

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

PAULO SÉRGIO LIMA BAZALIA

**CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTO DURO POR ASPERSÃO TÉRMICA
CHAMA A PÓ UTILIZANDO LIGA STELLITE 6 COM ADIÇÃO DE ALUMINA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017

PAULO SÉRGIO LIMA BAZALIA

**CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTO DURO POR ASPERSÃO TÉRMICA
CHAMA A PÓ UTILIZANDO LIGA STELLITE 6 COM ADIÇÃO DE ALUMINA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado ao Curso Superior de Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR do Campus de Cornélio Procópio, como requisito parcial para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Me. Émillyn Ferreira Trevisani Olivio

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017



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



TERMO DE APROVAÇÃO

CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTO DURO POR ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA A PÓ
UTILIZANDO A LIGA STELLITE 6 COM ADIÇÃO DE ALUMINA

POR

PAULO SÉRGIO LIMA BAZALIA

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado às 10:20 h do dia 14 de Junho de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de ENGENHEIRO MECÂNICO, linha de pesquisa – Processo de fabricação e materiais, 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. Me. Émillyn Ferreira Trevisani Olivio - Presidente (UTFPR)

Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno (UTFPR)

Prof. Me. Celso Alves Correa (UTFPR)

“A Folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação de Curso.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me iluminado, me dado saúde, força, inteligência e todas as graças que foram fundamentais não apenas durante o curso, mas em toda a minha vida.

À minha orientadora, Prof. Me. Émillyn Ferreira Trevisani Olivio, pela confiança e paciência em mim dedicada, pelo empenho em realizar os revestimentos, ensaios e análises na UFPR de Curitiba. Pelos atendimentos e conselhos para realização do trabalho.

À banca, Prof. Dr. João Roberto Sartori Moreno e Prof. Me. Celso Alves Correa, pelo tempo reservado para este trabalho.

Ao aluno de mestrado, Eduardo Ferracin, pela ajuda e esclarecimento de dúvidas.

Ao meu pai Sérgio e à minha mãe Regina, pelos seus esforços em me dar a melhor educação escolar e pessoal.

Aos meus pais, Sérgio e Regina, aos meus irmãos, Paulo Henrique e Beatriz, e a toda minha família pelo apoio em minhas decisões no período de graduação.

A todos meus amigos de graduação, pelo apoio, pela ajuda, pela amizade construída nesses anos de graduação, por serem minha segunda família.

Aos meus amigos Leonardo, Gustavo e Bruno por estarem presentes na minha vida acadêmica do começo ao fim.

À Giovanna por ter me ajudado com o *abstract*.

Aos meus amigos de infância, que sempre estiveram à disposição para conversar e dar conselhos.

A todos professores e colaboradores da UTFPR presentes nesse período de graduação.

“A vida é muito maior do que
a razão finita dos homens”
(Augusto Rodrigues)

RESUMO

LIMA BAZALIA, Paulo Sérgio. **CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTO DURO POR ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA A PÓ UTILIZANDO LIGA STELLITE 6 COM ADIÇÃO DE ALUMINA**. 2017. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

O processo de revestimento é de grande importância para o setor industrial, visto que ele prolonga a vida útil de componentes que se danificam ou se desgastam com o uso. Dessa forma consegue-se redução de custos, pois não haverá substituição de componentes, paralização de maquinário, mão de obra para manutenção. Este trabalho visa analisar os resultados do revestimento realizado com o processo de aspersão térmica à combustão chama a pó. O material de adição é em forma de pó: uma homogeneização da liga à base de cobalto, Stellite 6, e alumina. São quatro as misturas: 1%, 2%, 4% e 8% de alumina homogeneizada, as quais revestem o substrato aço SAE 1020. As análises e ensaios presentes são: ensaio de dobramento, análise via microscopia óptica, ensaios de microdureza Vickers e ensaio de desgaste por riscamento. Concluiu-se que a adição de alumina na liga Stellite 6, contribui para melhorar as propriedades mecânicas do revestimento. Para o desgaste, que é a característica principal estudada, a mistura Stellite 6 com teor de 8% de alumina foi a que demonstrou melhores resultados.

Palavras-chaves: Aspersão térmica. Chama a pó. Stellite 6. Alumina. Desgaste.

ABSTRACT

LIMA BAZALIA, Paulo Sérgio. **CHARACTERIZATION OF HARDCOATING BY FLAME POWDER SPRAY COATING USING LIGA STELLITE 6 WITH ALUMINUM ADDITION**. 2017. 49 f. End-of-Course work (Bachelor of Engineering) - Federal Technology University of Parana. Cornélio Procópio, 2017.

The coating process is extremely important to industry because it extends the life of components that can be damaged or wear out due to continuous use. Hence, the total costs are reduced, once it is not required to replace parts or to stop the machines for maintenance. This work aims to test and analyze the results for the coating produced by flame powder spray coating process. The addition material is a mixture powder composed by a cobalt based alloy, Stellite 6 and alumina. Four different concentrations of alumina were used to compose the mixture: 1%, 2%, 4% and 8%. The substrate to be coated is the SAE 1020 steel. The tests and analysis presented are: folding test, optical microscopy analysis, microhardness Vickers test and wear analysis by scratch test. The obtained results showed that the addition of alumina in Stellite 6 mixture enhances the coating's mechanical properties. In relation to the wear resistance of the coating, which is the most important property in this study, the Stellite 6 mixture added with 8% of alumina presented the best results.

Keywords: Flame powder spray. Stellite 6. Alumina. Wear resistance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fixação do revestimento.	14
Figura 2 – a) revestimento por pó; b) revestimento por arame.....	16
Figura 3 - Ensaio de dois e três corpos, respectivamente.....	18
Figura 4 – a) ensaio de riscamento; b) ensaio de rolamento.	18
Figura 5 - Alumina.	20
Figura 6 - Jateamento abrasivo da UFPR Curitiba.....	22
Figura 7 - Metal de base.....	23
Figura 8 - Mistura com 1%, 2%, 4% e 8% de alumina, respectivamente.	24
Figura 9 - Processo de aspersão térmica chama a pó.	25
Figura 10 - Ensaio de dobramento.	26
Figura 11 - Resultados dos testes de dobramento.....	27
Figura 12 - Ensaio de Microdureza Vickers.....	28
Figura 13 - a) durômetro; b) medida de microdureza Vickers.	29
Figura 14 - Máquina de riscamento.....	30
Figura 15 - Lavadora ultrassônico.	30
Figura 16 - Haste do ensaio do riscamento.....	31
Figura 17 - Revestimento com 1% de alumina.....	32
Figura 18 - Revestimento com 2% de alumina.....	33
Figura 19 - Revestimento com 4% de alumina.....	33
Figura 20 - Revestimento com 8% de alumina.....	34
Figura 21 - Ensaio de dobramento na amostra com 1% de alumina.....	35
Figura 22 - Ensaio de dobramento na amostra com 2% de alumina.....	35
Figura 23 - Ensaio de dobramento na amostra com 8% de alumina.....	36
Figura 24 - Ampliação de 10 vezes na amostra com 1% de alumina.....	37
Figura 25 - Ampliação de 20 vezes na amostra com 1% de alumina.....	37
Figura 26 - Ampliação de 50 vezes na amostra com 1% de alumina.....	38
Figura 27 - Ampliação de 10 vezes na amostra com 2% de alumina.....	39
Figura 28 - Ampliação de 20 vezes na amostra com 2% de alumina.....	39
Figura 29 - Ampliação de 50 vezes na amostra com 2% de alumina.....	40
Figura 30 - Gráfico dos resultados do ensaio de Microdureza Vickers na seção vertical das amostras.	42

