

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MARCUS MANIEZZO ANTONIAZZI

**ANÁLISE DO REVESTIMENTO DE 410NiMo DEPOSITADO PELO
PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA A ARCO ELÉTRICO CONTRA O
DESGASTE POR RISCAMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

MARCUS MANIEZZO ANTONIAZZI

**ANÁLISE DO REVESTIMENTO DE 410NiMo DEPOSITADO PELO
PROCESSO DE ASPERSÃO TÉRMICA A ARCO ELÉTRICO CONTRA O
DESGASTE POR RISCAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Émillyn
Ferreira Trevisani Olivio.

Coorientador: Prof. Dr. João Roberto
Sartori Moreno.

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Marcus Maniezzo Antoniazzi

Análise Do Revestimento De 410NiMo Depositado Pelo Processo De Aspersão Térmica A Arco Elétrico Contra O Desgaste Por Riscamento

Trabalho de conclusão de curso apresentado às **14h00** do dia **26/06/2018**, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico no programa de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dra. Émillyn Ferreira Trevisani Olívio (Orientadora)

Prof. PhD. João Roberto Sartori Moreno (Coorientador)

Prof. Dr. Celso Alves Correa (Membro)

Prof. PhD. João Roberto Sartori Moreno (Membro)

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

Dedico este trabalho aos meus pais Jonas e Silvia e aos meus irmãos Matheus e Mariana.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora Prof^a. Dr^a. Émillyn Ferreira Trevisani Olivio, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Aos meus colegas de sala Lucas, Pedro e Henrique pelo apoio ao longo da graduação.

A Secretaria do Curso de Engenharia Mecânica, pela cooperação.

Ao Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais (LABATS) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) e ao Laboratório de Soldagem do Departamento Acadêmico da Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

ANTONIAZZI, Marcus Maniezzo. **Análise Do Revestimento De 410NiMo Depositado Pelo Processo De Aspersão Térmica A Arco Elétrico Contra O Desgaste Por Riscamento.** 2018. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procopio, 2018.

O revestimento por soldagem ou por aspersão térmica pode ser utilizado para proteção de superfícies sujeitas ao desgaste, evitando assim redução da vida útil, substituição ou desgaste prematuro de equipamentos e sistemas. Aços inoxidáveis martensíticos são geralmente utilizados em aplicações que exigem boas propriedades mecânicas e resistência ao desgaste, como acontece com rotores de turbinas hidrelétricas. O processo de soldagem em aços inoxidáveis é um pouco mais crítico, portanto o processo de aspersão térmica é mais adequado para produzir revestimentos nesse tipo de material. Isso se deve à menor perda de tenacidade das estruturas martensíticas. Foi depositado pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico, o aço inoxidável martensítico 410NiMo em forma de arame maciço no substrato do aço inoxidável martensítico CA6NM. Os ensaios de microdureza Vickers e desgaste abrasivo por riscamento, foram feitos no corpo de prova, a fim de se avaliar a camada de revestimento.

Palavras-chave: Aspersão Térmica. Aço CA6NM. Aço 410NiMo. Desgaste Abrasivo por Riscamento.

ABSTRACT

ANTONIAZZI, Marcus Maniezzo. **410NiMo Coating Analysis Deposited by Thermal Spray Process to Electric Arc Against Scratch Wear.** 2018. 36 f. Undergraduate Thesis (Graduation) – Mechanical Engineering. Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

Welding or thermal spray coating can be used to protect surfaces subject to wear, thus avoiding a reduction in the service life, replacement or premature wear of equipment and systems. Martensitic stainless steels are generally used in applications that require good mechanical properties and wear resistance, as with hydroelectric turbine rotors. The welding process in stainless steels is somewhat more critical, so the thermal spray coating process is more suitable for producing coatings in this type of material. This is due to the lower tenacity loss of the martensitic structures. It was deposited by the electric arc thermal spray coating, the 410NiMo martensitic stainless steel in the form of a solid wire on the substrate of the martensitic stainless steel CA6NM. The Vickers microhardness tests and scratch abrasive wear were done on the specimen in order to evaluate the coating layer.

Keywords: Thermal Spray. CA6NM Stainless Steel. 410NiMo Stainless Steel. Abrasive Wear by Scratching.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Elementos da unidade geradora.	11
Figura 2 – Elementos da unidade geradora.	11
Figura 3 – Esquema de aplicação do processo de aspersão térmica.	15
Figura 4 – Aspectos básicos dos revestimentos termicamente aspergidos.	16
Figura 5 – Revestimento por Aspersão Térmica a Arco Elétrico.	17
Figura 6 – Esquema do desgaste a dois corpos (a) e a três corpos (b).	19
Figura 7 – Cabine de jateamento (LABATS).	22
Figura 8 – Corpo de prova revestido por aspersão térmica antes do ensaio de desgaste por riscamento.	23
Figura 9 – Equipamento de aspersão térmica a arco elétrico.	24
Figura 10 – Microdurômetro PANATEC ATMI HV-1000B.	25
Figura 11 – Máquina de ensaio de desgaste abrasivo por riscamento.	26
Figura 12 – Haste e pesos utilizados no ensaio de riscamento.	26
Figura 13 – Microscopia ótica da amostra com aumento de 20x (a) e 50x (b).	29
Figura 14 – Desenho esquemático do ensaio de microdureza Vickers.	29
Figura 15 – Microdureza da seção vertical da amostra aspergida.	30
Figura 16 – Corpo de prova após o ensaio de desgaste por riscamento.	31
Figura 17 – Resultado do ensaio de desgaste por riscamento (Massa da amostra x massa da carga aplicada).	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Processos de aspersão térmica de acordo com a fonte de calor utilizada.	15
Tabela 2 – Temperaturas das fontes de calor.	16
Tabela 3 – Propriedades mecânicas mínimas requeridas pela norma ASTM A743.	20
Tabela 4 – Composição química do aço inoxidável martensítico CA6NM.	21
Tabela 5 – Composição química do metal de deposição de alta liga 410NiMo.	21
Tabela 6 – Parâmetros empregados no jateamento abrasivo.	22
Tabela 7 – Dimensões do corpo de prova revestido por aspersão térmica.	23
Tabela 8 – Parâmetros de deposição no processo a arco elétrico.	24
Tabela 9 – Média das medições de rugosidade do substrato.	28
Tabela 10 – Média das microdurezas na seção vertical das amostras aspergidas.	30
Tabela 11 – Resultados do ensaio de desgaste por riscamento.	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivos Específicos	12
1.2	JUSTIFICATIVAS	13
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	ASPERSÃO TÉRMICA.....	15
2.1.1	Aspersão Térmica a Arco Elétrico	17
2.2	DESGASTE	17
2.2.1	Desgaste Abrasivo Por Riscamento	18
2.3	LIGA CA6NM.....	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1	MATERIAIS	21
3.1.1	Material de Base (CA6NM).....	21
3.1.2	Material de Adição (410NiMo)	21
3.2	MÉTODOS	22
3.2.1	Preparação do Corpos de Prova e Identificação da Amostra	22
3.2.2	Deposições.....	23
3.2.3	Equipamento de Aspersão Térmica a Arco Elétrico	23
3.2.4	Microscopia Ótica	24
3.2.5	Microdureza Vickers	25
3.2.6	Ensaio de Riscamento.....	25
4	ANÁLISE E ENSAIOS	28
4.1	MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DO SUBSTRATO.....	28
4.2	ANÁLISE VIA MICROSCOPIA ÓTICA DO REVESTIMENTO.....	28
4.3	ANÁLISE DE MICRODUREZA VICKERS DO REVESTIMENTO.....	29
4.4	ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO POR RISCAMENTO.....	30
5	CONCLUSÃO	33
5.1	RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	33
	REFERÊNCIAS.....	34

