por tentar me fazer manter a calma.

Aos amigos que fiz durante o curso, não os esquecerei jamais.

Aos estagiários dos laboratórios do CEFET-MG, principalmente ao Marcelo Fonseca, pela paciência e disposição a ajudar quando tudo parecia perdido.

A Prof. Dr^a. Elaine Carballo Siqueira Corrêa, pelo carinho e ajuda durante a realização desse trabalho.

A minha amiga Rita, por todo apoio, cumplicidade e amor durante todos esses anos. O maior presente que o CEFET me deu.

RESUMO

O aço inoxidável CA-6NM, classificado como aço inoxidável fundido é feita segundo o *Alloy Casting Institute* (ACI), vem sendo muito utilizado na fabricação de rotores de usinas hidrelétricas, devido a seu custo competitivo de mercado, além de sua elevada resistência à cavitação e a corrosão em meio aquoso. Os rotores são fabricados através do processo de fundição desse aço de peças menores, sendo necessária a soldagem na sequência de montagem. O processo de soldagem utilizado para a coalescência dos componentes do rotor é o de arame tubular (FCAW), manutenção desses componentes consiste na deposição de metal, sendo o mais indicado o 13%Cr, 4%Ni, 0,4%Mo e máximo 0,04% de carbono, através do processo de soldagem dos pontos onde ocorreu cavitação, fenômeno que ocasiona perda de massa do componente, após a soldagem recomendado o tratamento térmico de revenimento.. Realizou-se o tratamento térmico de revenimento em metal de solda 13%Cr, 4%Ni, 0,4%Mo, revenimento simples à 650°C durante 2h, 600°C durante 2 e 8h, além do revenimento duplo à 650°C durante 2h e posteriormente 600°C durante 1h. Após a realização do revenimento, possível observar através da micrografia o aumento da estrutura de martensita revenida com o aumento da temperatura e do tempo de tratamento térmico. Através da técnica de difração de raio-x, observou-se picos de austenita retida nas amostras submetidas ao revenimento duplo e à 600°C durante 8h.

Palavras chave: Aço inoxidável, soldagem, revenimento, austenita retida

ABSTRACT

The stainless steel CA-6NM, classified as cast stainless steel is made according to the Alloy Casting Institute (ACI), has been widely used in the manufacture of rotors of hydroelectric power plants, due to its competitive cost of market, in addition to its high resistance to cavitation and corrosion in aqueous medium. The rotors are manufactured through the process of casting this steel of smaller parts, requiring the welding in the assembly sequence. The welding process used for the coalescence of the rotor components is that of tubular wire (FCAW), maintenance of these components consists of metal deposition, with the most indicated being 13% Cr, 4% Ni, 0.4% Mo and maximum 0.04% of carbon, through the process of welding of the points where cavitation occurred, a phenomenon that causes loss of mass of the component, after the welding recommended the heat treatment of tempering. The heat treatment of tempering in brazing metal 13% Cr, 4% Ni, 0.4% Mo, simple tempering at 650 ° C for 2h, 600 ° C for 2 and 8h, and double annealing at 650 ° C for 2h and then 600 ° C for 1h. After the tempering, it was possible to observe through the micrograph the increase of the martensite structure with the increase of temperature and the time of heat treatment. By means of the x-ray diffraction technique, austenite peaks were observed retained in the samples submitted to double annealing and at 600°C for 8h.

Key words: Stainless steel, welding, tempering, retained austenite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Esquema de uma Usina Hidrelétrica	12
Figura 2	Fontes de Energia no Brasil, no Quarto Trimestre de 2015	13
Figura 3	Vista explodida demonstrando os componentes da Unidade Geradora da Usina de Itaipu	15
Figura 4	Esquema do Processo FCAW	18
Figura 5	Ciclo Térmico de Soldagem Recomendado para o aço CA-6NM	19
Figura 6	Formação de austenita em função da temperatura de revenimento para o aço CA-6NM	20
Figura 7	Propriedades Mecânicas do aço CA-6NM em função da Temperatura de Revenimento	20
Figura 8	Chanfro do metal de solda	22
Figura 9	Usinagem da chapa de metal de base	22
Figura 10	Configuração da junta soldada de acordo com a ASME	23
Figura 11	Camada de Amanteigamento	23
Figura 12	Fluxograma do trabalho	24
Figura 13	Serra de corte das amostras	25
Figura 14	Cortadora Metalográfica CM 80	26
Figura 15	Amostras cortadas	26
Figura 16	Forno utilizado para revenimento à 600°C durante 8h	27
Figura 17	Forno utilizado para tratamento à 650°C e 600°C	28
Figura 18	Embutimento	28
Figura 19	Microscópio Eletrônico de Varredura, Shimadzu, modelo SSX-550	29
Figura 20	Microestrutura da amostra como soldada aumento 200x	30
Figura 21	Microestrutura observada no MEV, aumento (a) 800x e (b) 2000x	30
Figura 22	Microestrutura obtida pelo meV da amostra tratada à 650°C durante 2h, aumento (a) 800x e (b) 2000x	31
Figura 23	Micrografia amostra tratada à 650°C durante 2h	31
Figura 24	Microestrutura obtida pelo meV da amostra tratada à 600°C durante 2h, aumento (a) 800x e (b) 2000x	32
Figura 25	Microestrutura amostra tratada à 600°C durante 2h	32
Figura 26	Microestrutura amostra tratada à 600°C durante 8h	33
Figura 27	Microestrutura obtida pelo meV da amostra tratada à 600°C durante 2h, aumento (a) 800x e (b) 2000x	33
Figura 28	Microestrutura amostra tratada por revenimento duplo 650°C/2h+600°C/1h	34
Figura 29	Microestrutura obtida pelo MEV da amostra tratada à 650°C/2h+600°C/1h, aumento (a) 800x e (b) 2000x	34
Figura 30	Difratograma amostra como soldada	35
Figura 31	Difratograma amostra tratada à 650°C/2h	36
Figura 32	Difratograma amostra tratada 600°C/2h	36
Figura 33	Difratograma amostra tratada 600°C/8h	37
Figura 34	Difratograma amostra revenimento duplo	37
Figura 35	Microestrutura observada por Divya (a) 650°C/1h e (b) Revenimento Duplo	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Composição nominal do aço CA-6-NM segundo a norma ASTM A743.....	17
Tabela 2 Parâmetros utilizados na soldagem da chapa	24

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	10
2.	OBJETIVOS.....	11
1.1	2.1 Objetivo Geral.....	11
1.2	2.2 Objetivos Específicos	11
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.1.	Turbinas	12
3.1.1.	Usinas Hidroelétricas.....	12
3.1.2.	Turbinas Hidráulicas.....	13
3.2.	Aços Inoxidáveis.....	15
3.2.1.	Características Gerais	15
3.2.2.	Aços Inoxidáveis Martensíticos	16
3.2.3.	Aço CA-6NM	17
3.3.	Soldagem	17
3.3.1.	Características Gerais	17
3.3.2.	Metal de Adição 13%Cr, 4%Ni e 0,4%Mo	18
3.4.	Tratamento Térmico	19
3.4.1.	Revenimento.....	19
4.	METODOLOGIA.....	21
4.1.	Material.....	21
4.2.	Preparação das amostras do metal de solda para tratamento térmico.....	25
4.3.	Tratamento Térmico	27
4.4.	Preparação Metalográfica	28
4.5.	Microscopia óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura.....	29
4.6.	Difração de Raios-X	29
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
6.1.	Análise Metalográfica.....	30
6.1.	Difração de Raios-x	35
6	CONCLUSÕES.....	39
5.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1. INTRODUÇÃO

Países com extensas bacias hidrográficas como o Brasil possuem a maior parte de sua produção energética derivada da utilização de usinas hidrelétricas. O princípio de funcionamento das usinas hidrelétricas consiste na transformação de energia mecânica derivada da rotação das turbinas em energia elétrica (ANEEL, 2016). O constante avanço das diretrizes de funcionamento e materiais utilizados nestas usinas é assunto de constante estudo e análise de modo a buscar-se a utilização de materiais cada vez mais eficientes e com menor custo de fabricação (VAZ,2004).

O aço inoxidável CA-6N ASTM A743 vem sendo muito utilizado na fabricação de rotores de usinas hidrelétricas. Devido a seu custo competitivo de mercado, além de sua elevada resistência à cavitação e a corrosão em meio aquoso, os rotores são fabricados através do processo de fundição desse aço, entretanto este método possui limitações devido ao tamanho dos componentes do rotor, sendo necessária sua fabricação em peças menores que são posteriormente soldadas na sequência de montagem. O processo de soldagem utilizado para a coalescência dos componentes do rotor é o de arame tubular (FCAW), devido ao tamanho dos componentes e altas taxas de deposição necessária (GRACIOSO,2003) (VAZ,2004).

Os rotores estão constantemente sujeitos a cavitação, fenômeno que ocasiona a perda de massa do componente, portanto devem ser submetidos a manutenções preventivas. A manutenção desses componentes consiste na deposição de metal através do processo de soldagem dos pontos onde ocorreu cavitação, fenômeno que ocasiona perda de massa do componente. O processo de manutenção é feito por soldagem com metal de solda 13%Cr, 4%Ni, 0,4%Mo e máximo 0,04% de carbono, o baixo teor de carbono evita trincas a frio. O tratamento térmico de revenimento é utilizado para melhorar as propriedades do conjunto soldado para a aplicação (VAZ,2004).

2. OBJETIVOS

1.1 2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é compreender o efeito da temperatura e do tempo do tratamento térmico de revenimento sobre a microestrutura do metal de solda do tipo 13%Cr, 4%Ni e 0,4%Mo.