Figura 31 - Amostrar de 1%, 2% e 8% de alumina, respectivamente,43	43
após o ensaio de riscamento.....43	43
Figura 32 – Gráfico do ensaio de riscamento para amostra com teor de alumina de 1%.44	44
Figura 33 – Gráfico do ensaio de riscamento para amostra com teor de alumina de 2%.44	44
Figura 34 – Gráfico do ensaio de riscamento para a amostra com teor de alumina de 8%.45	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química SAE1020 e Stellite 6.	19
Tabela 2 - Quadro das características da alumina.	20
Tabela 3 - Parâmetros de aspersão.	25
Tabela 4 - Valores do ensaio de MicrodurezaVickers feito na horizontal.	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo Geral.....	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 ASPERSÃO TÉRMICA.....	14
2.1.1 Combustão por chama convencional.....	15
2.1.2 Combustão chama a pó.....	16
2.2 DESGASTE	17
2.2.1 Desgaste Por Riscamento	17
2.3 LIGAS RESISTENTES AO DESGASTE.....	19
2.3.1 Liga Stellite 6	19
2.3.2 Óxido De Alumínio Al_2O_3	19
2.4 ESTUDO COM AS LIGAS STELLITE 6 E Al_2O_3	21
3 MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1 METAL DE BASE	22
3.2 MATERIAL DE ADIÇÃO	23
3.3 ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA A PÓ	24
3.4 ANÁLISES E ENSAIOS.....	25
3.4.1 Ensaio De Dobramento	25
3.4.2 Análise Via Microscopia Óptica	27
3.4.3 Ensaio De Microdureza Vickers.....	28
3.4.4 Ensaio De Desgaste Por Riscamento.....	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1 FIXAÇÃO DO REVESTIMENTO	32
4.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO	34
4.3 ANÁLISE VIA MICROSCOPIA ÓPTICA.....	36
4.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS.....	40
4.5 ENSAIO DE DESGASTE POR RISCAMENTO	43
5 CONCLUSÃO	46
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Segundo a revista CIM (*Canadian Industrial Machinery*, 2011), o início da história do revestimento duro para melhorias das características dos materiais surgiu em 1921 com irmão Winston F. e Shelley M. Stoody. Para fazer a reparação das brocas as quais eram usadas para perfuração dos poços de petróleo, os irmãos, convencidos que havia algum jeito de deixá-las mais duráveis, criaram o revestimento duro.

De acordo com o centro de conhecimento ESAB (2014), a técnica de revestimento foi implementada com a intenção de reduzir custos de substituição de componentes que se danificavam ou se desgastavam durante os serviços dos mesmos. Com o revestimento duro pode-se restaurar as peças defeituosas podendo reutilizá-las e até mesmo dar uma vida mais longa à peça, visto que há a possibilidade de depositar materiais os quais possuem uma resistência a corrosão, desgaste, impacto, abrasão maiores do que o material original.

Para o revestimento duro são utilizadas as técnicas convencionais de solda ou o processo de metalização (aspersão térmica). São utilizadas as técnicas convencionais quando se deseja ter uma espessura de revestimento relativamente espessa com alta aderência entre o revestimento e a peça. A metalização é recomendada para revestimentos de espessura mais fina, aplicado em uma região localizada.

O processo de aspersão térmica à combustão chama a pó será utilizado neste trabalho para revestir o substrato aço SAE 1020.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Foi escolhido a utilização do processo chama à pó, pois será incrementado porcentagens de alumina no material de adição (Stellite 6). Dessa forma, a utilização de pó facilita a homogeneização de ambos.

Este trabalho visa analisar os resultados do revestimento do Stellite 6 homogeneizado com as porcentagens 1%, 2%, 4% e 8% de alumina.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Preparação da liga: é necessário fazer uma análise granulométrica por peneiramento do pó de alumina (Al_2O_3), a qual será misturada em porcentagens de 1%, 2%, 4% e 8% com a liga Stellite 6. Esta mistura ficará em um forno para secagem durante aproximadamente duas horas e ficará em um homogeneizador durante o mesmo tempo;
- b) Preparação dos corpos de prova para deposição;
- c) Realização da deposição dos revestimentos;
- d) Preparação das amostras para ensaio de dobramento, análise via microscopia ótica, microdureza Vickers, desgaste por riscamento;
- e) Análise dos resultados;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ASPERSÃO TÉRMICA

Acriticasse que começou a se revestir para fins decorativos, utilizando ouro pelo seu caráter brilhoso, sua cor e resistência, o qual era deixados em folhas finas e colados com adesivos. Com a evolução do uso dos metais, foram descobertos outros métodos de revestimentos, como a imersão em metal fundido (LIMA *et al.*, 2007).

De acordo com Maranhão (2006), aspersão térmica é um grupo de processos utilizados para o revestimentos metálicos e não metálicos em substratos que vão de aços até plásticos. O material do revestimento pode estar em forma de arame ou pó, o qual é aquecido por alguma fonte de calor e é impulsionado por algum gás comprimido.

As partículas são aspergidas em gotículas líquidas que quando se chocam com o substrato se achatam e se solidificam quase que instantaneamente e já se fixam nas irregularidades da superfície, resultando em uma macroestrutura lamelar. A estrutura típica dos revestimentos contém lamelas do material aspergido, óxidos, partículas sólidas e porosidade. A quantidade dos fatores defeituosos no revestimento influenciará na qualidade do mesmo (LIMA *et al.*, 2007).

A Figura 1 demonstra a formação do revestimento.

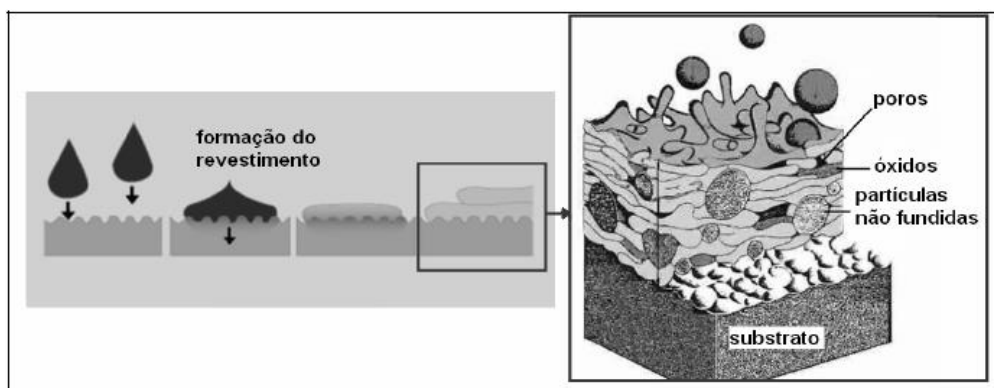


Figura 1 – Fixação do revestimento.
Fonte: Lima *et al.*, 2007.

São dois grupos os quais se classifica a aspersão térmica, conforme Lima *et al.* (2007):

- Grupo I ou de combustão;
- Grupo II ou elétrico.

O primeiro grupo é composto por: chama convencional, oxicombustível de alta velocidade (HVOF), aspersão a frio ou *cold spray* e aspersão por detonação (*D-Gun*); já o segundo grupo é constituído por: plasma de arco não transferido (APS), plasma de arco transferido (PTA) e arco elétrico (EAS).

2.1.1 Combustão por chama convencional

Para o processo de chama convencional existe dois tipos de alimentação de materiais para o revestimento: por pó (*flame powder spray*) e por arame (*wire flame spraying*). O funcionamento de ambas são iguais, diferenciado apenas pela adição do material de revestimento: há duas entradas para gases, das quais um é para o oxigênio, para alimentação da chama, e o outro para o gás combustível que pode ser acetileno, propano, metil-acetileno-propano, o qual utiliza-se para formação da chama. Há também uma entrada para o material de adição que pode ser em forma de pó ou arame. Quando o material de adição entra em contato com a chama da tocha ele se funde e é projetado, em forma de gotículas formando um fluxo de spray, contra o substrato (LIMA *et al.*, 2007).

A Figura 2 ilustra o processo.