1 INTRODUÇÃO

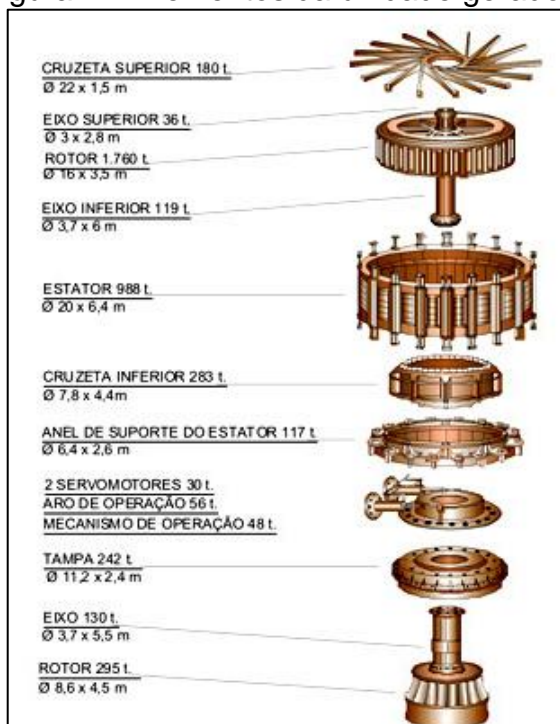
A abundância de recursos hídricos e as diversas vantagens da geração de energia elétrica através de hidrelétricas, fez com que este se tornasse o método de geração mais praticado no país, com 80% da sua energia elétrica proveniente de grandes represas (INTERNATIONAL RIVERS, 2018).

No Brasil, cerca de 94% da capacidade total instalada de geração de energia elétrica, vem de fontes com baixa emissão de gases de efeito estufa, segundo a Eletrobras – Centrais Elétricas Brasileiras S.A., maior companhia do setor elétrico da América Latina (ELETROBRAS, 2018).

É possível notar que a energia elétrica gerada a partir dos recursos hídricos no Brasil é de grande importância para a economia, assim como para a necessidade de suprir a demanda energética nacional e paradas inesperadas dessas usinas podem ser catastróficas, resultando em prejuízos onerosos a nível nacional, como por exemplo o prejuízo de R\$ 20 bilhões devido à crise energética em 2015 (AMORA; BORBA, 2015).

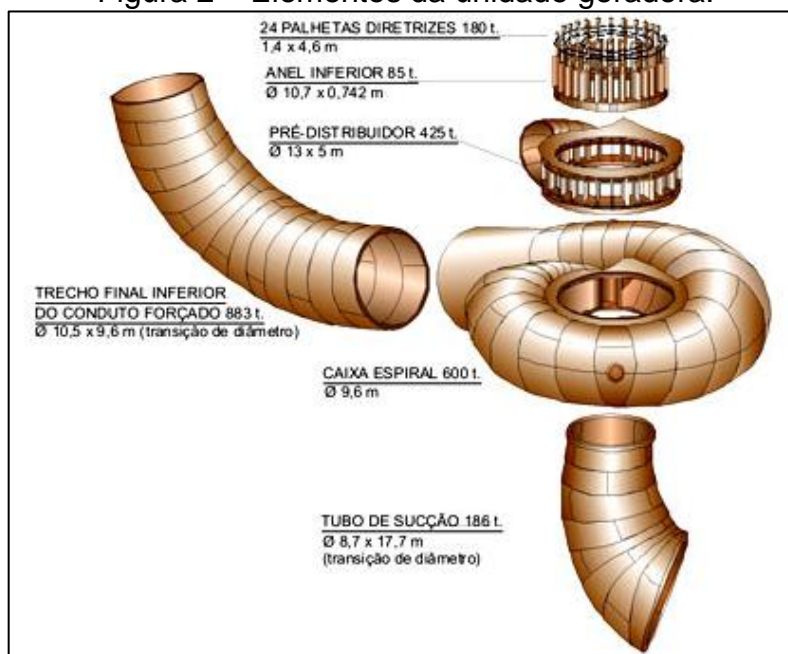
A unidade geradora, que é composta por um gerador, uma turbina e seus equipamentos auxiliares; transforma a energia hidráulica em energia mecânica no momento em que a água passa pela turbina e, posteriormente, o gerador conectado à turbina transforma a energia mecânica em energia elétrica. A Figura 1 e a Figura 2, disponibilizadas no site oficial da Itaipu Binacional, mostram a composição das unidades geradoras:

Figura 1 – Elementos da unidade geradora.



Fonte: ITAIPU, 2017.

Figura 2 – Elementos da unidade geradora.



Fonte: ITAIPU, 2017.

Um dos problemas característicos de turbinas hidráulicas é a desgaste. Durante o seu funcionamento, o equipamento sofre desgaste natural devido à abrasão ou corrosão, devido ao escoamento do fluido (HIDROENERGIA, 2018).

Portanto, a escolha do material nesses casos deve ser mais criteriosa, tendo em vista essas exigências de projeto mais rigorosas (HIDROENERGIA, 2018). O material mais comumente utilizado para fabricação de rotores é o aço CA6NM que é classificado pela ASTM como aço inoxidável martensítico macio (ALLENSTEIN, 2007). Esse aço apresenta propriedades mecânicas favoráveis para essa aplicação, tais como elevada resistência à corrosão, cavitação e propagação de trincas, assim como dureza e soldabilidade melhoradas devido à adição de níquel e baixo teor de carbono (PEREIRA et al., 2001).

Portanto, o principal objetivo a ser alcançado nesse projeto é o estudo dos efeitos de desgaste por riscamento no aço CA6NM revestido com 410NiMo depositado por aspersão térmica a arco elétrico, visando a recuperação superficial do material de base e recuperação de peças desgastadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo principal neste trabalho é o estudo dos efeitos de desgaste por riscamento no revestimento de 410NiMo, depositados pelo processo de aspersão térmica no metal de base CA6NM; com intuito de melhorar a resistência ao riscamento do revestimento aspergido e a recuperação de peças desgastadas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados como meios para se atingir o objetivo geral. São eles:

- Estudar os conceitos envolvidos a fim de se conhecer seus fundamentos, para assim, ser capaz de analisar os resultados;
- Apresentar uma revisão bibliográfica dos conhecimentos envolvidos;
- Buscar por pesquisas semelhantes para fins de comparação dos resultados;

- Estabelecer parâmetros e condições de contorno a partir de resultados de trabalhos anteriores, para se obter melhores resultados após a realização deste trabalho;
- Produzir o corpo de prova e identificá-lo;
- Revestir o corpo de prova através do processo de revestimento por aspersão térmica;
- Submeter a amostra revestida à diferentes ensaios destrutivos e não-destrutivos, previamente estabelecidos;
- Analisar os resultados obtidos e listar conclusões.