1.2 2.2 Objetivos Específicos

- Realizar tratamento térmico de revenimento em amostras do metal de solda do tipo 13%Cr, 4%Ni e 0,4%Mo, variando a temperatura e o tempo;
- Realizar análises metalográficas nas amostras por meio do microscópio óptico e do microscópio eletrônico de varredura (MEV) em condições como soldado e após a realização do tratamento térmico;
- Análise das amostras por Difração de Raios-X;
- Avaliar a influência das condições do tratamento térmico na microestrutura;
- Avaliar a presença de austenita retida.

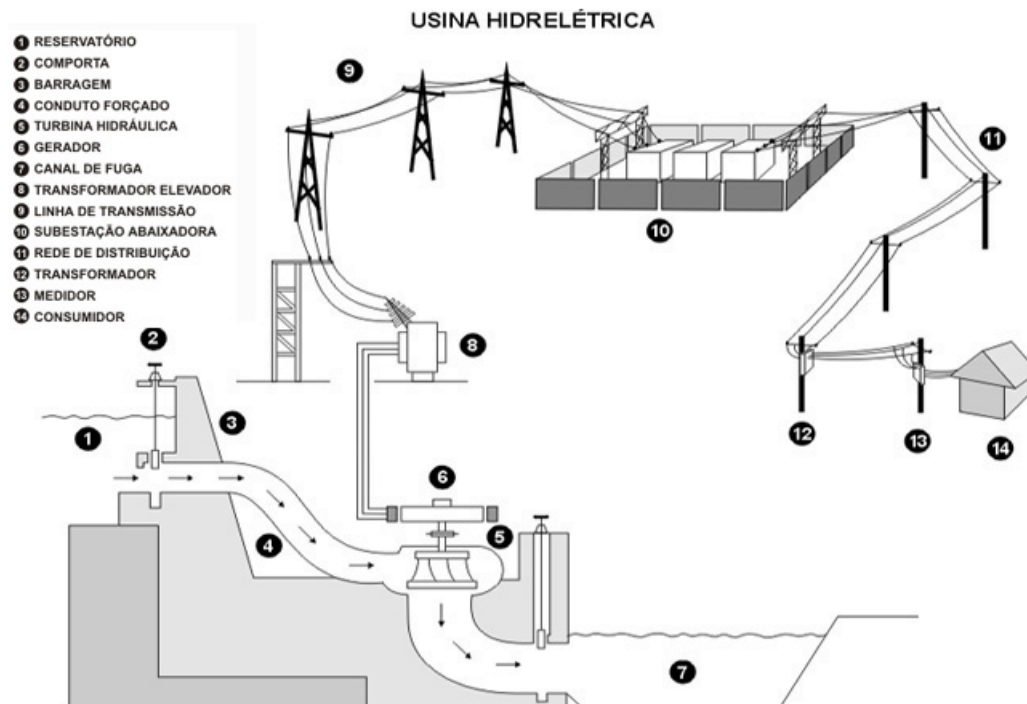
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Turbinas

3.1.1. Usinas Hidrelétricas

Para a obtenção de energia elétrica é preciso que uma força gire as turbinas nas usinas, transformando a energia mecânica em energia elétrica. Em usinas hidrelétricas, a força utilizada é a força da água (ANEEL,2015). As usinas hidrelétricas são compostas por uma barragem, sistemas de captação e adução de água, casa de força e sistema de restituição de água (Furnas, 2016). A barragem é atravessada por tubos, denominados aquedutos, onde a água passa até as turbinas localizadas em níveis mais baixos, como mostrado na Figura 1. A água gira as turbinas e esse movimento gera energia mecânica que será transformada no gerador em energia elétrica (Eletrobras, 2015).

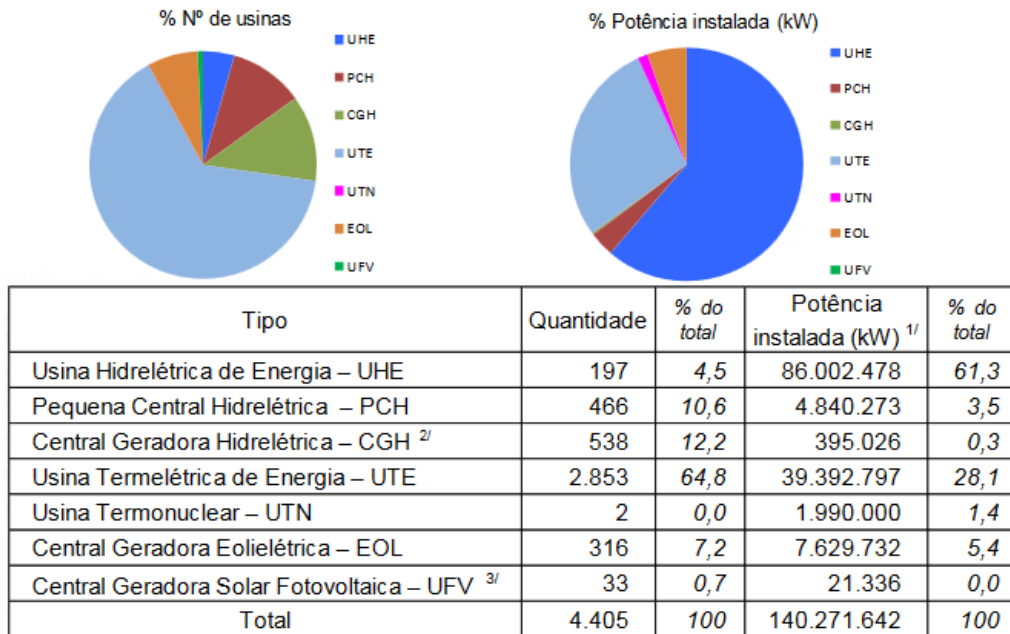
Figura 1 Esquema de uma Usina Hidrelétrica



Fonte: Furnas, 2016

Países como o Brasil, que possuem grande número de bacias hidrográficas tendem a utilizar esse tipo de indústria para obtenção de energia elétrica. Segundo o Banco de Informações de Geração da ANEEL, no último trimestre de 2015, o Brasil possuía mais de 60% da potência energética instalada derivada de usinas hidrelétricas, como mostrada na figura 2.

Figura 2 Fontes de Energia no Brasil, no Quarto Trimestre de 2015



1/ Sujeita à fiscalização da ANEEL

2/ Potência instalada igual ou inferior a 1 MW

3/ A partir de Junho/2015, foram excluídas as UFV de micro e minigeração distribuída (potência máxima de 1.000 kW, conforme Resolução 482/2012)

Fonte: ANEEL,2016

3.1.2. Turbinas Hidráulicas

As turbinas hidráulicas são os equipamentos que transformam a energia mecânica devido ao movimento de um fluido em potência de eixo (GONÇALVES, 2007).

As turbinas possuem componentes básicos em todos os tipos, são eles: um rotor com um número de pás, esse rotor é conectado ao eixo que gira conforme um grupo de mancais de deslizamento (GONÇALVES, 2007). As principais turbinas são do tipo impulso ou reação, sendo o tipo Pelton o mais conhecido para turbinas de impulso e de reação são as turbinas tipo Francis e Kaplan (RAMOS et al,2009).

A turbina do tipo Francis foi desenvolvida em 1847 pelo inglês James Bicheno Francis (1815-1892) enquanto trabalhava nos Estados Unidos. James desenvolveu uma melhora na

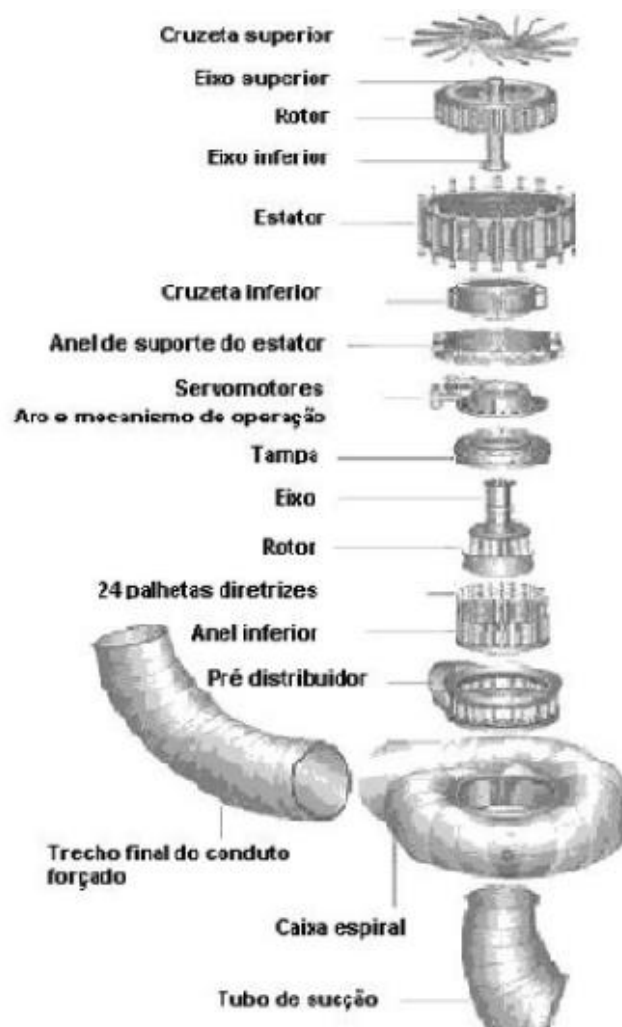
máquina de escoamento centrípeta que foi desenvolvida por Samuel Dowd, esse aperfeiçoamento ganhou o nome de turbina Francis (RAMOS et al,2009).

A turbina do tipo Pelton é utilizada para locais onde há quedas elevadas, onde a vazão é reduzida e curso d'água de pequeno deflúvio. São utilizadas em usinas de altas potências e também em micro usinas, devido à fabricação e instalação relativamente simples (RAMOS et al,2009).