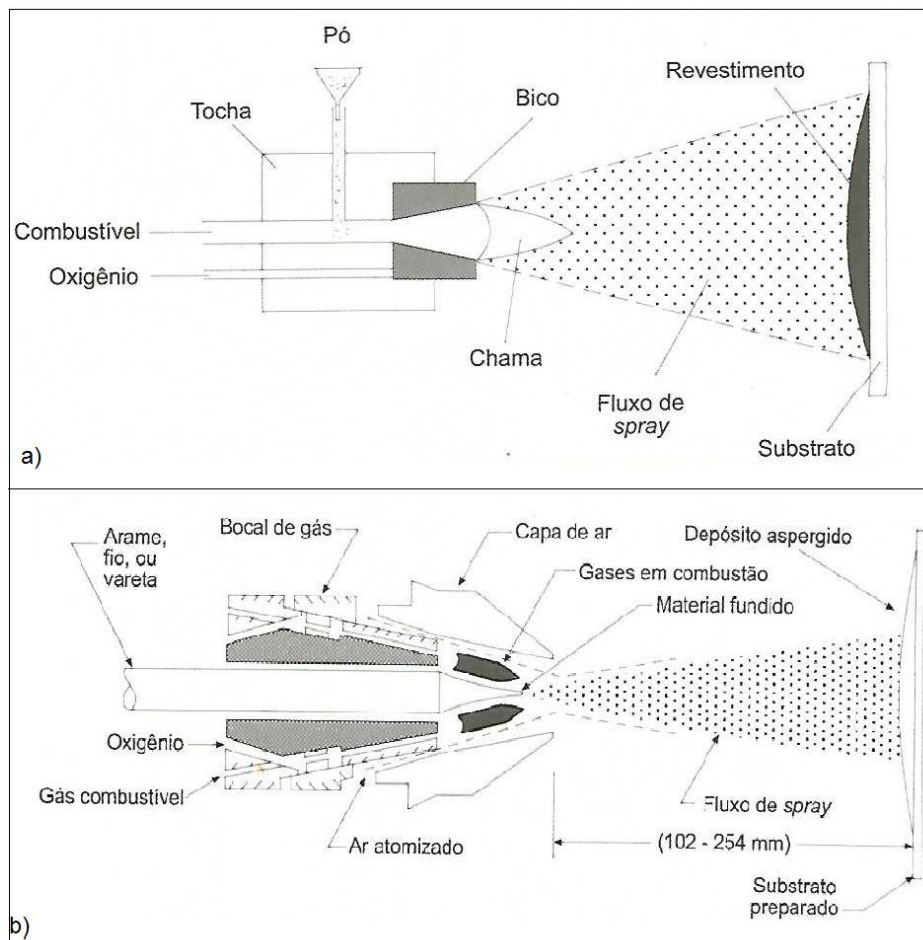


Figura 2 – a) revestimento por pó; b) revestimento por arame.
 Fonte: Lima et al., 2007.

2.1.2 Combustão chama a pó

Segundo Lima *et al.* (2007) para a alimentação em forma de pó, o reservatório do mesmo pode ser acoplado na tocha ou pode ser separado. O pó é transportado por um sistema de alimentação a ar, pelo fluxo de oxigênio ou por gravidade. A taxa de alimentação a pó varia entre 50 a 100 g/min e a taxa de fluxo de gás de transporte é de 3 a 5 l/min.

Geralmente os revestimentos por chama pó possui mais baixa resistência adesiva e coesiva e uma porosidade maior comparados com os outros processos, devido as menores temperatura e velocidade de partículas. Para reverter isto, usa-se pós fusíveis ou autofluxante, os quais reagem com o oxigênio para formação de óxidos de densidade mais baixa. Dessa forma os óxidos formados vão para a

superfície resultando em uma melhor densidade, aderência. Utiliza-se, geralmente, ligas à base de níquel (Ni) e cobalto (Co) para se revestir neste processo (LIMA *et al.*, 2007).

2.2 DESGASTE

Classifica-se desgaste, de acordo com Dias & Gomes (2003), o deslocamento de material causado por partículas duras que estão entre ou embutidas em uma ou nas duas superfícies em movimento relativo. Em metais, segundo Ramalho (1997), o desgaste pode acontecer pelo contato com materiais metálicos ou não, líquidos ou partículas sólidas ou líquidas carregadas por um meio gasoso.

Há três tipos de ideias destacadas por Brandi (1992):

- Dano a superfície: o desgaste é um fenômeno superficial;
- Movimentação relativa: ajuda e identifica os tipos de desgaste e as causas as quais podem acelerá-los;
- Tipo de material: auxilia na identificação do tipo de desgaste;

Conforme a norma DIN 50320, é apontado quatro tipos principais de desgaste: adesão, reação triboquímica, fadiga superficial e abrasão.

2.2.1 Desgaste Por Riscamento

De acordo com Misra (1980), são classificados em dois grupos os desgastes abrasivos: desgaste abrasivo a dois corpos (*grooving abrasion*) e desgaste abrasivo a três corpos (*rolling abrasion*).

O desgaste abrasivo por dois corpos ou desgaste por riscamento ocorre quando as partículas abrasivas estão presas a um corpo que desliza sobre o outro corpo, o substrato, riscando ou removendo material (HUTCHINGS *et al.*, 1996)

A Figura 3 demonstra o ensaio de dois e três corpos, respectivamente.

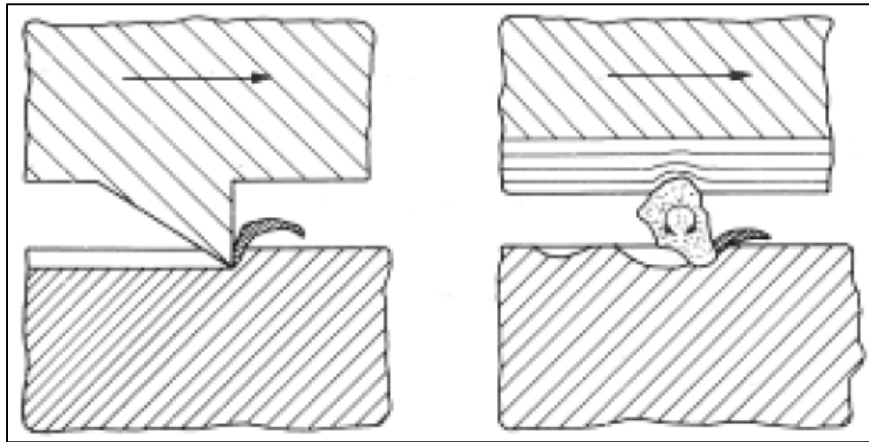


Figura 3 - Ensaio de dois e três corpos, respectivamente.
Fonte: Zum Gahr, 1987.

A Figura 4 representa as características dos ensaios de riscamento e rolamento, respectivamente, no substrato. Observa-se que a primeira imagem há um padrão de ranhuras, as quais são paralelas entre si, formado pela partícula abrasiva presa a um corpo; a segunda imagem não possui um padrão, as características estão de formas aleatórias, devido as partículas abrasivas estarem livres durante o ensaio (COZZA, 2006).

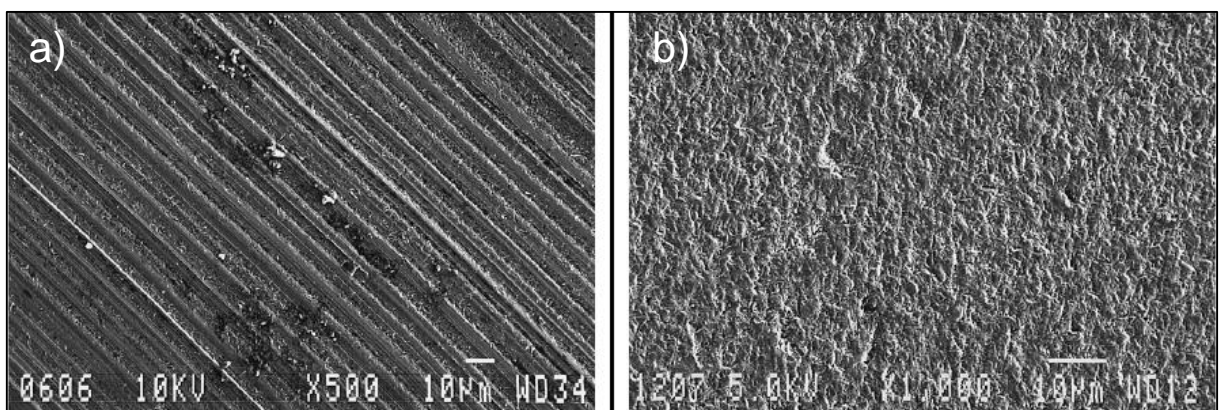


Figura 4 – a) ensaio de riscamento; b) ensaio de rolamento.
Fonte: Trezona *et al.*, 1999.

2.3 LIGAS RESISTENTES AO DESGASTE

2.3.1 Liga Stellite 6

Stellite 6 é uma liga a base de cobalto, comercializada por Deloro Stellite, usada como material de enchimento de metal em pó e com partículas que medem entre 45 µm e 180 µm e com dureza de aproximadamente 405HV (MOSELLI, 2013).

Segundo Baptista (2012), há uma grande variedade de materiais que podem ser aplicados como revestimentos, entre eles pode-se destacar superligas à base de níquel e cobalto. Dessa forma, a liga Stellite 6 proporciona uma excelente resistência à corrosão e ao desgaste.