1.2 JUSTIFICATIVAS

O estudo de novos materiais, métodos e processos tem importante papel na indústria em geral. Através desses estudos, processos produtivos inteiros podem se tornar mais eficientes, devido às características aprimoradas de componentes fundamentais.

Em alguns casos, o revestimento dos componentes é tão importante quanto o material do que é feito. O revestimento é geralmente utilizado para prevenir desgaste prematuro, aumentando a vida útil e sua eficiência, resultando em gastos menores com manutenção, substituição, tempo de máquina parada e todos os outros custos que não agregam valor ao processo e/ou produto, mas também é importante para a recuperação superficial do metal de base. O impacto financeiro resultante é muito grande, viabilizando novas pesquisas na área.

Portanto, esse trabalho tem como objetivo analisar os efeitos de desgaste por riscamento no material de adição 410NiMo aspergido no aço inoxidável cromo martensítico macio CA6NM, buscando a recuperação superficial.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será dividido basicamente em três partes: revisão bibliográfica, processos e ensaios mecânicos e análise dos resultados.

A primeira parte será baseada na pesquisa por fundamentações teóricas acerca dos assuntos pertinentes à esse trabalho, assim como a busca por pesquisas e trabalhos semelhantes. Essa parte tem fundamental importância, pois através do conhecimento pleno sobre o assunto, a análise dos resultados obtidos, assim como possíveis oportunidades de melhora, serão mais bem aproveitados.

A segunda parte envolve as partes práticas do trabalho, tais como os processos de fabricação e deposição dos corpos de prova e suas devidas identificações, além dos ensaios mecânicos destrutivos e não-destrutivos realizados.

Na terceira parte, os resultados obtidos através da realização dos ensaios, serão analisados e será verificado se os objetivos foram cumpridos, quais as oportunidades de melhora para trabalhos futuros ou se foi inviabilizado.

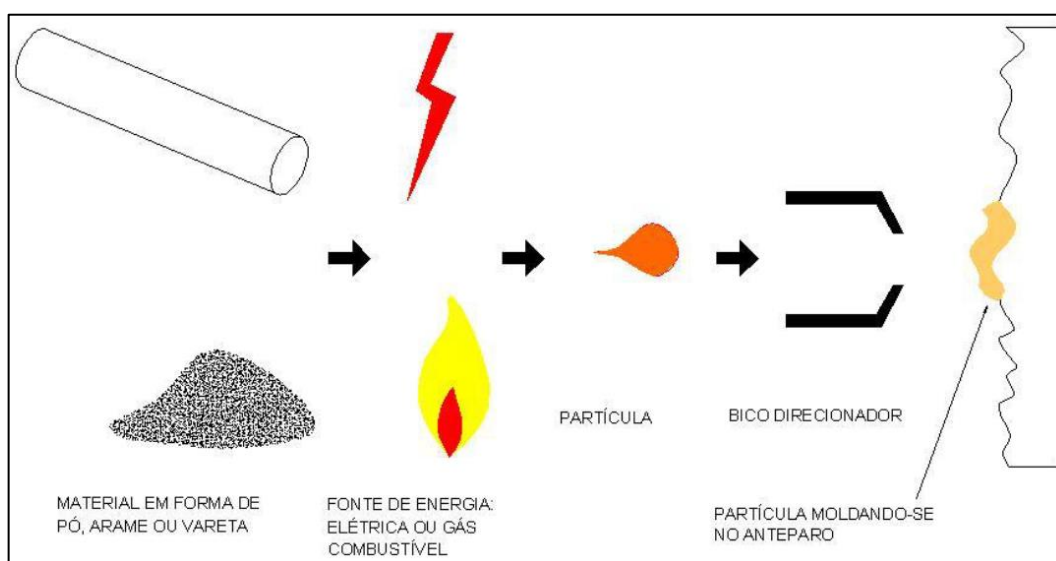
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPERSÃO TÉRMICA

O revestimento por aspersão térmica, também conhecida como metalização, pode ser definida como o grupo de processos nos quais partículas finamente divididas de materiais para revestimentos, metálicos ou não metálicos, são depositadas sobre um substrato devidamente preparado, para formar uma camada superficial (MARQUES, 2003).

A Figura 3 mostra o esquema de aplicação do processo de aspersão térmica:

Figura 3 – Esquema de aplicação do processo de aspersão térmica.



Fonte: MARQUES, 2003.

A Tabela 1 mostra os dois grupos básicos que classificam os processos de aspersão térmica, dependendo da fonte de calor utilizada, de acordo com Marques (2003):

Tabela 1 – Processos de aspersão térmica de acordo com a fonte de calor utilizada.

Combustão	Elétrico
Chama	Plasma
Detonação	Arco

Fonte: MARQUES, 2003.

Existe uma temperatura de operação inerente à cada fonte de calor no processo de revestimento por aspersão térmica, que são listadas na Tabela 2:

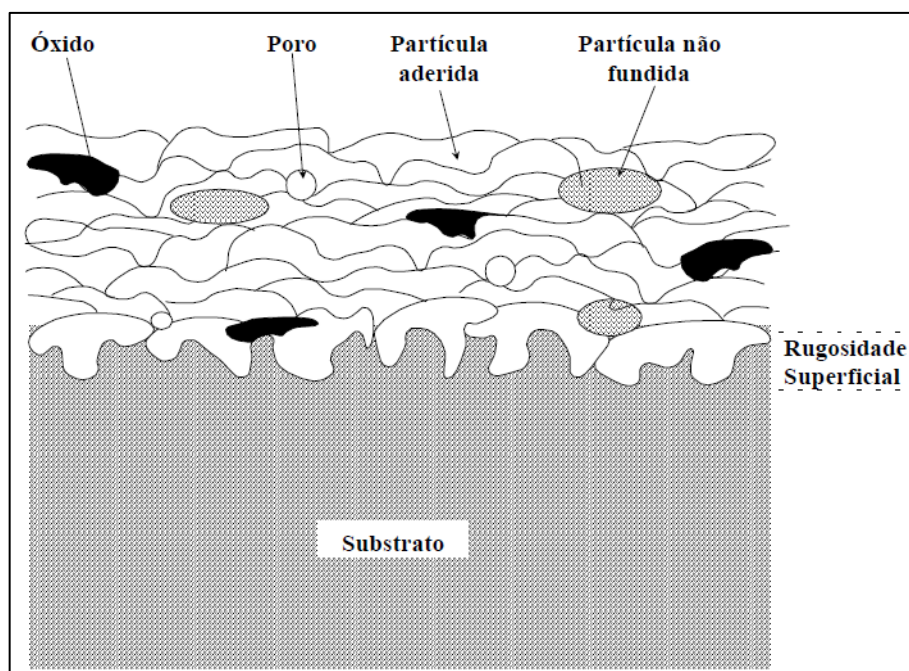
Tabela 2 – Temperaturas das fontes de calor.