A turbina do tipo Kaplan foi desenvolvida em 1912, pelo engenheiro Victor Kaplan, um novo tipo de turbina tipo hélice, fazendo possível a variação da inclinação ou passo das pás. (RAMOS et al,2009).

Os rotores das turbinas hidráulicas são usualmente fabricados por dois processos, o primeiro de fundição e o segundo de soldagem. No âmbito dos materiais empregados, existem duas formas utilizadas, a primeira é em aço carbono fundido coberto por uma camada de solda em aço inoxidável e a segunda forma é a utilização de aço inoxidável martensítico macio (CA6-NM), também fundido (VAZ, 2014).

Figura 3 Vista explodida demonstrando os componentes da Unidade Geradora da Usina de Itaipu



Fonte: Vaz, 2004

3.2. Aços Inoxidáveis

3.2.1. Características Gerais

Aços inoxidáveis possuem teores de cromo superiores a 10%, a introdução deste elemento na liga confere ao aço maior resistência à oxidação e à corrosão, podendo também possuir outros elementos de liga como níquel e molibdênio (CHIAVERINI,1977). O elemento cromo forma no aço uma camada de passivação contínua, insolúvel e não porosa na superfície. Essa camada de passivação contínua é formada devido à migração do elemento para a superfície do material atuando na proteção contra dissolução em meios corrosivos evitando a perda de massa de material por corrosão (GENTIL,2011).

Os aços inoxidáveis são classificados em três grupos com base na microestrutura apresentada à temperatura ambiente: aços inoxidáveis martensíticos, ferríticos e austeníticos. (CHIAVERINI,1977).

Aços inoxidáveis martensíticos são caracterizados por possuírem teores de cromo entre 11,5% e 18% e teor de carbono em geral acima de 0,1%(CHIAVERINI,1977). O teor de cromo presente nesse tipo de aço aumenta temperabilidade (COLPAERT, 2008).

Aços inoxidáveis ferríticos são caracterizados por possuírem teores de cromo maiores que os aços inoxidáveis martensíticos e teores de carbono menores, atingindo o máximo de 0,20%. Esse tipo de aço cuja composição química fica a direita do campo austenítico, o que justifica não serem endurecíveis por têmpera (CHIAVERINI,1977).

Aços inoxidáveis austeníticos são caracterizados por possuírem teores de cromo entre 16% e 30% e teores de níquel entre 8% e 35% (COLPAERT, 2008). O níquel favorece a formação de uma camada de óxidos que melhora as características desses aços em relação a resistência a oxidação a altas temperaturas e a corrosão (CHIAVERINI,1977).

3.2.2. Aços Inoxidáveis Martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos possuem boa resistência à corrosão sobre a ação da água. Essa característica pode ser alterada com a variação de concentrações dos elementos carbono e cromo, ou seja, quanto maior o teor de carbono menor a resistência à corrosão, por sua vez quanto maior o teor de cromo, maior a resistência à corrosão (CHIAVERINI,1977).

Assim como os aços inoxidáveis ferríticos possuem pequenas adições de elementos de liga, constituindo-se majoritariamente de Fe-Cr-C. Possuem elementos gamegênicos, que favorecem a formação da fase γ , e assim a formação martensítica. A microestrutura deve ser determinada pela quantidade dos elementos Cr e C e pelo tratamento térmico. O aço inox martensítico sofre tratamentos térmicos semelhantes aos aços baixo carbono, onde são elevados até a temperatura de austenitização e depois resfriados a uma taxa necessária para que se possa obter a estrutura martensítica. Após esse procedimento os aços inoxidáveis martensíticos devem passar pelo tratamento de revenimento a fim de aumentar ductilidade e aliviar as tensões do material (SMITH,1993).

3.2.3. Aço CA-6NM

A classificação dos aços inoxidáveis fundidos é feita segundo o *Alloy Casting Institute* (ACI). No caso do aço CA-6NM, a primeira letra refere-se a resistência ao ambiente corrosivo (C) a segunda letra refere-se ao valor nominal do teor de níquel, que varia de A a Z. O número que segue as duas primeiras letras refere-se ao teor de carbono (x100), por fim as letras subsequentes referem-se aos elementos de liga, nesse caso níquel (N) e molibdênio (M) (GRACIOSO,2003).

Os aços C-NM contêm teores de carbono máximo de 0,08%, 12 a 17% de cromo e 3,5 a 6% de níquel e 2,5% de molibdênio. A utilização dos aços inoxidáveis martensíticos macios, destacando-se os aços com composição 13%Cr, 4%Ni e 0,4%Mo denominado CA-6NM segundo a ASTM A743, deve-se a características como resistência a corrosão e danos por cavitação superior e boa soldabilidade (VAZ,2004). A composição nominal do aço CA-6NM pode ser observada na tabela 1.

Tabela 1 Composição nominal do aço CA-6-NM segundo a norma ASTM A743

Elemento Químico	C (máx)	Mn (máx)	Si (máx)	Cr	Ni	Mo	P(máx)	S (máx)
Percentual	0,06	1,00	1,00	11,5 - 14,0	3,5 - 4,5	0,4 - 1,0	0,04	0,03

Fonte: GRACIOSO, 2003 (modificada)

Uma das utilizações mais comuns do aço CA-6NM é em turbinas hidráulicas. Devido às suas propriedades. Esse tipo de equipamento está constantemente submetido a um intenso fluxo de água, esse fluxo provoca nessas estruturas um dos seus principais problemas, a cavitação. A cavitação é o fenômeno que ocorre a vaporização de um líquido submetido a um fluxo, essa vaporização formam-se bolhas que colidem com a superfície do componente e induz a perda de massa nessa região. Esse fenômeno provoca a necessidade de manutenções nos rotores das turbinas hidráulicas, o reparo dos rotores ocorre por deposição por soldagem de metal de solda com características semelhantes ao metal base (Pukasiewicz et. al., 2012).

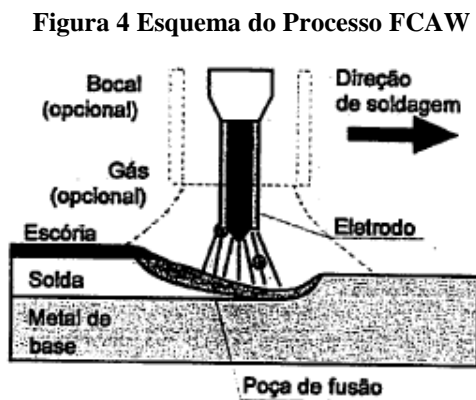
3.3. Soldagem

3.3.1. Características Gerais

O processo de soldagem a arco com arame tubular (Flux-Cored Arc Welding – FCAW) gera a coalescência dos metais através do aquecimento gerado pelo arco elétrico. O arco elétrico é criado pelo eletrodo metálico tubular e a peça que será soldada. O eletrodo possui características importantes nesse processo, ele é contínuo, consumível e o fluxo está em seu interior, para proteger o cordão de solda e o arco elétrico (MARQUES, 1991).

O processo vem sendo cada vez mais utilizado, devido a grande variedade de consumíveis desenvolvidos, normalmente utilizada para aços carbono e baixa liga e aços inoxidáveis, além da possibilidade de solda em qualquer posição (BRACARENSE et. al., 2013).

A soldagem FCAW é otimizada para obtenção de soldas em altas produções, onde deve-se utilizar elevado *stickout*, o que é de grande interesse para a indústria (BRACARENSE et. al., 2013). Um esquema do processo pode ser observado na figura 4.



Fonte: BRACARENSE et.al.,2013

3.3.2. *Metal de Adição 13%Cr, 4%Ni e 0,4%Mo*

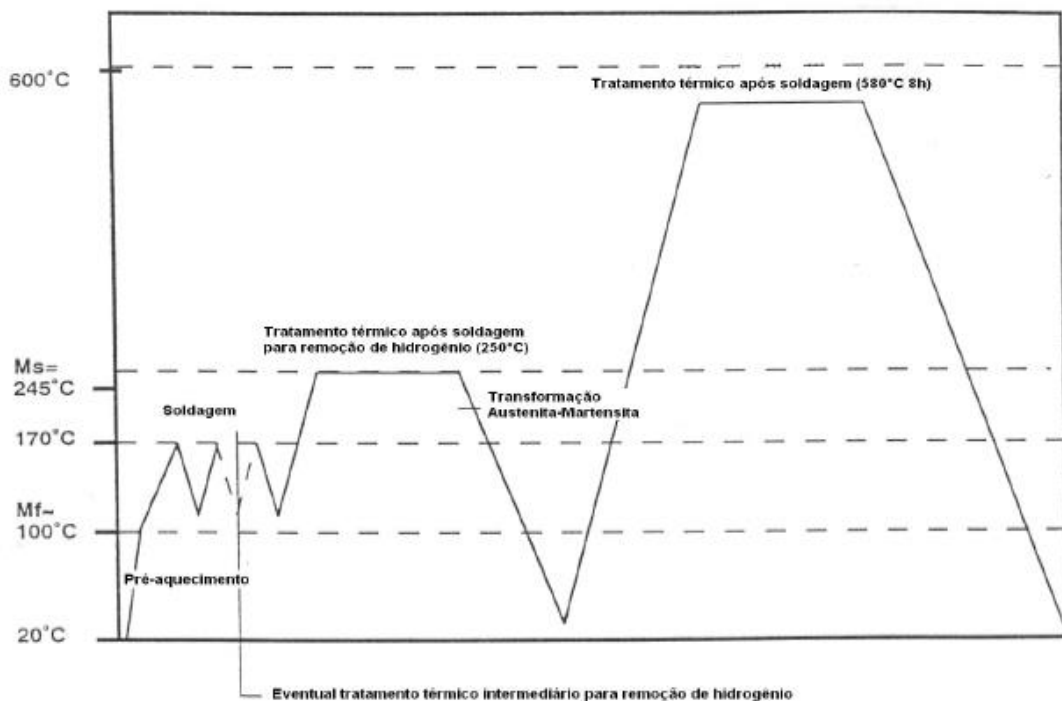
Para a soldagem dos rotores de turbinas hidráulicas, é recomendada a utilização de consumíveis com composição química semelhante ao metal base, nesse caso é utilizado o aço martensítico macio CA-6NM e o consumível mais indicado é o 13%Cr, 4%Ni, 0,4%Mo, com teor de carbono de no máximo 0,04%. Usualmente, deve ser feito pré-aquecimento do metal base antes da soldagem, em temperaturas de 100 a 130°C e controle de temperatura dos passes, a fim de evitar a formação de trincas a frio (VAZ,2004).