A Tabela 1 a seguir mostra a composição química do aço SAE 1020 e a liga Stellite 6.

Tabela 1 - Composição química SAE1020 e Stellite 6.

	Co	Fe	C	Cr	Ni	W	Si	Mo	Mn	P	S	Others
SAE 1020	-	Bal.	0.19	-	-	-	-	-	0.4	0.03	0.04	-
Stellite 6	Bal.	2.13	1.13	30.85	2.39	4.65	1.40	0.35	0.25	0.005	0.006	0.40

Fonte: Moselli, 2013.

De acordo com a empresa Kennametal (2013), a liga Stellite é excelente na resistência à cavitação, corrosão, oxidação, erosão, abrasão e fricção e mantém suas propriedades mesmo em altas temperaturas.

2.3.2 Óxido De Alumínio Al₂O₃

A alumina ou óxido de alumínio é um composto químico formado por alumínio e oxigênio e possui forma cristalina comumente α — Al₂O₃. As principais

características da alumina é a alta estabilidade térmica, baixa condutividade térmica, alta resistividade elétrica e alta resistência química (CASSIANO, 2011). Outras características da alumina está descrita na Tabela 2 e a Figura 5 ilustra a alumina.

Tabela 2 - Quadro das características da alumina.

Características	Valores
Densidade teórica g/cm ³	3,97
Dureza Vickers (Gpa)	18 - 23
Resistência à ruptura transversal (Gpa)	276 - 1034
Tenacidade à fratura (MPa/m ^{1/2})	2,6 - 3,3
Módulo de Young (GPa)	380
Razão de Poisson	0,26

Fonte: Lehman, 1991 (adaptada).

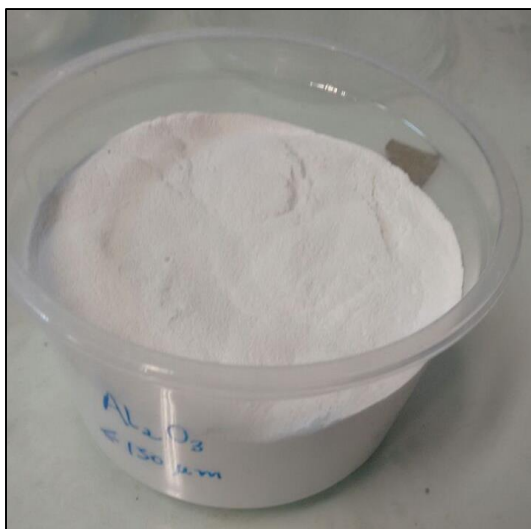


Figura 5 - Alumina.
Fonte: Autoria própria, 2017

2.4 ESTUDO COM AS LIGAS STELLITE 6 E Al_2O_3

Segundo Moselli (2013) e Baptista (2012), a liga Stellite 6 possui uma excelente resistência à corrosão, graças a sua composição a qual tem como base o cobalto.

Conforme Cassiano (2011), a alumina possui, entre outras características, a alta resistência química, ou seja, possui uma alta resistência à corrosão e também ao desgaste.

O revestimento por meio da aspersão térmica chama pó com misturas de Stellite 6 e alumina, poderá aumentar ainda mais a resistência à corrosão e ao desgaste que uma sozinha oferece. O principal fator que se deseja estudar com a mistura é a resistência ao desgaste o qual ela proporcionará.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 METAL DE BASE

O metal de base utilizado nesse trabalho foi o aço SAE 1020, com 90 mm de comprimento, 18,50 mm de largura e 3,3 mm de espessura. Para deixar a rugosidade adequada para a aspensão térmica, foi usado o jateamento abrasivo, como mostra a Figura 6 e os seus parâmetros descritos na Tabela 3.



Figura 6 - Jateamento abrasivo da UFPR Curitiba.
Fonte: Olívio, 2017.

Tabela 3 - Parâmetros de jateamento abrasivo.

Parâmetro	Valores utilizados
Abrasivo	Óxido de alumínio branco #36 mesh
Tipo de jato empregado	Jato por pressão
Gás de transporte do abrasivo	Ar comprimido
Pressão do jateamento	80 à 100 psi
Distância do jateamento	100 mm
Ângulo	90°

Fonte: Autoria própria, 2017.

Após o jateamento o metal de base apresentou uma rugosidade Ra de 6,5 μm em média e a Figura 7 o representa.



Figura 7 - Metal de base.
Fonte: A autoria própria, 2017.

3.2 MATERIAL DE ADIÇÃO

O material de adição é uma mistura da liga Stellite 6 com as porcentagens de 1%, 2%, 4% e 8% de alumina. Esta mistura tem uma granulometria menor do que 180 μm e está ilustrada na Figura 8 em 1%, 2%, 4% e 8%, respectivamente.

Para a mistura, os pós foram secos no forno a uma temperatura de 150 °C por 2 horas e em seguidas misturados em um misturador do tipo Y, acoplado ao torno, e rotacionado em velocidade baixa por 2 horas.



Figura 8 - Mistura com 1%, 2%, 4% e 8% de alumina, respectivamente.
Fonte: Autoria Própria, 2017.

3.3 ASPERSÃO TÉRMICA CHAMA A PÓ

O processo de revestimento chama a pó foi feito na UFPR em Curitiba no laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais (LABATS). Antes das deposições os substratos foram pré aquecidos para melhorar a aderência do revestimento e intercalou-se no sentido de deposição do pó em vertical e horizontal, para garantir que formaria um camada completa no substrato.

O gás de combustão utilizado no processo é o acetileno e para a alimentação de chamas é usado o oxigênio. A Figura 9 ilustra o processo e a Tabela 3 informa os parâmetros de aspersão utilizados.

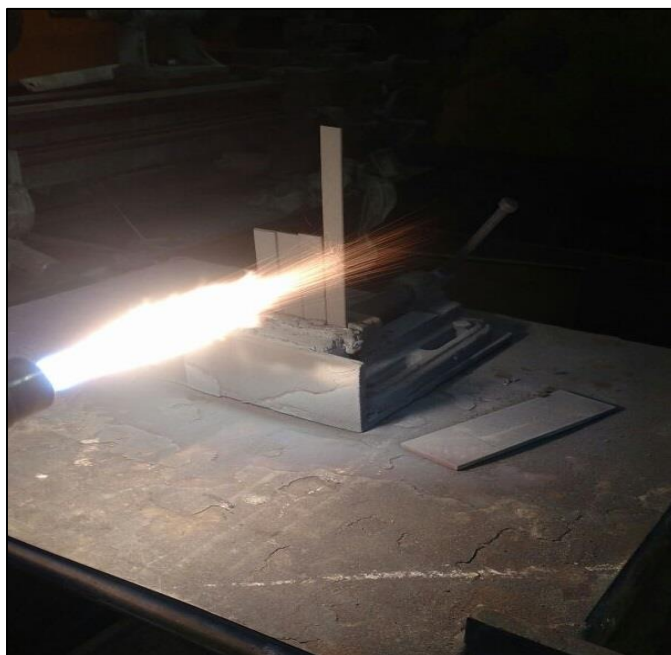


Figura 9 - Processo de aspersão térmica chama a pó.
Fonte: Autoria própria, 2017.

Tabela 3 - Parâmetros de aspersão.

Parâmetros	Valores utilizados
Pré aquecimento da peça	150° C
Distância substrato – tocha	150 mm
Número de camadas	15
Fluxo de nitrogênio	0,28 m ³ /h
Fluxo de oxigênio	2,26 m ³ /h
Fluxo de acetileno	1,13 m ³ /h
Pressão do Nitrogênio	344,75 kPa (50psi)
Pressão do Oxigênio	344,75 kPa (50psi)
Pressão do Acetileno	344,75 kPa (50psi)

Fonte: Autoria própria, 2017.

3.4 ANÁLISES E ENSAIOS

3.4.1 Ensaio De Dobramento

Segundo Lima *et al.* (2007), o ensaio de dobramento é utilizado para dobrar o corpo de prova e assim aprovar ou não, de acordo com as normas, o revestimento

que foi feito. No ensaio de dobramento é comumente usados dois roletes para o apoio do corpo de prova e um cutelo para realizar a força para o dobramento, conforme a Figura 10.