Fonte	Temperatura [°C]
Propano + oxigênio	2640
Gás natural + oxigênio	2735
Hidrogênio + oxigênio	2690
Acetileno + oxigênio	3100
Arco e plasma	2200 - 8300

Fonte: MARQUES, 2003.

Os revestimentos termicamente aspergidos apresentam três aspectos básicos: substrato, adesão do revestimento e a estrutura deste (MARQUES, 2003). A Figura 4 mostra os aspectos básicos dos revestimentos termicamente aspergidos:

Figura 4 – Aspectos básicos dos revestimentos termicamente aspergidos.



Fonte: MARQUES, 2003.

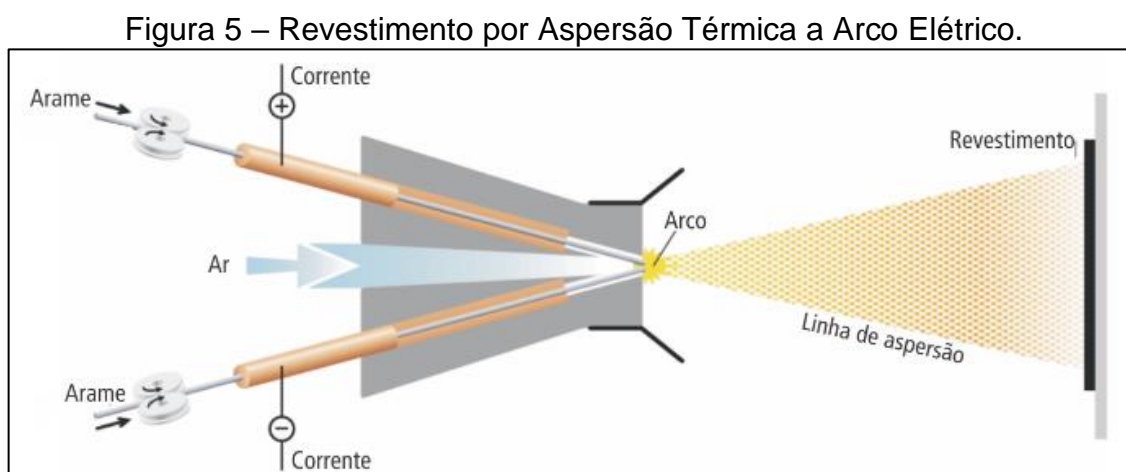
Marques (2003) afirma que nem todos os materiais para aspersão podem ser aplicados a qualquer tipo de material, exigindo uma preparação adequada feita anteriormente afim de se obter melhor adesão através da limpeza da superfície e obtenção de rugosidades. A adesão entre o revestimento e o substrato pode ser mecânica, química e/ou metalúrgica e é influenciada pela velocidade de impacto das

partículas, pela rugosidade, limpeza e temperatura da superfície, por exemplo. O autor ainda diz que a estrutura e a química do depósito aspergido em ar é diferente do material no estado original, devido à reação com gases durante o processo e à atmosfera em contato com o material enquanto líquido.

2.1.1 Aspersão Térmica a Arco Elétrico

O processo deaspersão térmica a arco elétrico utiliza eletrodos consumíveis em forma de arames (sólidos ou tubulares) que, através de uma diferença de potencial de 18 a 40 V, geram um arco elétrico que os funde, então um fluxo de ar que sai do bocal em volta dos eletrodos (geralmente ar comprimido) carrega as pequenas partículas fundidas até o substrato previamente preparado que se adere às imperfeições superficiais, formando uma camada protetora na superfície do material.

Um desenho esquemático do processo de revestimento poraspersão térmica elaborado pela Eutectic Castolin, é exemplificado na Figura 5:



2.2 DESGASTE

Nascimento e Baptista (Spectru, 2013) especificam desgaste como a perda progressiva de substância da superfície de um corpo sólido, causado por ação mecânica, isto é, por contato e movimento relativo de um contra-corpo sólido, líquido

ou gasoso. Portanto, o contato de um material com outro, seja este sólido, líquido ou gasoso, pode resultar na modificação de suas características como geometria da camada superficial, na microestrutura e assim, na sua capacidade de continuar exercendo sua função plenamente.

Existem diversos tipos de mecanismos de desgaste, os mais comuns são por:

- Adesão;
- Fadiga;
- Abrasão;
- Erosão;
- Fricção;
- Cavitação;
- Reação triboquímica.

O desgaste pode representar um custo acentuado para a indústria uma vez que pode resultar em gastos de substituição de peças, manutenção e paradas imprevistas de linhas de produção e recuperação de equipamentos devido à deterioração precoce do material, reduzindo a produtividade assim como as horas de operação (DORJI; GHOMASHCHI, 2014).

Neste trabalho, será abordado o estudo do desgaste por riscamento em um revestimento de 410NiMo depositado no aço martensítico macio CA6NM.

2.2.1 Desgaste Abrasivo Por Riscamento

Desgaste é definido por Behene (2014) e Souza (2011) como abrasivo, quando partículas duras e ásperas, ou uma superfície macia com partículas duras e que tenham dureza maior ou igual a da superfície de ataque desliza sobre a mesma formando sulcos.

O desgaste abrasivo pode se dar de duas formas (SOUZA, 2011):

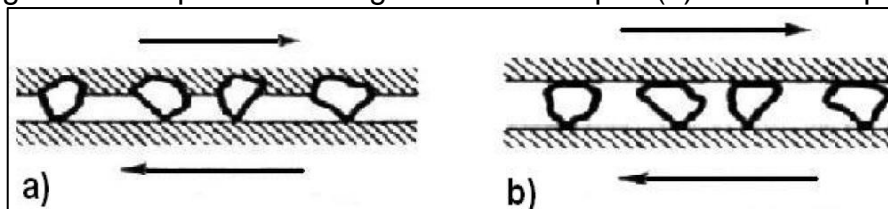
- desgaste abrasivo a dois corpos;
- desgaste abrasivo a três corpos.

Desgaste abrasivo a três corpos acontece quando partículas duras se encontram soltas entre dois corpos. Já o desgaste abrasivo a dois corpos ocorre

quando as partículas duras estão encrustadas em uma das superfícies, este segundo também pode ser chamado de desgaste abrasivo por riscamento (MARANHO, 2006).

A Figura 6 mostra os dois tipos de desgaste abrasivo:

Figura 6 – Esquema do desgaste a dois corpos (a) e a três corpos (b).



Fonte: MARANHO, 2006.