O metal de solda solidifica-se em ferrita- δ , estável em temperaturas mais baixas, com a elevação da temperatura ocorre a mudança de fase para austenita. Durante o resfriamento essa

austenita se transformará em martensita, essa martensita também chamada de “martensita macia” por sua dureza inferior, ocasionada pelo baixo teor de carbono (GONÇALVES, 2007).

Para a obtenção de uma estrutura e propriedades semelhantes ao metal base, é recomendado após a soldagem o tratamento térmico de revenimento com temperaturas entre 580 e 600°C, obtendo-se uma estrutura de 20-25% de austenita estável finamente dispersa pela matriz de martensita (GONÇALVES, 2007). A figura 5 apresenta uma recomendação do ciclo térmico de soldagem.

Figura 5 Ciclo Térmico de Soldagem Recomendado para o aço CA-6NM



Fonte: BAAS, 1996

3.4. Tratamento Térmico

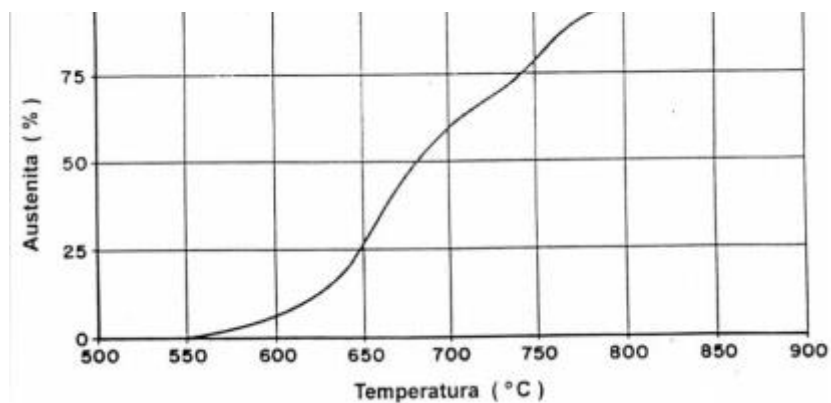
3.4.1. Revenimento

Frequentemente o revenimento é utilizado após o tratamento térmico de têmpera, com a finalidade de eliminar o excesso de tensão e dureza originadas por ela. O processo consiste em submeter o material a temperaturas até a proximidade da linha A_1 , entretanto a temperatura de ensaio deverá ser escolhida de acordo com as propriedades de interesse para a peça final. (CHIAVERINI,1977). O processo de revenimento consiste na segregação do carbono e

precipitação de carbonetos, recuperação e recristalização dos reticulados instáveis de martensita ao reticulado estável cúbico centrado de ferrita e cementita (SMITH,1993).

O tratamento térmico de revenimento possui objetivos que dependem da composição química e utilização final do material. No caso dos aços CA-6NM, tem a finalidade de aumentar a tenacidade e ductilidade. A tenacidade ganha durante o tratamento de revenimento dependerá da formação da martensita revenida e austenita retida (formada entre 550 e 600°C) a figura 6 ilustra a formação de austenita em função da temperatura de tratamento térmico de revenimento para o aço CA-6NM. É possível observar na figura 7 que em temperaturas superiores à 615°C a austenita começa a se decompor em austenita instável que será transformada em martensita depois do resfriamento, com o aumento da formação da austenita estável é observado o aumento da tenacidade do material (GRACIOSO,2003).

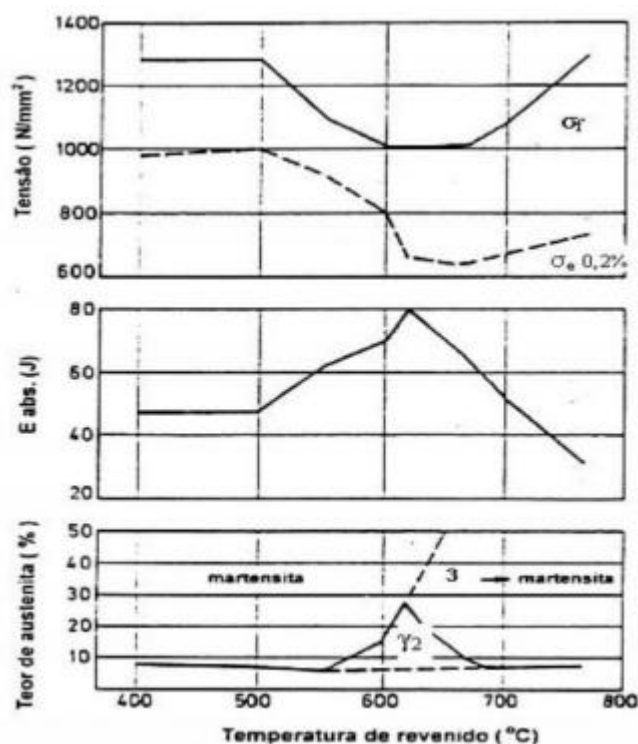
Figura 6 Formação de austenita em função da temperatura de revenimento para o aço CA-6NM



Fonte: NIEDERAU, 1977.

Figura 7 Propriedades Mecânicas do aço CA-6NM em função da Temperatura de Revenimento

Fonte: NIEDERAU, 1977



Fonte: NIEDERAU, 1977.

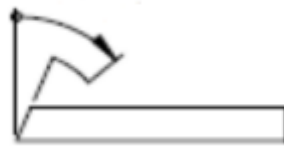
4. METODOLOGIA

4.1. Material

O metal de solda foi produzido pelo Tadeu, 2015 consumível utilizado para a deposição da liga 13%Cr, 4%Ni, 0,4%Mo foi um arame tubular flux cored (fluxo interno não metálico), de baixo hidrogênio (máximo 4ml/100g de metal depositado), com diâmetro nominal de 1,6 mm, denominado comercialmente DW-410NiMo e produzido pela Kobelco Welding of American INC. Este consumível é classificado segundo a norma AWS A5.22/A5.22M: 2012 como E410NiMoT- 4/-1 (SANTOS, 2015).

Foram utilizadas chapas de aço SAE 1020 para a obtenção do metal de solda. A escolha desse aço deve-se ao custo em relação ao aço inoxidável e, além disso, é previsto pela American Society of Mechanical Engineers (ASME) a utilização de outro metal desde que seguidas as instruções. O chanfro do metal de base foi feito por processo de fresamento conforme a figura 8 (SANTOS, 2015).

Figura 8 Chanfro do metal de solda



Fonte: SANTOS, 2015

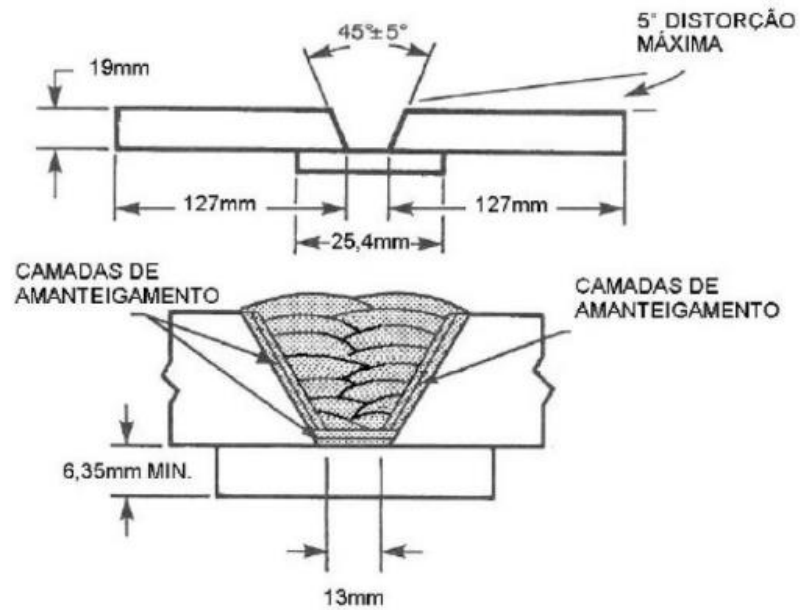
Figura 9 Usinagem da chapa de metal de base



Fonte: SANTOS, 2015

A soldagem do metal foi realizada com gás de proteção de composição 80% Ar-20% CO₂ conforme indicado pelo fabricante (Products Spotlight -KOBELCO). A chapa foi soldada com o metal de solda da liga 13%Cr, 4%Ni e 0,4%Mo, o formato da chapa de teste foi definido de acordo com as orientações do código ASME Seção II Parte C (AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2006) figura 10 (SANTOS, 2015).

Figura 10 Configuração da junta soldada de acordo com a ASME



Fonte: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, 2006

O código ASME prevê a deposição de duas camadas de “amanteigamento”, ou seja, um recobrimento do chanfro do metal de base com o metal de solda afim de evitar a diluição do metal de base com o cordão de solda, o “amanteigamento” foi realizado conforme a figura 11 (SANTOS, 2015).