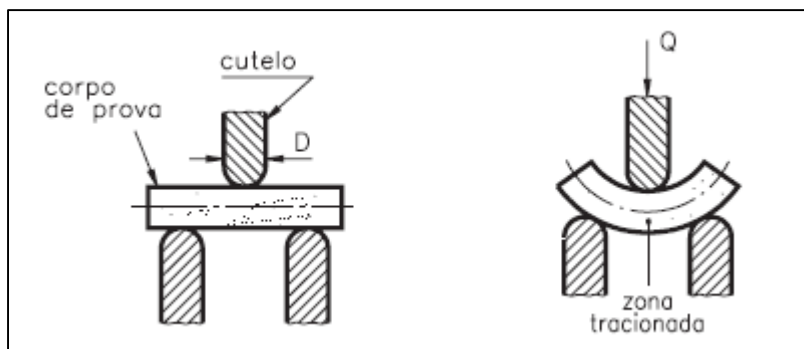


Figura 10 - Ensaio de dobramento.
Fonte: Apostila Telecurso 2000, 1995.

Não deve ocorrer, durante o processo, delaminação, descascamento ou trincas muito intensas. Pode ser aceitável trincas finas e escoamento do revestimento na região em que foi dobrada (LIMA *et al.*, 2007).

São duas as normas que regularizam o dobramento: a MIL-STD-2138 e a Petrobrás N-2568. A Figura 11 mostra alguns resultados para ser aprovados, de acordo com a norma MIL-STD-2138^a (LIMA *et al.*, 2007).

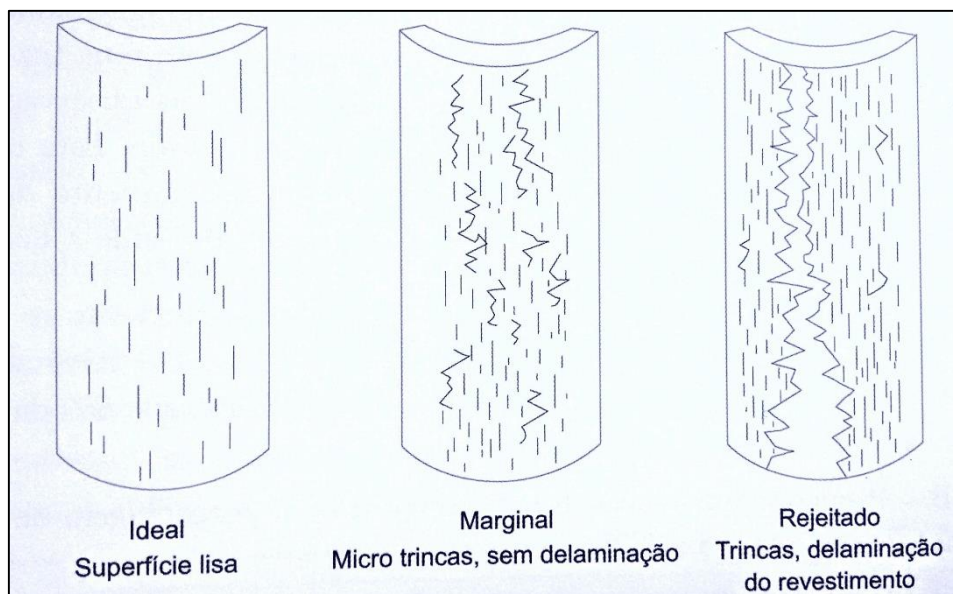


Figura 11 - Resultados dos testes de dobramento.
Fonte: Lima *et al.*, 2007.

3.4.2 Análise Via Microscopia Óptica

Segundo Colpaert (1974), micrografia (ou microscopia óptica) analisa produtos metalúrgicos com ajuda de um microscópio buscando determinar os seus constituintes e a sua textura, feitas em uma superfície previamente polida atacada com um reativo adequado para que revele a microestrutura da peça.

Na soldagem, de acordo com Chinasso (2014) e Luzenti (2014), a microscopia ótica é muito utilizada para analisar a zona termicamente afetada pelo calor (ZTA ou ZAC). Este ensaio pode fornecer as seguintes informações:

- Tamanho de grão;
- Nível de inclusão;
- Classificação de estruturas cristalinas;
- Dimensão e distribuição de grafitas;
- Dimensionamento de descarbonetação superficial;
- Dimensionamento de profundidade de tratamentos;

3.4.3 Ensaio De Microdureza Vickers

Este ensaio tem recebido o nome de “Vickers” graças a Companhia Vickers-Armstrong Ltda. que fez as máquinas as quais realiza este ensaio. O ensaio consiste na aplicação de uma carga na superfície do corpo de prova. O penetrador é padronizado na forma de pirâmide de diamante com base quadrada com angulação de 136° entre faces opostas. Ele é aplicado em matérias metálicas com qualquer dureza, em especial em materiais muito duros, ou corpos de prova muito finos, pequenos e irregulares, sendo por isso conhecido como ensaio universal (GARCIA 2012).

A Figura 12 ilustra o ensaio e a Figura 13 representa o durômetro e uma das medias realizadas neste trabalho.

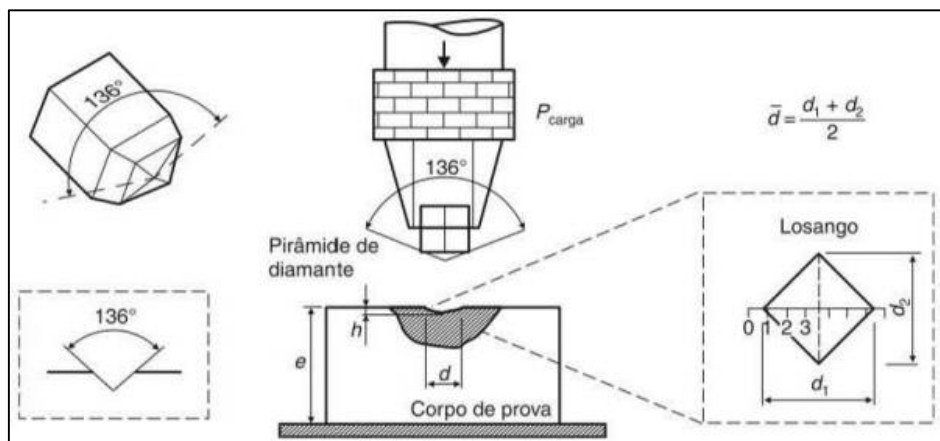


Figura 12 - Ensaio de Microdureza Vickers.
Fonte: Garcia, 2012.

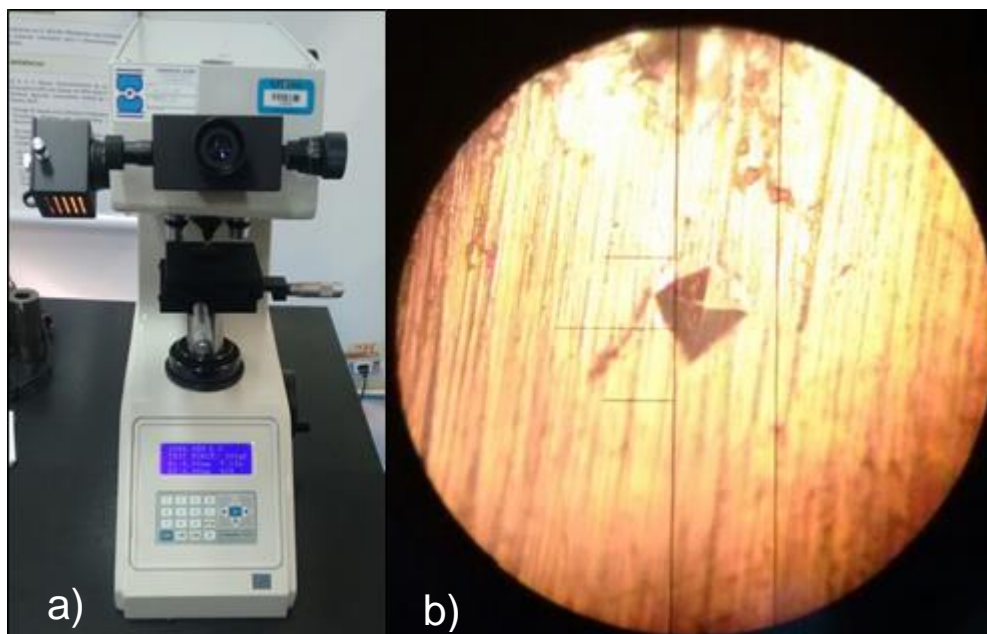


Figura 13 - a) durômetro; b) medida de microdureza Vickers.
Fonte: Autoria própria, 2017.