2.3 LIGA CA6NM

Desenvolvidos na Suíça, os aços inoxidáveis martensíticos macios CA6NM apresentam melhor soldabilidade quando comparados aos aços inoxidáveis martensíticos comuns como o CA-15, por exemplo. Essa liga específica, é classificada pela ASTM (American Society for Testing and Materials) como A743 grau CA-6NM, onde a letra C indica a sua resistência em meios corrosivos e a letra A, o valor nominal do teor de níquel. O número 6 indica a porcentagem máxima de carbono (%x100) e as duas últimas letras correspondem à primeira letra dos elementos de liga presentes no material, como Níquel (Ni) e Molibdênio (Mo) (ALLENSTEIN, 2007).

O alto teor de carbono nos aços inoxidáveis martensíticos comuns (0,15% C), fez com que sua utilização fosse diminuída devido à formação de trincas a quente e inclusões durante sua fabricação. O CA6NM por outro lado, apresenta menores teores de carbono e contam com a adição de níquel (Ni) e molibdênio (Mo) que reduzem a faixa de temperatura entre as linhas solidus e liquidus do diagrama de fases. Para o aço CA-15, essa faixa é de 110° C, já para o CA6NM essa faixa de temperatura é reduzida para 26° C, evitando defeitos causados durante o processo de solidificação do material em sua fabricação (ALLENSTEIN, 2007).

Allenstein (2007) afirma ainda que um dos principais fatores que motivaram o desenvolvimento desse tipo de liga foi a necessidade de se diminuir os defeitos causados durante a solidificação do material, como segregações e formação de trincas à quente e à frio, por exemplo, resultando em peças defeituosas com baixa

soldabilidade que prejudicavam tanto o reparo durante a manutenção, quanto durante a sua própria construção.

As propriedades mecânicas mínimas requeridas pela norma ASTM A743 são apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3 – Propriedades mecânicas mínimas requeridas pela norma ASTM A743.

Resistência à Tração (MPa)	Resistência ao Escoamento (MPa)	Alongamento em 50mm (%)	Redução em Área (%)
755	550	15	35

Fonte: ALLENSTEIN, 2007.

A melhora da ductilidade e a resistência ao impacto é obtida através da adição de níquel nas ligas cromo-ferro, assim como a resistência à corrosão e o melhor comportamento quanto à temperabilidade é obtida pela adição de molibdênio, segundo Allenstein (2007).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento de deposição por aspersão térmica nos corpos de prova, foram realizados no Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais (LABATS) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). O processo de análise do revestimento foi finalizado no Laboratório de Soldagem do Departamento Acadêmico da Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), câmpus Cornélio Procópio, onde foi feita a microdureza Vickers.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Material de Base (CA6NM)

O metal de base utilizado, o aço inoxidável martensítico ASTM A743 CA6NM, tem sua composição química detalhada na Tabela 4:

Tabela 4 – Composição química do aço inoxidável martensítico CA6NM.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0,03	0,30	0,45	0,02	0,003	13,0	3,7	0,34

Fonte: BEHENE (2014).

3.1.2 Material de Adição (410NiMo)

O material de adição utilizado é o arame maciço AWS ER410NiMo com diâmetro de 1,6 mm e alimentação automática, cuja tabela de composição química é mostrada na Tabela 5:

Tabela 5 – Composição química do metal de deposição de alta liga 410NiMo.

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
0,02	0,3	0,54	12,33	4,14	0,5	0,007	0,016

Fonte: PEREIRA, et. al, (2001).

3.2 MÉTODOS

Para atingir as dimensões de 80x55x12,5 mm, os corpos de prova foram cortados e retificados.

3.2.1 Preparação do Corpos de Prova e Identificação da Amostra

Segundo a Norma NACE RMN – 01/70, o corpo de prova deve ter rugosidade superficial de limpeza grau Sa3, necessário para aderência do revestimento, através do jateamento de abrasivo.

Para o jateamento, a cabine da marca CMV modelo 65 9075 (Figura 7) foi utilizada, de acordo com os parâmetros contidos na Tabela 6:

Figura 7 – Cabine de jateamento (LABATS).



Fonte: OLIVIO, 2016.

Tabela 6 – Parâmetros empregados no jateamento abrasivo.

Parâmetros	Valores utilizados
Abrasivo	Óxido de alumínio branco #30 mesh
Tipo de jato empregado	Jato por pressão
Gás de transporte do abrasivo	Ar comprimido
Pressão de jateamento	80 a 100 psi
Distância de jateamento	100 mm
Ângulo	90°

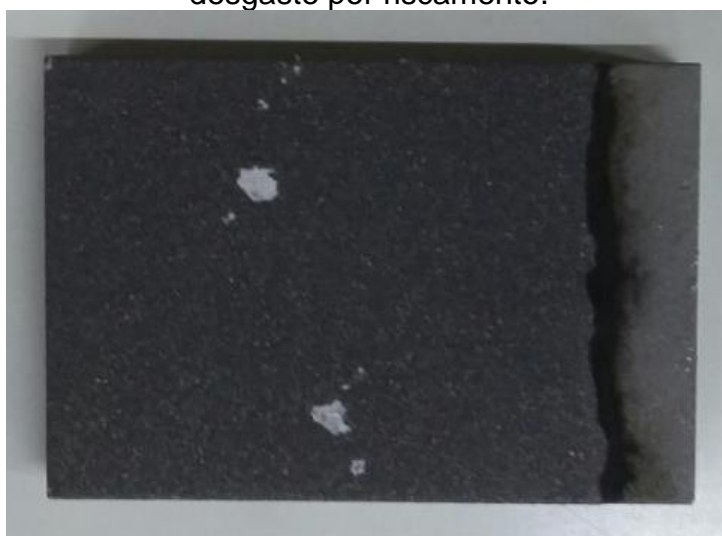
Fonte: OLIVIO, 2016.

3.2.2 Deposições

Foi feito o revestimento de 410NiMo no metal de base CA6NM, através do processo de deposição por aspersão térmica, utilizando arame maciço de 410NiMo de 1,6 mm.

A Figura 8 mostra o corpo de prova, já revestido:

Figura 8 – Corpo de prova revestido por aspersão térmica antes do ensaio de desgaste por riscamento.



Fonte: O autor, 2018.

As dimensões do corpo de prova já revestido, compõem a Tabela 7:

Tabela 7 – Dimensões do corpo de prova revestido por aspersão térmica.

	Dimensões [mm]
Altura	80,25
Largura	54,90
Espessura	12,95

Fonte: O autor, 2018.

3.2.3 Equipamento de Aspersão Térmica a Arco Elétrico

O equipamento mostrado na Figura 9, da marca Sulzer Metco Value Arc 300 E®, foi utilizado para revestir o corpo de prova, com a pistola Sulzer Metco Electric Arc Gun LCAG®, com ar comprimido como gás de arraste.

Figura 9 – Equipamento de aspersão térmica a arco elétrico.



Fonte: OLIVIO, 2016.

Os parâmetros utilizados no equipamento, que foram baseados na tese de OLIVIO (2016), são mostrados na Tabela 8:

Tabela 8 – Parâmetros de deposição no processo a arco elétrico.