Figura 11 Camada de Amanteigamento



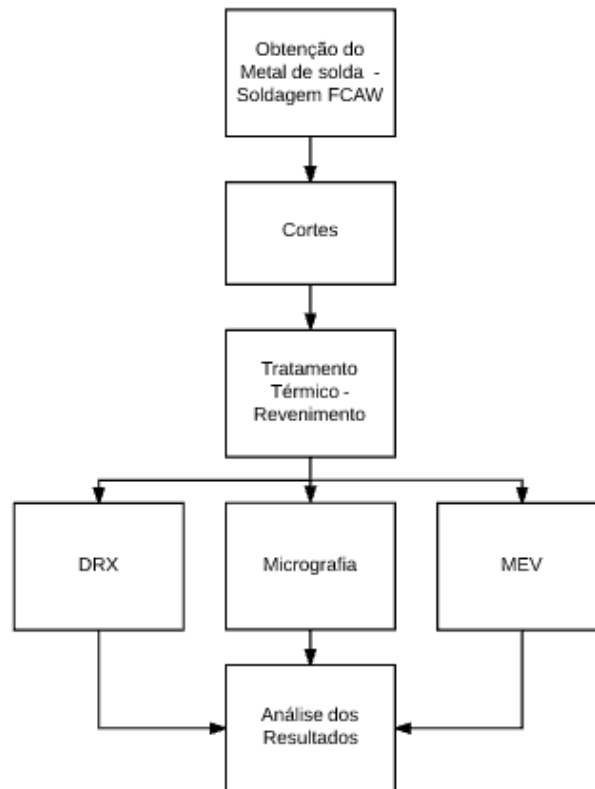
Fonte: SANTOS, 2015

As chapas foram soldadas com os parâmetros e técnicas recomendadas pelo fabricante conforme a tabela 2.

Tabela 2 Parâmetros utilizados na soldagem da chapa

Gás de proteção	80%Ar 20%CO ₂
Faixa de vazão do gás de proteção	18-20
Temperatura de pré aquecimento (°C)	100
Temperatura entre passes °C	150-200
Polaridade	CC+
Corrente (A)	230± 10
Tensão	29±2

Fonte: SANTOS, 2015

Figura 12 Fluxograma do trabalho

Fonte: Produzido pelo autor

4.2. Preparação das amostras do metal de solda para tratamento térmico

As amostras foram cortadas primeiramente como representadas na figura 12, com espessura de 1cm, realizando um total de 5 amostras.

Figura 13 Serra de corte das amostras



Fonte: Produzido pelo autor

Após a realização do corte inicial da amostra foi feito um segundo corte delimitando somente a porção do metal de solda das amostras que seriam posteriormente tratadas e analisadas. O corte foi feito na cortadora Metalográfica CM 80 no laboratório de Metalografia do CEFET-MG representado na figura 13. As amostras foram cortadas procurando manter as dimensões de 1cm^3 para cada peça, conforme figura 14.

Figura 14 Cortadora Metalográfica CM 80



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 15 Amostras cortadas



Fonte: Produzido pelo autor

4.3. Tratamento Térmico

O tratamento térmico de revenimento foi realizado no Laboratório de Tratamentos Térmicos do CEFET-MG. Este realizou-se em quatro das cinco amostras analisadas, os parâmetros de temperatura variaram conforme os seguintes parâmetros:

- Amostra 0 – manteve-se como soldada, para efeito de comparação;
- Amostra 1 – revenimento simples à 650°C durante 2 horas;
- Amostra 2 – revenimento duplo 650°C durante 2 horas e 600°C durante 1 hora;
- Amostra 3 – revenimento simples à 600°C durante 2 horas;
- Amostra 4 - Revenimento simples à 600°C durante 8 horas.

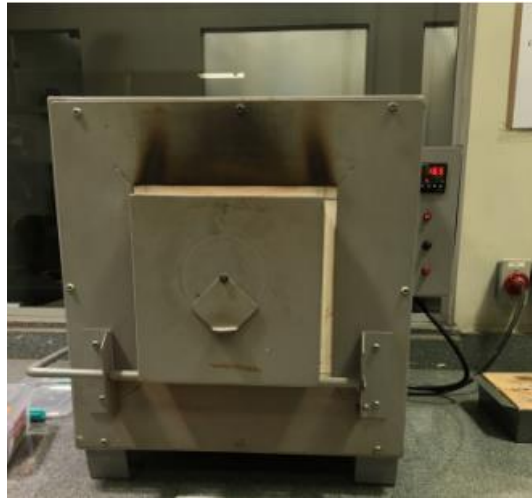
O procedimento de tratamento térmico se deu através do aquecimento do forno até a temperatura de 650°C para a amostra 1 e 2 e 600°C para a amostra 5, após o tratamento da amostra 1 e 2 a temperatura foi reduzida até 600°C para realização do tratamento das amostras 2, 3 e 4. As amostras foram resfriadas ao ar. A amostra 0 não foi submetida a nenhum tratamento térmico após a soldagem para efeito de comparação. Os fornos utilizados para os tratamentos estão representados nas figuras 15 e 16.

Figura 16 Forno utilizado para revenimento à 600°C durante 8h



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 17 Forno utilizado para tratamento à 650°C e 600°C



Fonte: Produzido pelo autor

4.4. Preparação Metalográfica

A análise metalográfica foi realizada no Laboratório de Metalografia do CEFET-MG. As amostras foram embutidas a frio conforme a figura 17, primeiramente a amostra é posicionada na forma polimérica, com resina fenólica e formaldeído, até ser completamente coberta. Após o tempo de polimerização a amostra está pronta para o lixamento e polimento.

Figura 18 Embutimento



Fonte: Produzido pelo autor

As amostras embutidas foram lixadas nas lixas de 120, 240, 320, 400, 600 Mesh respectivamente e em seguida foram polidas com pasta de diamante 9 e $3\mu\text{m}$. Após o polimento as amostras foram atacadas com reagente químico Villela.

4.5. Microscopia óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura

As imagens da microestrutura foram captadas através da microscopia ótica com o microscópio metalográfico de marca Kontrol, com aquisição de imagens com aumento de 200x. Também foram captadas imagens pela microscopia eletrônica de varredura, marca Shimadzu modelo SSX-550.

Figura 19 Microscópio Eletrônico de Varredura, Shimadzu, modelo SSX-550



Fonte: Produzido pelo autor

4.6. Difração de Raios-X

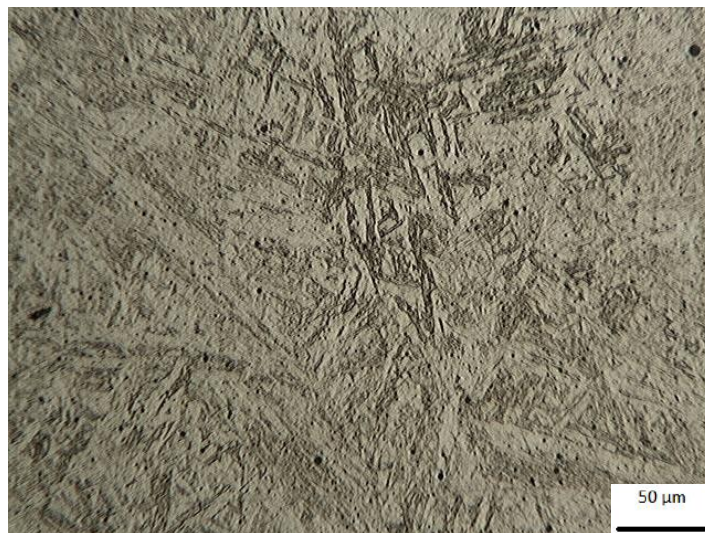
A técnica de difração foi realizada no laboratório de Caracterização e Microscopia do CEFET-MG, através do equipamento SHIMADZU XRD700. A metodologia utilizada foi de tempo fixo 2s, passo $0,02\text{s}^{-1}$ e ângulo de varredura 30° a 110° . Os gráficos foram plotados através do software *Origin Pro*[®] 8, e posteriormente submetidos à técnica semi quantitativa dos picos observados, utilizando como base a análise de Lorentz, que por sua vez usa-se como base a área da curva e os picos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Análise Metalográfica

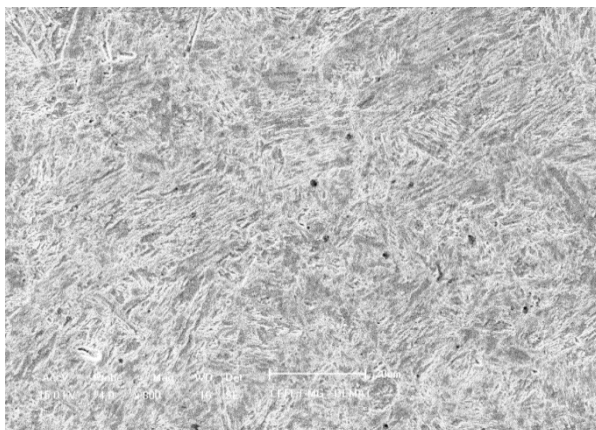
O metal de solda na condição “como soldado” apresenta uma estrutura de martensita com baixo teor de carbono, apresentando baixa austenita retida, conforme a figura 19 e 20.