3.4.4 Ensaio De Desgaste Por Riscamento

O ensaio de riscamento foi realizado na máquina de riscamento, conforme a Figura 14, da seguinte forma: lavou-se a amostra com acetona na lavadora ultrassônica, Figura 15, por um tempo de 5 minutos, em seguida pesou-se a amostra em uma balança de 0,0001 g de precisão.



Figura 14 - Máquina de riscamento.
Fonte: Autoria própria, 2017.



Figura 15 - Lavadora ultrassônico.
Fonte: Autoria própria, 2017.

A amostra foi posicionada na máquina de riscamento e fez o primeiro risco, apenas com o peso da haste, conforme a Figura 16, a qual tinha uma massa de 1447,75 g. É necessário lavar a amostra da mesma forma que foi feito antes — com acetona no ultrassom durante 5 minutos — para assim poder pesá-la e anotar a perda de massa após o ensaio. Em seguida foi feito a segunda ranhura

acrescentando uma massa de 1 kg à haste. Para pesá-la precisou lavá-la novamente da mesma forma.



Figura 16 - Haste do ensaio do riscamento.
Fonte: Autoria própria, 2017.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 FIXAÇÃO DO REVESTIMENTO

A Figura 17 mostra que a amostras com 1% conseguiu se fixar no substrato.



Figura 17 - Revestimento com 1% de alumina.
Fonte: Autoria própria, 2017.

O revestimento com 2% de alumina, mostrado na Figura 18, também demonstra que houve fixação do revestimento.



Figura 18 - Revestimento com 2% de alumina.
Fonte: Autoria própria, 2017.

Já o revestimento com 4% de alumina não obteve uma fixação no substrato, conforme a Figura 19.



Figura 19 - Revestimento com 4% de alumina.
Fonte: Autoria própria, 2017.

Porém a Figura 20 mostra que o pó com 8% de alumina obteve fixação no substrato.



Figura 20 - Revestimento com 8% de alumina.
Fonte: Autoria própria, 2017.

4.2 ENSAIO DE DOBRAMENTO

Foi feito o ensaio de dobramento nas amostras com teor de alumina em 1%, 2% e 8%. A Figura 21 representa o ensaio com amostra de 1%.



Figura 21 - Ensaio de dobramento na amostra com 1% de alumina.
Fonte: Autoria própria, 2017.

Percebe-se que a amostra foi rejeitada no teste de dobramento, visto que houve um descascamento do revestimento na região do teste.

A Figura 22 ilustra o ensaio com 2% de alumina.



Figura 22 - Ensaio de dobramento na amostra com 2% de alumina.
Fonte: Autoria própria, 2017.

Nota-se que a amostra com 2% também foi reprovada pelo o mesmo motivo da anterior — descascou o revestimento.

A Figura 23 mostra o ensaio com 8% de alumina.



Figura 23 - Ensaio de dobramento na amostra com 8% de alumina.
Fonte: Autoria própria, 2017.

Observa-se que não houve descascamento ou trincas acentuadas na região do ensaio na amostra de 8%, porém a amostras não atingiu a camada mínima exigida na norma, portanto esta amostra também foi reprovada.

4.3 ANÁLISE VIA MICROSCOPIA ÓPTICA

As imagens das amostras com 1% e 2% de alumina foram ampliadas em 10, 20 e 50 vezes. As amostras de 4% e 8% de alumina não foram analisadas porque a de 4% não foi fixada no substrato e a de 8% não obteve camadas suficientes para

a visualização. As Figuras 24, 25 e 26 ilustram a ampliação de 10, 20 e 50 vezes, respectivamente, para a amostra de 1%.

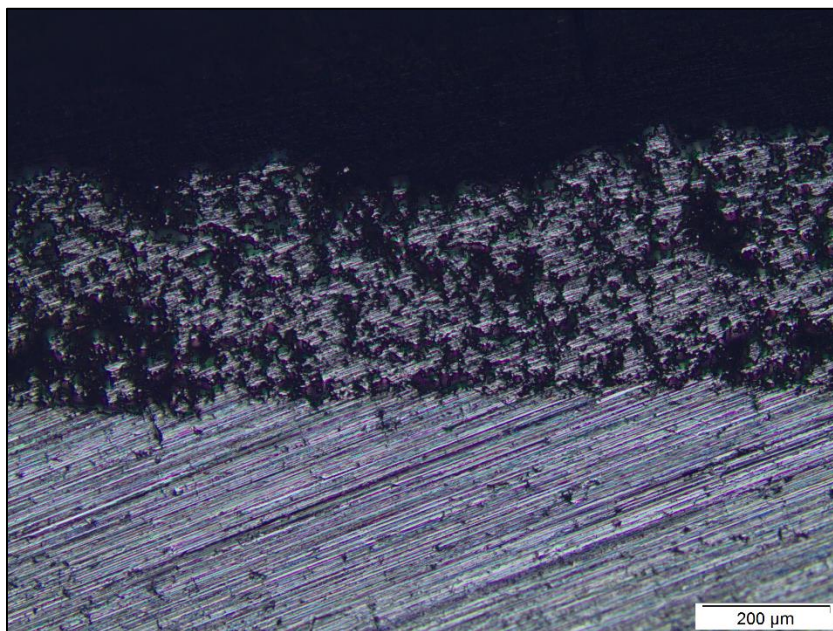


Figura 24 - Ampliação de 10 vezes na amostra com 1% de alumina.
Fonte: Autoria própria, 2017.

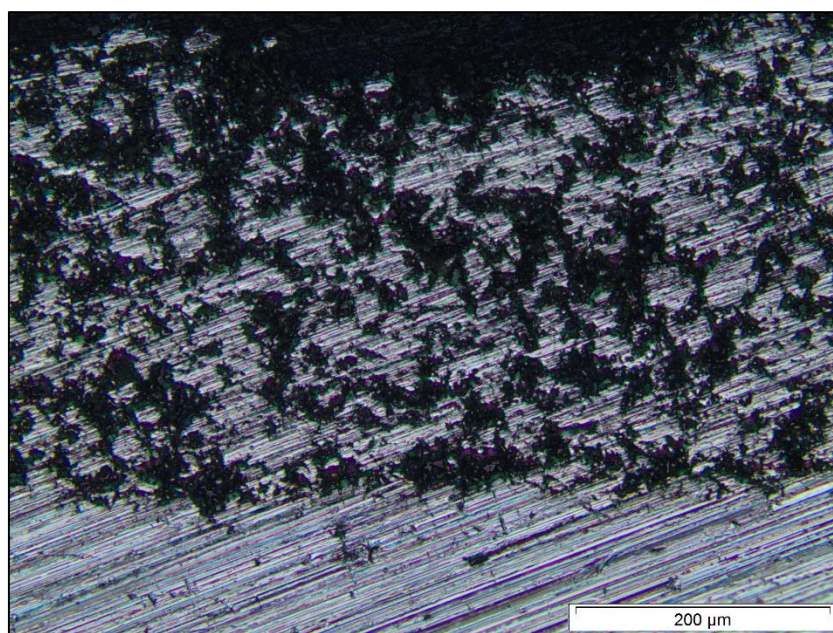


Figura 25 - Ampliação de 20 vezes na amostra com 1% de alumina.
Fonte: Autoria própria, 2017.

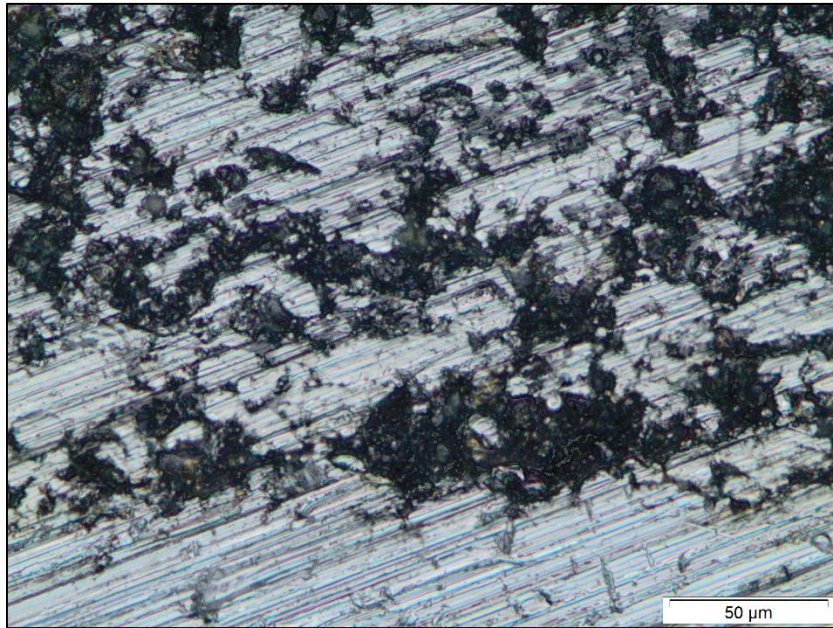


Figura 26 - Ampliação de 50 vezes na amostra com 1% de alumina.
Fonte: Autoria própria, 2017.