Parâmetro	Valores utilizados
Corrente	130 A
Tensão	35 V
Pressão de gás de arraste	55 psi
Distância da pistola de aspersão	150 mm
Taxa de alimentação do arame	1,30 m/min

Fonte: OLIVIO, 2016.

3.2.4 Microscopia Ótica

O equipamento Olympus BX51, do Laboratório de Materiais e Superfícies (LAMATS) da UFPR, foi utilizado para capturar as imagens da análise de microscopia ótica. Esse equipamento é capaz de capturar imagens com ampliação de 200 a 1000 vezes, fazer medição de espessura do revestimento e quantificar poros.

3.2.5 Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers adotado, utiliza uma pirâmide de diamante de base quadrada com ângulo entre faces de 130 graus, onde a resistência que o material oferece é avaliada a partir da penetração dessa geometria na superfície.

As endentações foram feitas no sentido longitudinal, sem espaçamento pré-definido mas tomando cuidado para fazer as marcações em fases diferentes. A norma ASTM E384-05 foi consultada como orientação para a realização das endentações no perfil transversal.

O ensaio foi realizado na UTFPR, campus Cornélio Procópio, no microdurômetro da marca PANATEC ATMI, modelo HV-1000B, apresentado na Figura 10:

Figura 10 – Microdurômetro PANATEC ATMI HV-1000B.



Fonte: O autor, 2018.

3.2.6 Ensaio de Riscamento

Antes de realizar o ensaio de desgaste abrasivo por riscamento, o corpo de prova foi lavado com acetona na lavadora ultrassônica por cinco minutos. Em seguida, a amostra foi pesada em uma balança de precisão (precisão de 0,0001 g).

A máquina de riscamento encontra-se no LABATS (Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais) da UFPR e é mostrada na Figura 11.

Figura 11 – Máquina de ensaio de desgaste abrasivo por riscamento.



Fonte: O autor, 2018.

A haste e os pesos utilizados são mostrados na Figura 12:

Figura 12 – Haste e pesos utilizados no ensaio de riscamento.



Fonte: O autor, 2018.

O primeiro risco foi feito após o posicionamento do corpo de prova no equipamento de ensaio por riscamento, somente com o peso da haste. Em seguida, o corpo de prova foi retirado do equipamento e pesado na balança de precisão, logo após realizar uma nova lavagem da amostra na lavadora ultrassônica, como feito anteriormente.

Após a anotação da nova massa do corpo de prova, depois da realização da primeira ranhura, a amostra é submetida à um segundo risco, como feito na primeira ranhura, porém com uma massa de 1007,38 g adicionadas à haste. A pesagem foi realizada novamente, depois de lavar a amostra da mesma forma.

A terceira ranhura foi feita da mesma forma, porém uma massa de 5034,08 g foi adicionada à haste e, logo em seguida, a amostra foi lavada e pesada. A quarta, e última, ranhura foi realizada com a adição de uma massa de 6039,33 g à haste.

4 ANÁLISE E ENSAIOS

Os corpos de provas foram submetidos aos ensaios destrutivos e não-destrutivos, tais como microscopia ótica, ensaio de microdureza e o próprio ensaio de riscamento.

Os métodos utilizados para cada ensaio e seus resultados, são mostrados nas seções seguintes.

4.1 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE DO SUBSTRATO

A Tabela 9 mostra a média das 10 medições feitas após o processo de jateamento:

Tabela 9 – Média das medições de rugosidade do substrato.

Amostra	Média de Rugosidade Ra (μm)
Corpo de prova aspergido	5,33

Fonte: O autor, 2018.

Utilizando abrasivo de óxido de alumínio branco com #30 mesh, a média da rugosidade são comparáveis com a literatura (TERRES, 2006), que mostra uma faixa de rugosidade Ra entre 4,99 e 8,59 μm .

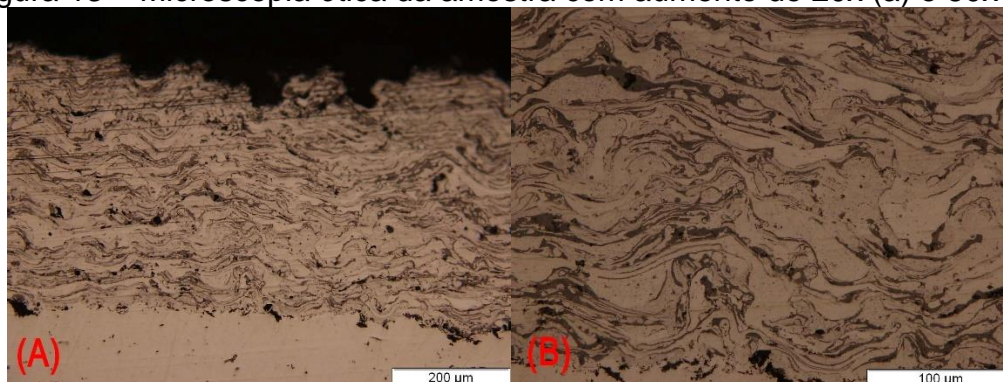
É importante garantir amostras estaticamente iguais para proporcionar maior confiabilidade na avaliação dos resultados das medições de aderência. Isso é obtido através dos dados de rugosidade dos substratos.

4.2 ANÁLISE VIA MICROSCOPIA ÓTICA DO REVESTIMENTO

O revestimento obtido é bastante homogêneo, com lamelas bem definidas com poucos e pequenos poros e inclusão de óxidos. É possível de se verificar as fases metálicas e os óxidos interlamelares.

A Figura 13 mostra a imagem capturada pelo microscópio com aumento de 20 vezes (a) e 50 vezes (b), respectivamente:

Figura 13 – Microscopia ótica da amostra com aumento de 20x (a) e 50x (b).

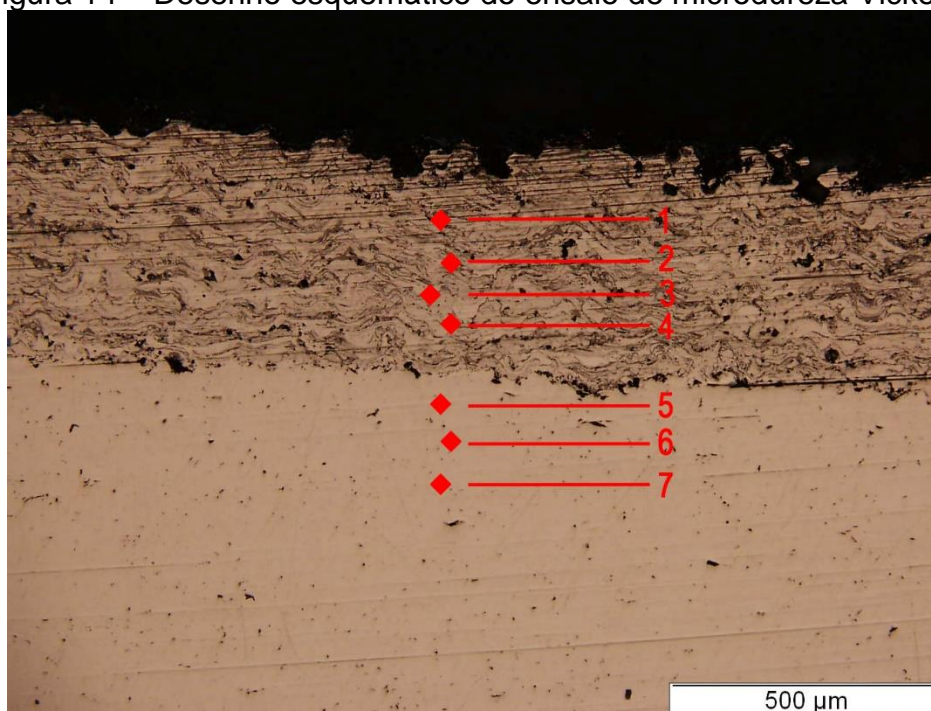


Fonte: O autor, 2018.