Figura 20 Microestrutura da amostra como soldada aumento 200x

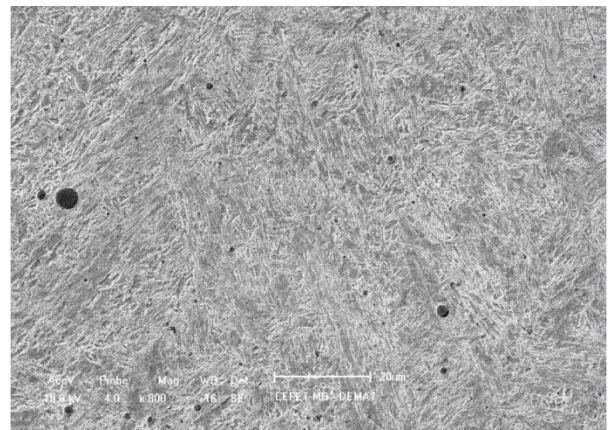


Fonte: Produzido pelo autor

Figura 21 Microestrutura observada no MEV, aumento (a) 800x e (b) 2000x



(a)



(b)

Fonte: Produzido pelo autor

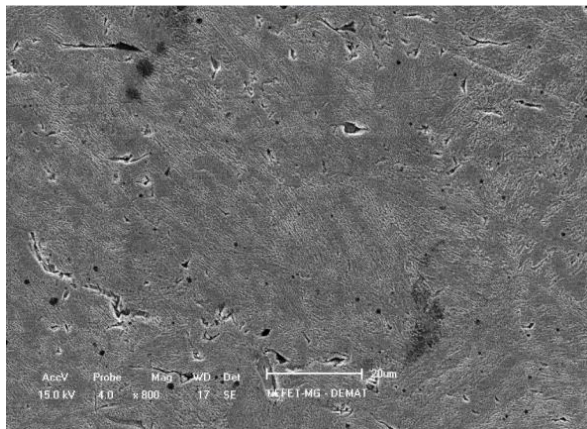
Após o tratamento de revenimento à 650°C por 2h, observamos nas figuras 21 e 22 uma estrutura típica desse tratamento para esse tipo de aço que é a martensita revenida (COLPAERT, 2008).

Figura 23 Micrografia amostra tratada à 650°C durante 2h

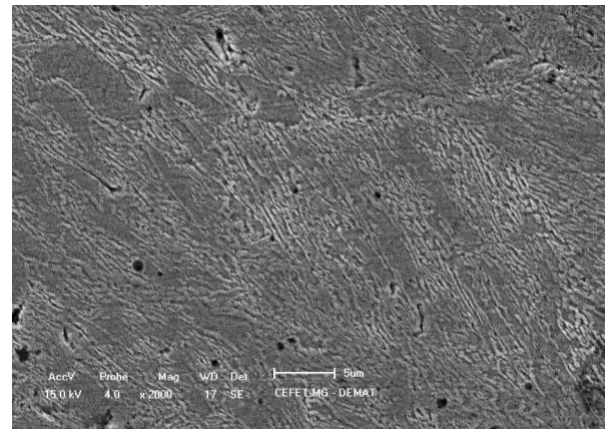


Fonte: Produzido pelo autor

Figura 22 Microestrutura obtida pelo meV da amostra tratada à 650°C durante 2h, aumento (a) 800x e (b) 2000x



(a)

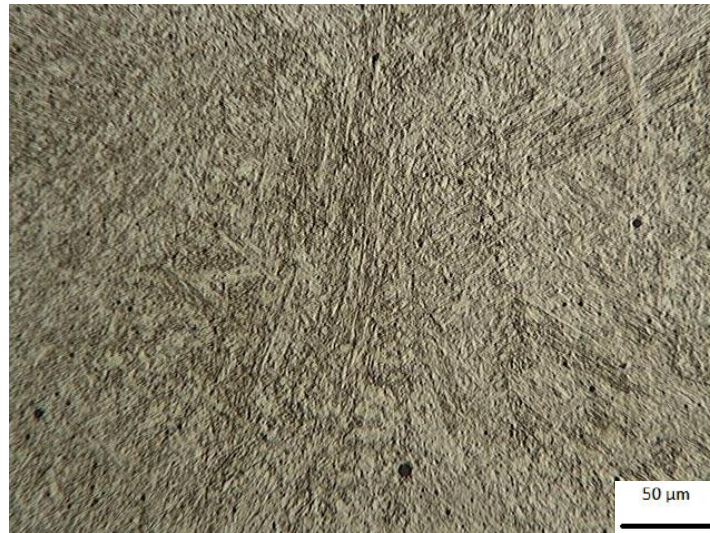


(b)

Fonte: Produzido pelo autor

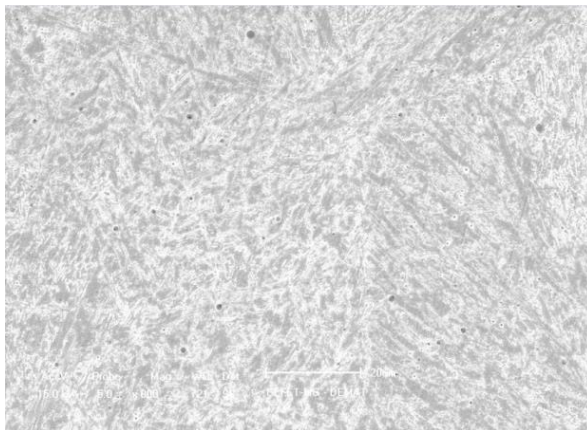
A amostra tratada a 600 °C por 2h, apresentou uma estrutura menos difusa quando comparada com a amostra 1, tratada à 650°C durante o mesmo tempo, pode ser observado nas figuras 23 e 24.

Figura 25 Microestrutura amostra tratada à 600°C durante 2h

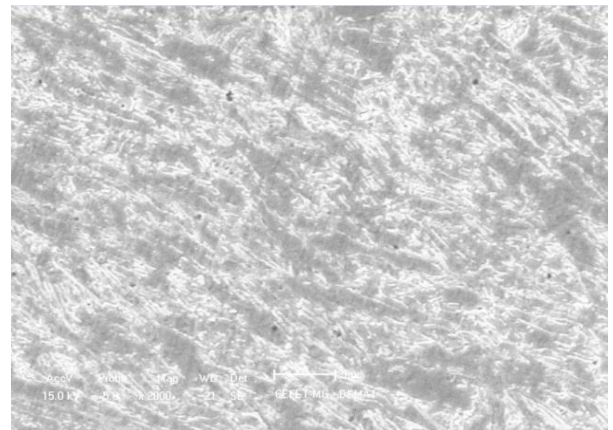


Fonte: Produzido pelo autor

Figura 24 Microestrutura obtida pelo meV da amostra tratada à 600°C durante 2h, aumento (a) 800x e (b) 2000x



(a)

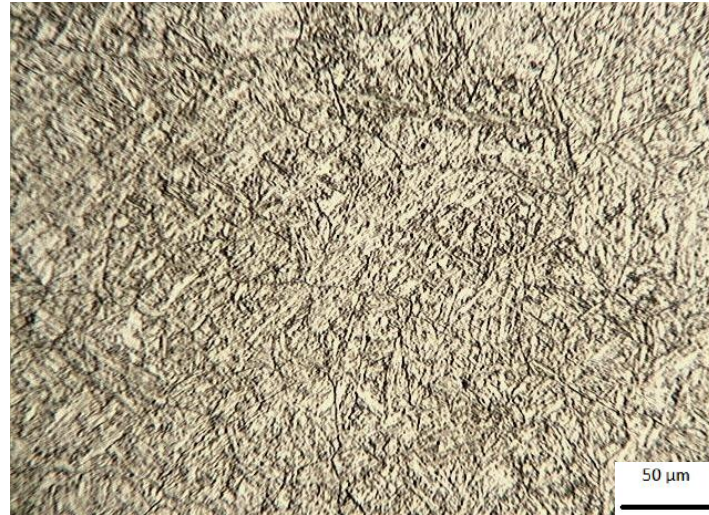


(b)

Fonte: Produzido pelo autor

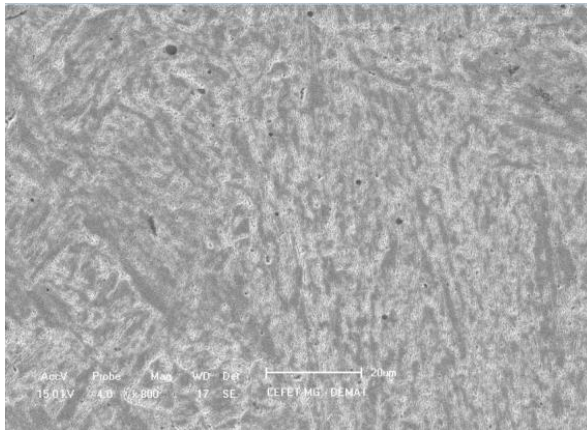
A amostra de revenimento à 600°C por 8h apresentou uma martensita revenida, que perdeu a estrutura de placas quando comparada com as outras amostras.