Observando as Figuras 24, 25 e 26 nota-se que há formação do revestimento, porém as lamelas não ficaram definidas e homogêneas. Observa-se também uma grande quantidade de inclusão de óxidos devido a má qualidade do revestimento, e muitos poros formados devido a problemas durante a deposição.

As Figuras 27, 28 e 29 representam a amostra de 2% com alumina com ampliações de 10, 20 e 50 vezes, respectivamente.

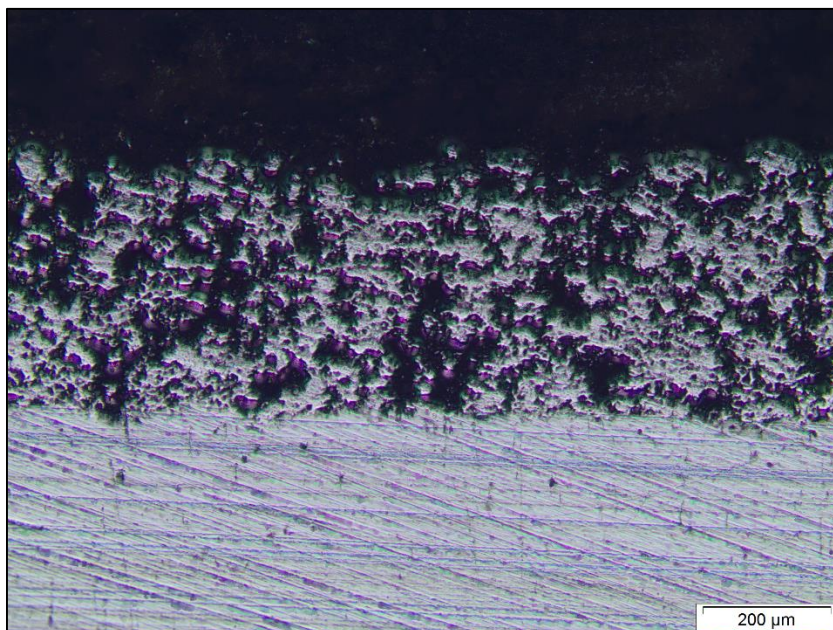


Figura 27 - Ampliação de 10 vezes na amostra com 2% de alumina.
Fonte: Autoria própria, 2017.

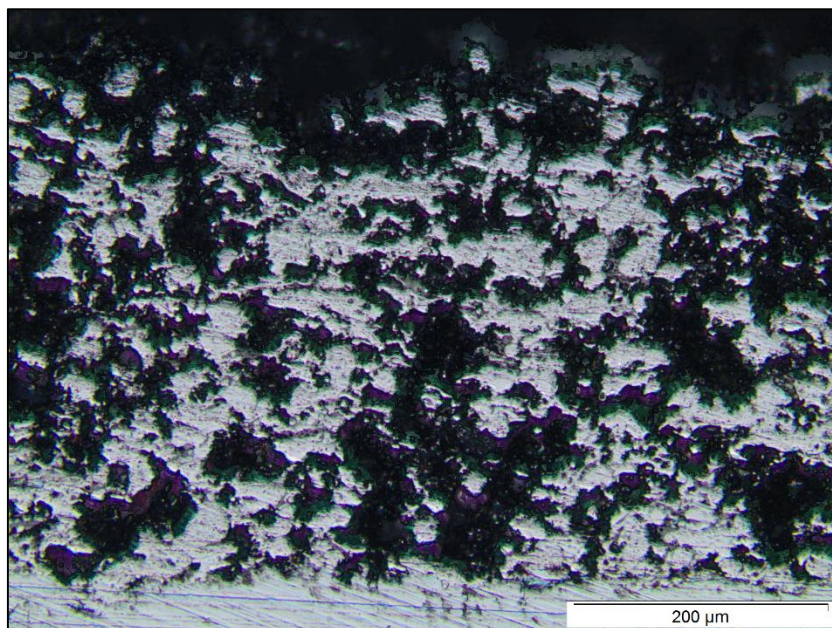


Figura 28 - Ampliação de 20 vezes na amostra com 2% de alumina.
Fonte: Autoria própria, 2017.

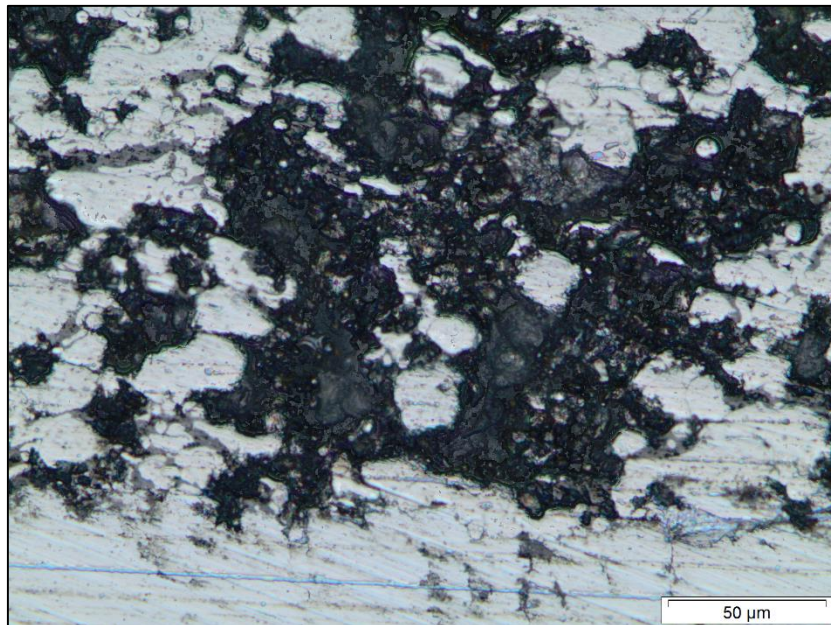


Figura 29 - Ampliação de 50 vezes na amostra com 2% de alumina.
Fonte: Autoria própria, 2017.

Observando as Figuras 27, 28 e 29 nota-se que igualmente as amostras de 1%, há formação do revestimento, porém as lamelas não ficaram definidas e homogêneas. Observa-se também uma grande quantidade de inclusão de óxidos devido à má qualidade do revestimento, e muitos poros formados devido a problemas durante a deposição.

4.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

O ensaio de Microdureza Vickers foi realizado na UTFPR campus Cornélio Procópio. Foram feitas seis medidas de microdurezas no sentido vertical, sendo que três delas foram feitas no revestimento e as outras três no metal de base, podendo, assim, perceber a influência do revestimento na microdureza; além disto, foram feitas também dez medidas no sentido horizontal no revestimento, para que pudesse verificar um desvio padrão e uma média de microdureza.

Para o ensaio usou-se uma força de 300 gf aplicada durante o tempo de 15 segundos. A unidade de medida da Microdureza Vickers é dada em HV.

O ensaio de microdureza foi realizado nas amostra com 1% e 2% de teor de alumina, visto que a de 4% não obteve uma fixação do revestimento e a de 8% não formou uma camada suficiente para se fazer o ensaio.

A Tabela 4 informa os valores obtidos nos ensaios feitos na horizontal, ou seja, apenas no revestimento, assim como a média e o desvio padrão das microdurezas nas amostras com porcentagens de 1% e 2% alumina.

Tabela 4 - Valores do ensaio de Microdureza Vickers feito na horizontal.