4.3 ANÁLISE DE MICRODUREZA VICKERS DO REVESTIMENTO

Foram feitas oito medidas de microdureza Vickers na seção transversal no revestimento aspergido, como na tese de OLIVIO (2016) e a Figura 14 mostra um desenho esquemático do ensaio:

Figura 14 – Desenho esquemático do ensaio de microdureza Vickers.



Fonte: O autor, 2018.

As medidas de dureza foram realizadas, aproximadamente no meio da espessura do revestimento, na seção vertical, como mostra a Tabela 10:

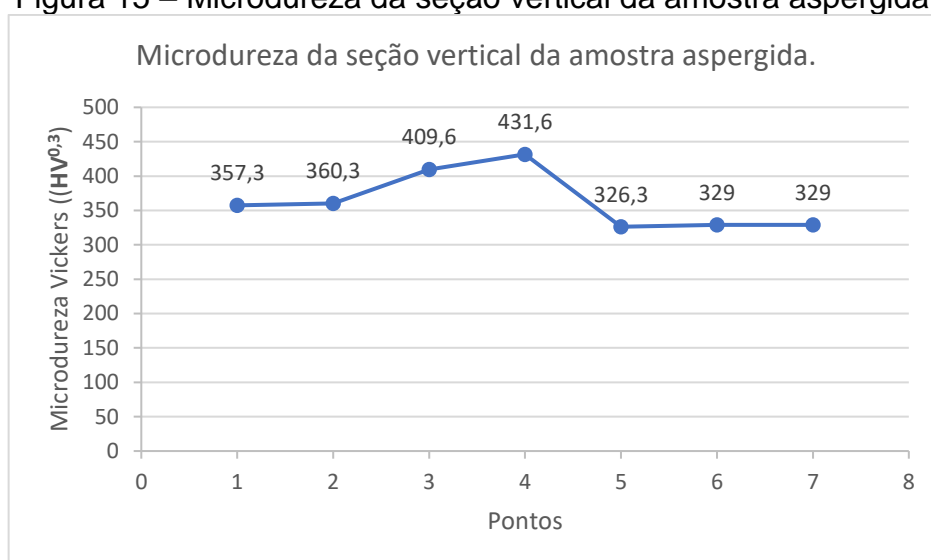
Tabela 10 – Média das microdurezas na seção vertical das amostras aspergidas.

Pontos	Medições (HV ^{0,3})
1	357,3
2	360,3
3	409,6
4	431,6
5	326,3
6	329
7	329
Média	363,3
Desvio Padrão	41,9

Fonte: O autor, 2018.

A Figura 15, mostra os valores de microdureza obtidos para a amostra aspergida:

Figura 15 – Microdureza da seção vertical da amostra aspergida.



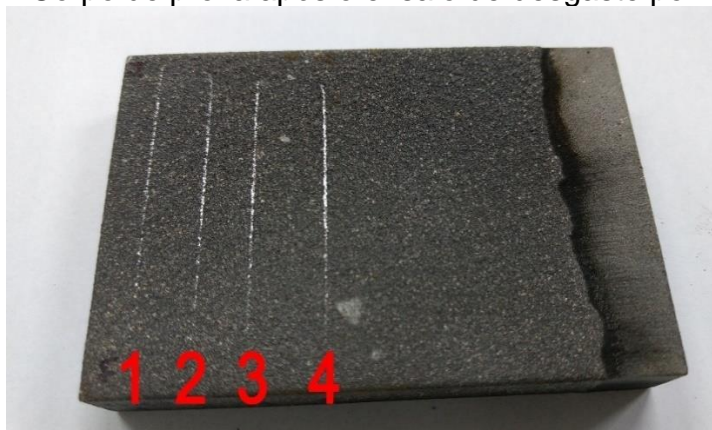
Fonte: O autor, 2018.

O revestimento produzido pela aspersão térmica a arco elétrico apresentou lamelas bem definidas, típicas do processo, ao mesmo tempo em que apresenta durezas maiores que o metal de base CA6NM.

4.4 ENSAIO DE DESGASTE ABRASIVO POR RISCAMENTO

A Figura 16, mostra o corpo de prova após o ensaio de desgaste abrasivo por riscamento:

Figura 16 – Corpo de prova após o ensaio de desgaste por riscamento.



Fonte: O autor, 2018.

Os resultados do ensaio de desgaste por riscamento, estão contidos na Tabela 11:

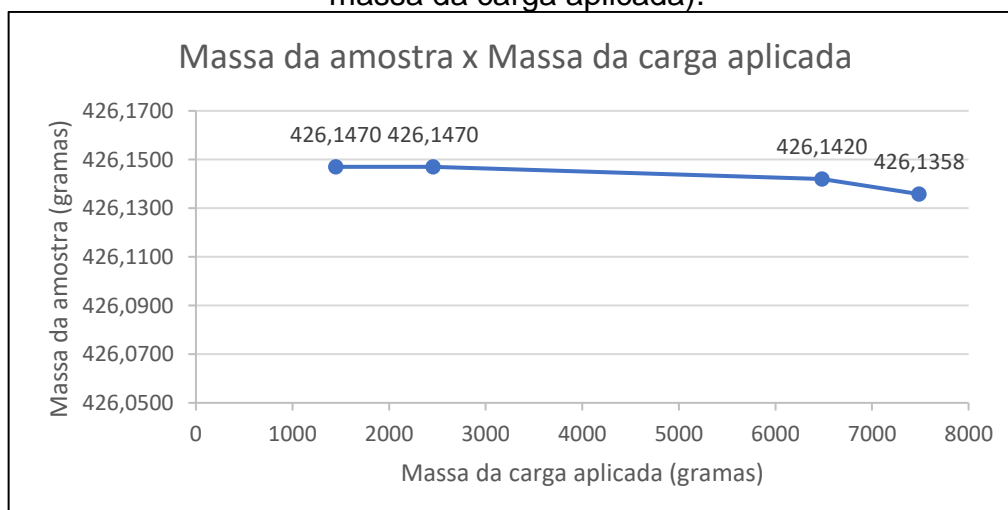
Tabela 11 – Resultados do ensaio de desgaste por riscamento.