Figura 26 Microestrutura amostra tratada à 600°C durante 8h

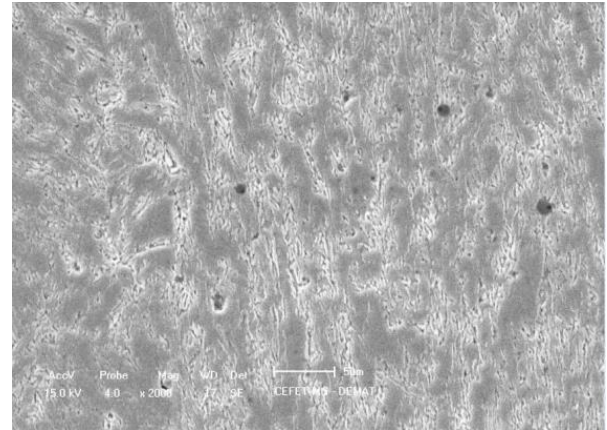


Fonte: Produzido pelo autor

Figura 27 Microestrutura obtida pelo meV da amostra tratada à 600°C durante 2h, aumento (a) 800x e (b) 2000x



(a)

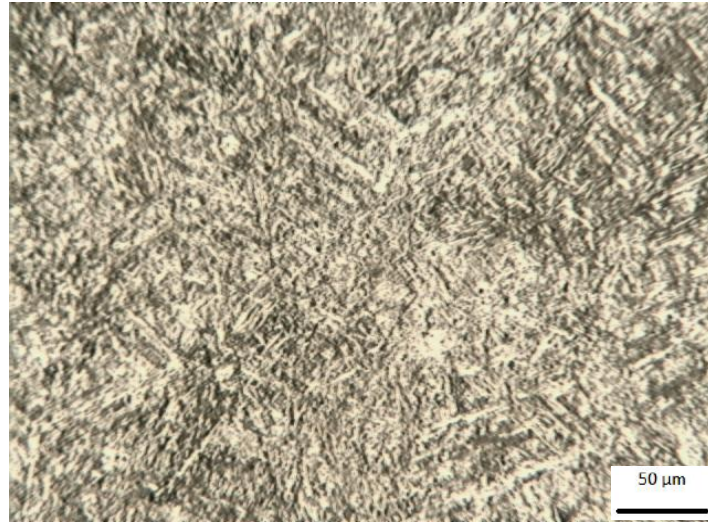


(b)

Fonte: Produzido pelo autor

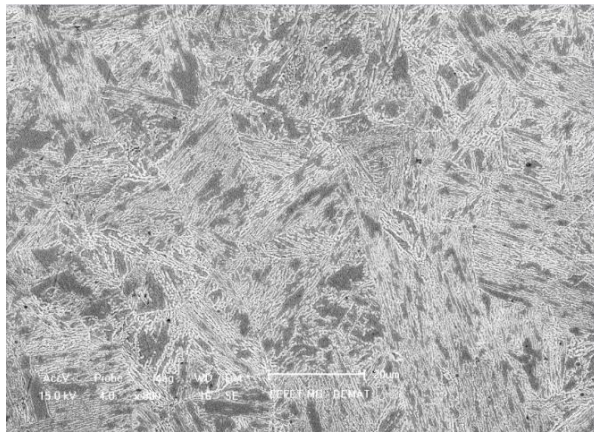
A análise metalográfica da amostra que sofreu revenimento duplo apresentou a estrutura representada nas figuras 27 e 28.

Figura 28 Microestrutura amostra tratada por revenimento duplo 650°C/2h+600°C/1h

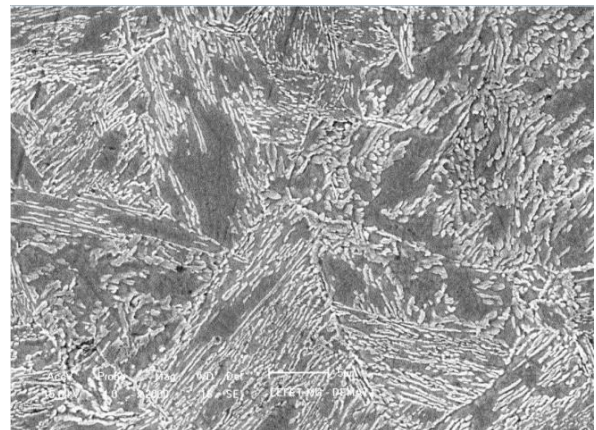


Fonte: Produzido pelo autor

Figura 29 Microestrutura obtida pelo MEV da amostra tratada à 650°C/2h+600°C/1h, aumento (a) 800x e (b) 2000x



(a)



(b)

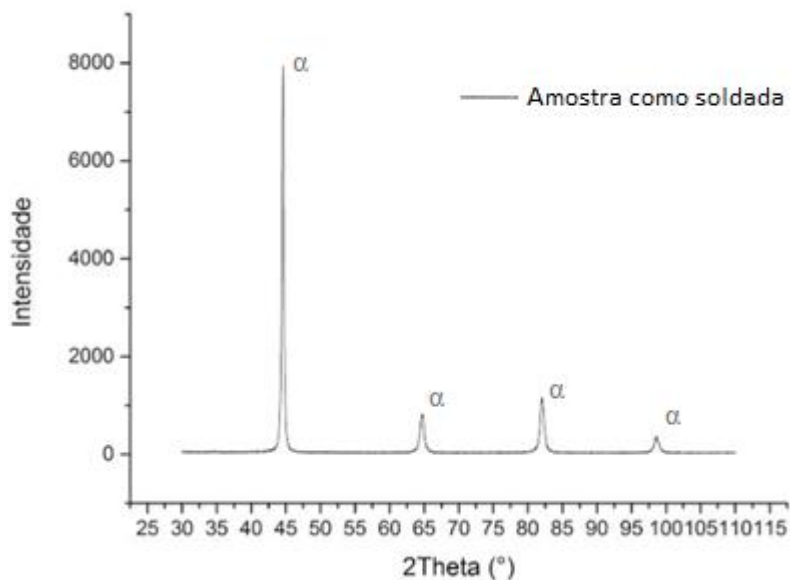
Fonte: Produzido pelo autor

6.1. Difração de Raios-x

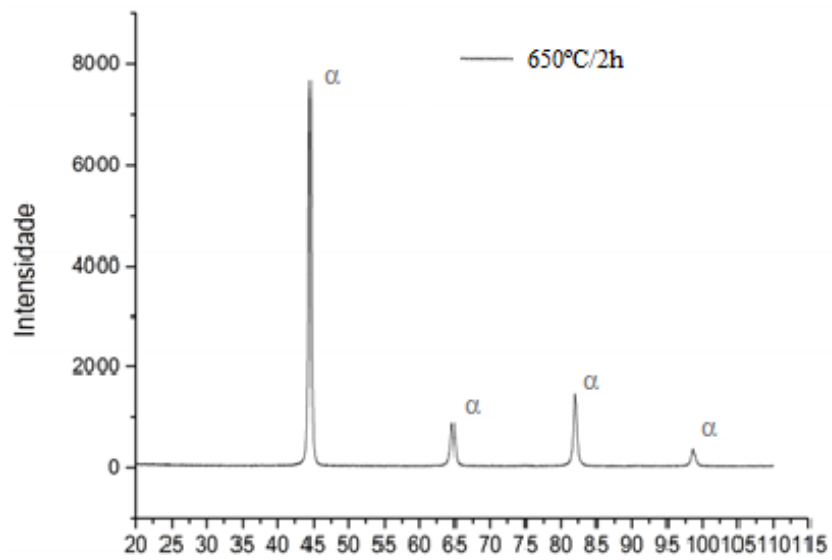
As amostras foram submetidas a difração de raios x, que é uma técnica semi quantitativa, para avaliação da quantidade de austenita retida.

Os picos observados na figura 29 são $44,6^\circ$, $64,72^\circ$, $82,08^\circ$ e $98,6^\circ$ são picos característicos de ferrita. Os picos de ferrita sobrepõe os de martensita pois eles ocorrem no mesmo 2θ porém, de acordo com as imagens obtidas na análise de micrografia, é possível concluir que há presença de martensita ou martensita revenida. (CULLITY, 1978) (CHEN *et. al*,2011).

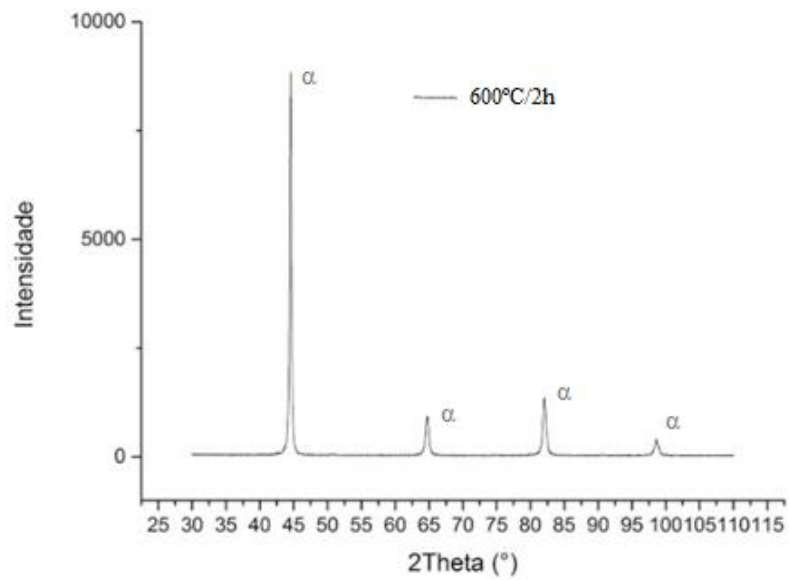
Figura 30 Difratoograma amostra como soldada



Fonte: Produzido pelo autor

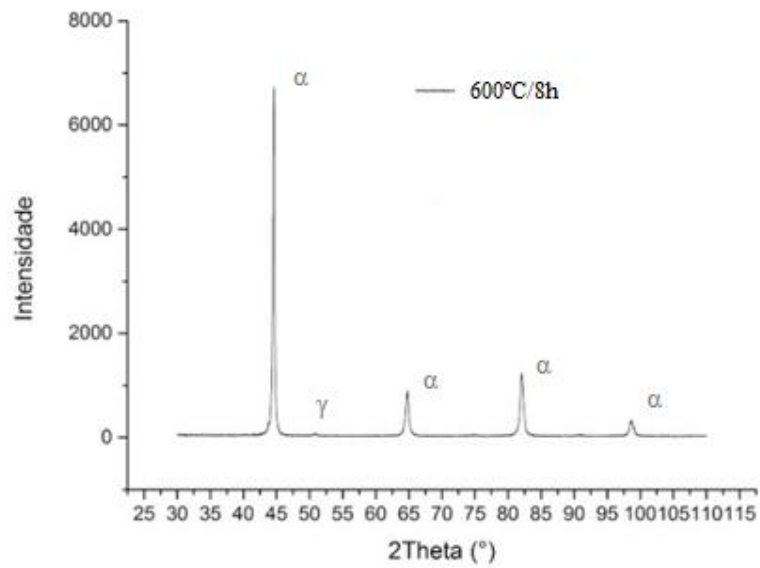
Figura 31 Difratoograma amostra tratada à 650°C/2h

Fonte: Produzido pelo autor

Figura 32 Difratoograma amostra tratada 600°C/2h

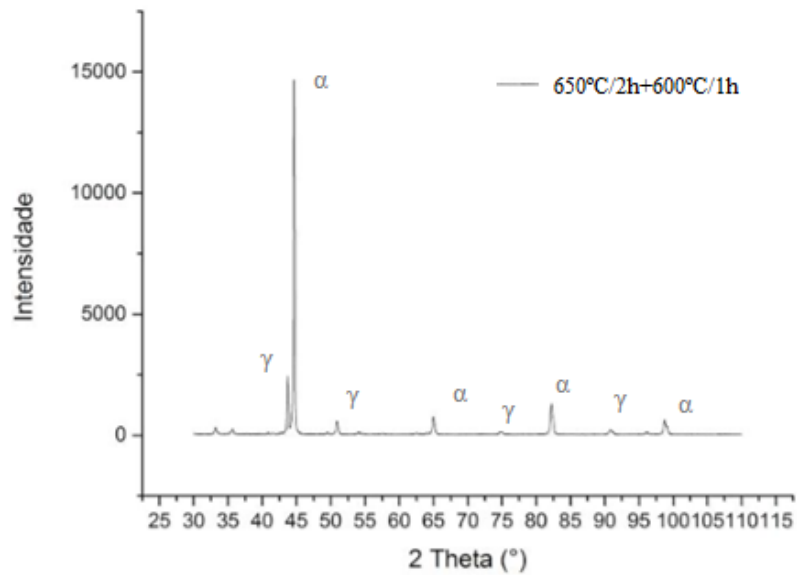
Fonte: Produzido pelo autor

Figura 33 Difratoograma amostra tratada 600°C/8h



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 34 Difratoograma amostra revenimento duplo



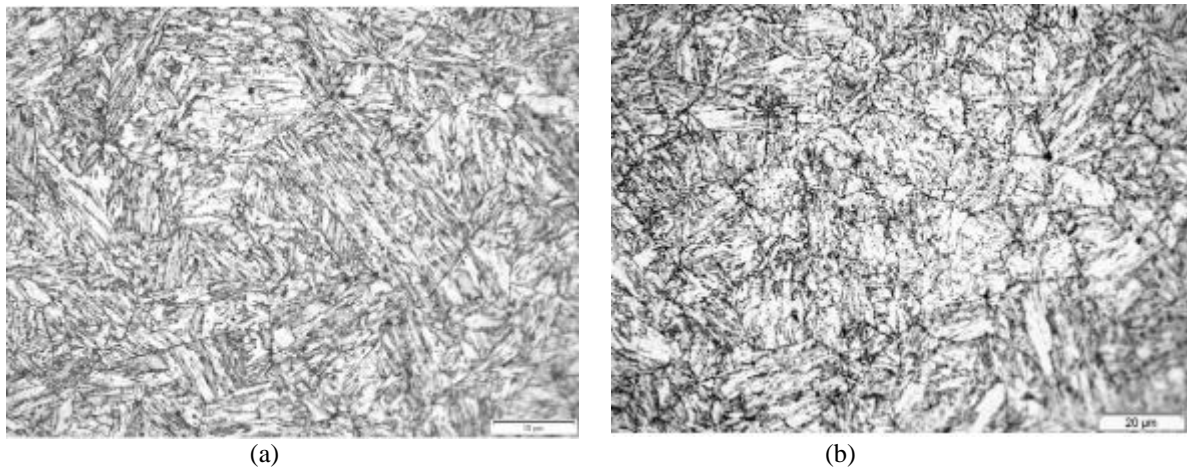
Fonte: Produzido pelo autor

O aumento da quantidade de austenita é observado durante o tratamento de revenimento e pode ser observado através da figura 7, a partir de aproximadamente 580°C ocorre o crescimento do teor de austenita (STRAUBE, 1988).

Segundo Straube, o teor de austenita retida para o metal como soldado é de 1 a 2%, entretanto o método de difração de raios-x não é eficiente para determinar as frações inferiores a 5%.

Para a amostra tratada por revenimento duplo, foi possível observar um teor de cerca 17% de austenita retida, isso está coerente com o aumento da tenacidade observada por Divya e as mudanças na microestrutura descritas por ele, conforme a figura 34.

Figura 35 Microestrutura observada por Divya (a) 650°C/1h e (b) Revenimento Duplo



Fonte: DIVYA,2011

A amostra submetida ao tratamento de revenimento à 600°C/8h foi possível observar um teor de austenita retida 5%.

Os resultados da quantidade de austenita retida na amostra que foi submetida ao revenimento duplo eram previstos na literatura, de acordo com DIVIA, 2011, entretanto era esperado um teor maior de austenita retida para a amostra tratada a 650°C, porém quando observa-se o gráfico da figura 7, de acordo com Niederau o teor de austenita estável começa a decair a partir dos 615°C, por isso não foi possível observar os picos de austenita retida nessa amostra. Outro fator que pode ter influenciado na análise de DRX é a não realização de decapagem química, durante a técnica metalográfica pode ter transformado a austenita retida em martensita nas camadas superficiais do material.

6 CONCLUSÕES

- Com base nas análises metalográficas o aumento da temperatura de revenimento aumentou o teor de martensita revenida, conforme observado nas imagens de micrografia. A amostra submetida ao revenimento à 650°C apresentou uma estrutura martensítica que não apresenta uma estrutura de placas quando comparada a amostra à 600°C durante o mesmo tempo.
- Quando adicionamos o efeito do tempo na análise, foi possível analisar que quanto maior o tempo de tratamento maior a quantidade de martensita revenida, a amostra 5 que foi submetida a revenimento à 600°C durante 8h apresentou uma estrutura típica de martensita revenida como descrito na literatura, uma vez que perdeu completamente a estrutura de placas;
- Pelos dados obtidos através da difração de raios-X foi possível avaliar a presença de austenita retida. A amostra tratada a 600°C durante 8h apresentou austenita retida com picos visíveis com uma fração volumétrica de 5%, já a amostra submetida ao tratamento de revenimento duplo apresentou um teor maior de austenita retida cerca de 17%.

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar as análises por difração fazendo uma decapagem das amostras para confirmar os resultados encontrados;
- Realizar medidas de dureza das amostras tratadas sob as diferentes condições

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Informações Gerenciais**: Dezembro de 2015. Brasília, 2015.

BAAS, P.. Recommended welding procedure for cladding and joining with metal cored wire PZ6166. Switzerland: Filarc Welding Industries B.V.,1996. Apud NIEDERAU, Hermann J. State of development of soft martensitic stainless chromiumnickel steels. ed Kurt H. Miska, Climax Molibdenium Company, 1977. Apud GONÇALVES, B. H. B. Estudo Comparativo da resistência à erosão por cavitação do metal de solda depositado por um arame tubular tipo 13%Cr-4%Ni-0,4%Mo e do aço fundido ASTM A 743 CA-6NM. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2007.

BRACARENSE, A.Q;MARQUES, P.V; MODENESI, P.J.Soldagem Fundamentos e Tecnologia. 3 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2005. BAGGSTRÖM , G. New steel for turbine runners. Water Power, Dec. 1964. Apud VAZ, C. T. Avaliação da resistência à erosão por cavitação do metal de soldas produzidas com consumíveis tipo 13%Cr – 4%Ni – 0,4%Mo. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. 70p.

CHEN, M.-y.*et. al.* Interphase precipitation in vanadium-alloyed steels: Strengthening contribution and morphological variability with austenite to ferrite transformation. **Acta Materialia**, Itália, v. 64, n. 1, p. 78-92, fev. 2014.

CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 5 ed. ABM, São Paulo, 1977; 518p.

COLPAERT, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 4ed. Edgard Blucher, São Paulo, 2008. 652p.

ELETROBRAS. **Como a energia elétrica é gerada no Brasil**. Rio de Janeiro, 2012.

GENTIL,V. Corrosão.6ed. LTC, São Paulo,2011. 370p.

GONÇALVES, B. H. B. **Estudo Comparativo da resistência à erosão por cavitação do metal de solda depositado por um arame tubular tipo 13%Cr-4%Ni-0,4%Mo e do aço**

fundido ASTM A 743 CA-6NM. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2007.

SMITH, W. F. Structure and Properties do Engineering Alloys. 2. ed. Singapore: McGraw-Hill, 1993. Apud GRACIOSO, J.F; Efeito das Condições de Têmpera na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de um Aço Inoxidável Martensítico Fundido CA6NM. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. 129p.

VAZ, C. T. Avaliação da resistência à erosão por cavitação do metal de soldas produzidas com consumíveis tipo 13%Cr – 4%Ni – 0,4%Mo. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. 70p.

PUKASIEWICZ, A.G.M; HENKE, S.L; OKIMOTO, P.C; CAPRA, A.R; GOUVEIA, R.R. Efeito da temperatura interpasse na microestrutura, tenacidade ao impacto e propagação de trinca por fadiga de uniões soldadas por GTAW do aço ASTM A743-CA6NM. Soldagem e Inspeção, v. 18 n. 2, p. 127-136, Abril, 2012.

STRAUBE, H. Developments for additional improvement of low carbon martensitic Cr-Ni stainless steel. In: Conference of Materials in Turbo-Machinery Design. Cambridge: 1988.

SANTOS, T.E.S. Influência do tempo de revenimento sobre a microestrutura de metais de solda 13%Cr, 4%Ni e 0,4%Mo, Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2015. 52p.

RAMOS, R. A. V; SILVA, J. B. C. Máquinas Hidráulicas e Térmicas. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2009. 227p.