Condição	Peso (gramas)
Peso inicial da amostra	426,1470
1 – Carga: Haste (1448,46 g)	426,1470
2 – Carga: Haste + 1007,38 g	426,1470
3 – Carga: Haste + 5034,08 g	426,1420
4 – Carga: Haste + 6039,33 g	426,1358
Perda total de massa	0,0112

Fonte: O autor, 2018.

A Figura 17 mostra os resultados do ensaio de desgaste por riscamento:

Figura 17 – Resultado do ensaio de desgaste por riscamento (Massa da amostra x massa da carga aplicada).



Fonte: O autor, 2018.

A perda total de massa verificada após o ensaio de desgaste por riscamento, foi de apenas 0,0112 gramas, o que indica que o revestimento é capaz de resistir ao desgaste abrasivo e, portanto, adequado para aplicação.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos a partir do ensaio de microdureza Vickers e de desgaste abrasivo por riscamento, assim como a análise via microscopia ótica, pode-se concluir que:

O revestimento realizado através do processo de aspersão térmica a arco elétrico, apresenta microdureza média de 363,3 HV, superior ao do material de base e suficiente para resistir aos efeitos do desgaste abrasivo.

A microscopia ótica mostrou que o revestimento obtido é bastante homogêneo, com lamelas bem definidas com poucos e pequenos poros e inclusão de óxidos.

A baixa perda de massa, da ordem de 0,0112 gramas, comprovada através do ensaio de desgaste abrasivo por riscamento, confirma a efetiva capacidade do revestimento de proteger o metal de base contra os efeitos do desgaste abrasivo.

Os resultados satisfatórios do estudo proposto mostram que o revestimento pode ser aplicado na proteção de metais de base contra os efeitos do desgaste abrasivo, assim como na recuperação de superfícies desgastadas.

5.1 RECOMENDAÇÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Outros efeitos de desgaste podem ser estudados no revestimento de 410NiMo depositado pelo processo de aspersão térmica a arco elétrico, como por exemplo os efeitos do desgaste por erosão de cavitação, o que pode ser classificado como recomendação para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

ALLENSTEIN, A. N. **Estudo da Resistência à Cavitação do Aço Inoxidável Martensítico CA6-NM Nitretado por Plasma**. Acesso em 07 de outubro de 2017. Disponível em <<http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/136.pdf>>

AMORA, D.; BORBA, J. Estatais federais culpam Dilma por prejuízo das hidrelétricas. **Folha de São Paulo**, Brasília, 30 set. 2015. Acesso em 07 de outubro de 2017. Disponível em <<https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2015/09/1688188-estatais-federais-culpam-dilma-por-prejuizo-das-hidreletricas.shtml>>

BEHENE, L. **Estudo da alteração de parâmetros do processo de soldagem plasma com alimentação de vareta em substrato de aço ASTM 743 tipo CA6NM**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

BUZANELLI, A. C. **Análise do revestimento de 410NiMo depositado por aspersão térmica a chama arame**. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

COSTA, L. **Hidrelétricas do Rio Doce podem ficar meses paradas após rompimento de barragem**. O GLOBO, São Paulo, 20 nov. 2015. Acesso em 07 de outubro de 2017. Disponível em <<https://oglobo.globo.com/brasil/hidreletricas-do-rio-doce-podem-ficar-meses-paradas-apos-rompimento-de-barragem-18100774>>

CUNHA, H. M.; **CARACTERIZAÇÃO DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇOS CARBONO E AÇOS INOXIDÁVEIS UTILIZANDO ARAME AWS E309L T1-1**. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2016.

DORJI, U.; GHOMASHCHI, R. **Hydro turbine failure mechanisms: an overview**. Engineering Failure Analysis, Kidlington, 2014.

ELETROBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Geração de energia**. Acesso em 07 de outubro de 2017. Disponível em <<http://eletrobras.com/pt/Paginas/Geracao-de-Energia.aspx>>

ELETROBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Sobre a Eletrobras**. Acesso em 07 de outubro de 2017. Disponível em <<http://eletrobras.com/pt/Paginas/Sobre-a-Eletrobras.aspx>>

EUTECTIC CASTOLIN – Eutectic do Brasil. **EuTronic Arc Spray 4**: Equipamento de metalização (Aspersão Térmica) de alta produtividade pelo processo Arc Spray. Acesso em 07 de outubro de 2017. Disponível em <<http://www.eutectic.com.br/metalizacao-aspersao-termica-eutronic-arc-spray.html>>

EUTECTIC CASTOLIN – Eutectic do Brasil. **Metalização (Aspersão Térmica)**: Sistemas modernos de Metalização (Aspersão Térmica) a chama, a arco elétrico e plasma de arco transferido, para aplicações em Produção e Manutenção. Acesso em 07 de outubro de 2017. Disponível em <<http://www.eutectic.com.br/metalizacao-aspersao-termica.html>>

HIDROENERGIA ENGENHARIA E AUTOMAÇÃO LTDA. **TURBINAS HIDRÁULICAS**. Acesso em 07 de outubro de 2017. Disponível em <<http://www.hidroenergia.com.br/produtos/turbinas/>>

INTERNATIONAL RIVERS. **Hidrelétricas no Brasil**. Acesso em 07 de outubro de 2017. Disponível em <<https://www.internationalrivers.org/pt-br/campaigns/hidrel%C3%A9tricas-no-brasil>>

ITAIPU BINACIONAL. **Unidades Geradoras**. Acesso em 07 de outubro de 2017. Disponível em <<https://www.itaipu.gov.br/energia/unidades-geradoras>>

MARANHO, O. **Aspersão Térmica de Ferro Fundido Branco Multicomponente**. Dissertação de Doutorado. Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2006.

MARQUES, P. V. **Aspersão Térmica**. Acesso em 07 de outubro de 2017. Disponível em <<http://www.infosolda.com.br/artigos/processos-de-soldagem/231-aspersao-termica.html>>

NASCIMENTO, I. A.; BAPTISTA, A. L. B. **Desgaste**. Acesso em 07 de outubro de 2017. Disponível em <<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/desgaste.pdf>>

OLIVIO, E. F. T. **Análise do Revestimento de 410NiMo Depositado por Aspersão Térmica no Aço Inoxidável Martensítico CA6NM contra a Erosão por Cavitação**. Tese de doutorado. 2016.

PEREIRA, S. A.; BUSCHINELLI, A. J. A.; NIÑO, C. A.; HENKE, S. L.; **Estudo Comparativo do Reparo por Soldagem dos aços Inoxidáveis Martensíticos AISI 410 NiMo e CA6NM**. : I Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação - COBEF, Curitiba, 2001. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2001.

SOUZA, C. J.; **Desgaste Abrasivo em Compósitos Metal/Cerâmicos: Estudo Aplicado ao Desenvolvimento de Coroas de Perfuração**. Dissertação de Mestrado. Rede Temática Em Engenharia De Materiais, Ouro Preto, 2011

TERRES, C. J. F.; **Avaliação De Revestimentos de Aços Inoxidáveis Depositados por Aspersão Térmica**. Curitiba. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2006.