Pontos	Microdureza, em HV, na amostra com 1% de alumina	Microdureza, em HV, na amostra com 2% de alumina
1	565,1	667,2
2	667,2	965,8
3	697,1	946,0
4	1074,9	1062,6
5	716,0	855,5
6	551,9	650,9
7	667,2	735,6
8	749,2	467,4
9	976,0	716,0
10	1051,6	441,4
Média	771,62	750,84
Desvio Padrão	192,65	207,35

Fonte: Autoria própria, 2017.

Observa-se que os valores de microdurezas são extremamente altos e o desvio padrão também é alto. Os valores altos de desvio padrão se devem ao fato das endentações não serem somente em uma fase formada e sim escolhidos em pontos aleatórios para a aplicação da carga

A Figura 30 mostra os valores obtidos no ensaio na seção vertical das amostras.

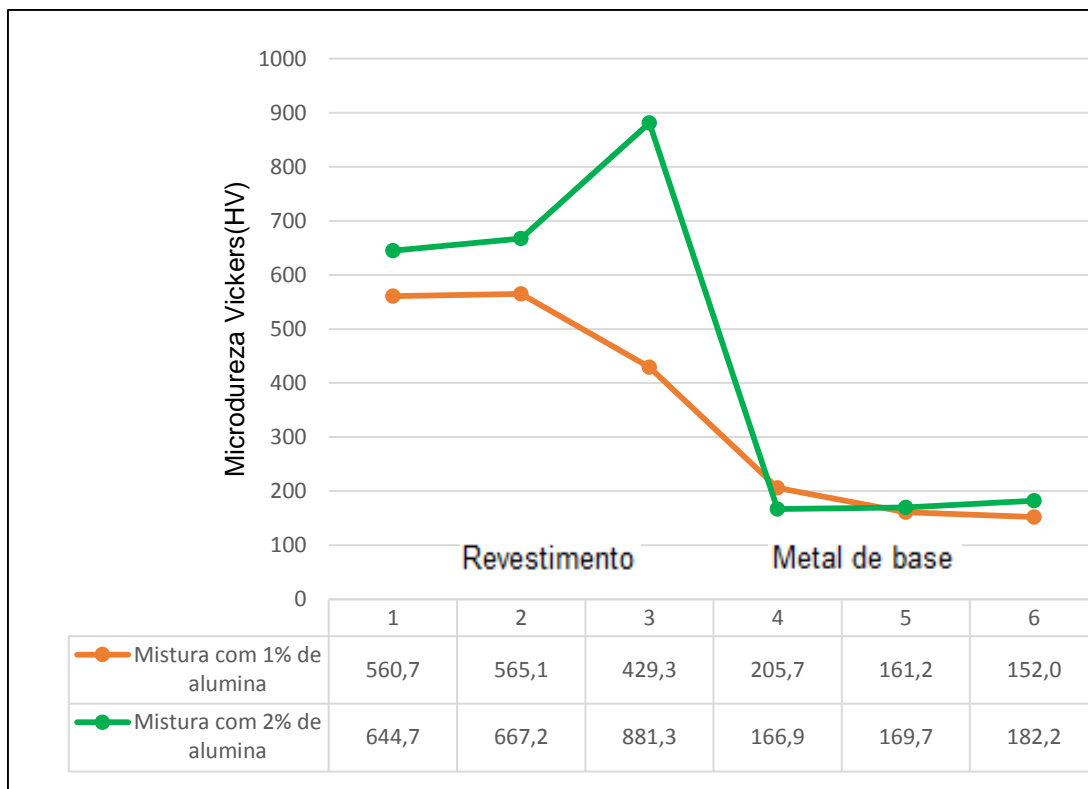


Figura 30 - Gráfico dos resultados do ensaio de Microdureza Vickers na seção vertical das amostras.

Fonte: Autoria própria, 2017

Observa-se que o revestimento com 2% de alumina possui durezas mais elevadas, embora sua média de dureza esteja mais baixo do que a de 1%. Isto pode ser explicado pelo excesso de porosidade obtido no revestimento de 2% de alumina.

Pode-se observar na figura 6 que os valores de dureza Vickers da alumina está entre 18 e 23 GPa, o que corresponde a 1835 e 2345 HV. Segundo Arno Giuseppe Cersosimo, da Petrobras, a dureza da Stellite 6 (sem adição de elemento) é de 38 à 43 HRC, o que corresponde à 400HV (41,7HRC).

4.5 ENSAIO DE DESGASTE POR RISCAMENTO

Foram analisadas as amostras com 1%, 2% e 8% de alumina. A Figura 31 mostra o revestimento, após o ensaio de riscamento, de 1%, 2% e 8% de alumina, respectivamente.

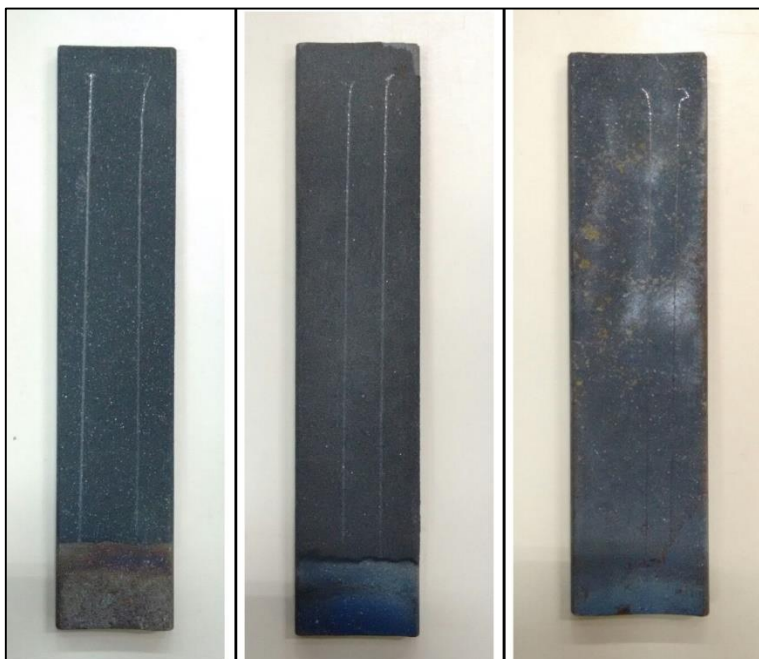


Figura 31 - Amostras de 1%, 2% e 8% de alumina, respectivamente, após o ensaio de riscamento.
Fonte: Autoria própria, 2017.

As Figuras 32, 33 e 34 representam os resultados do ensaio das amostras com teor de alumina na ordem crescente.

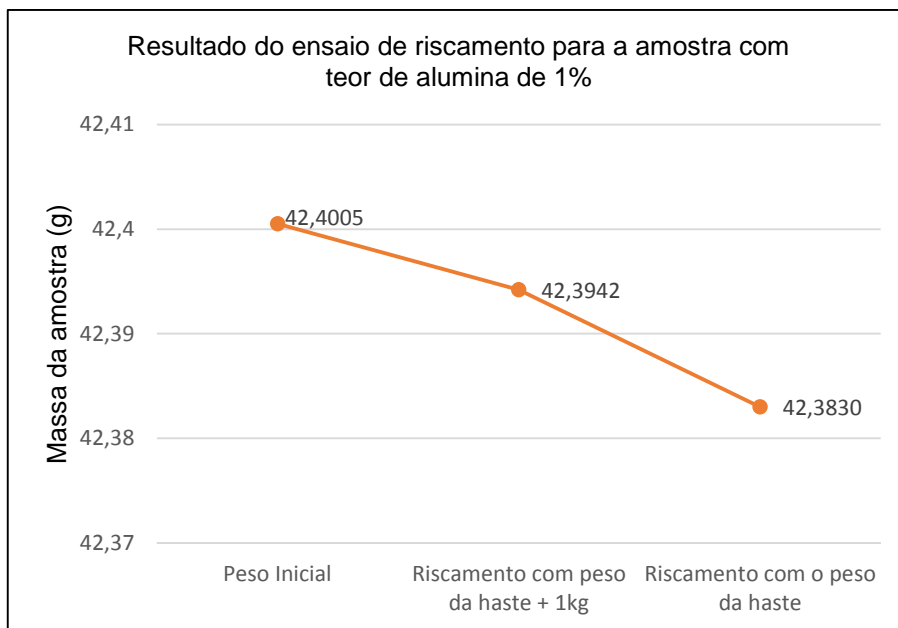


Figura 32 – Gráfico do ensaio de riscamento para amostra com teor de alumina de 1%.

Fonte: Autoria própria, 2017.

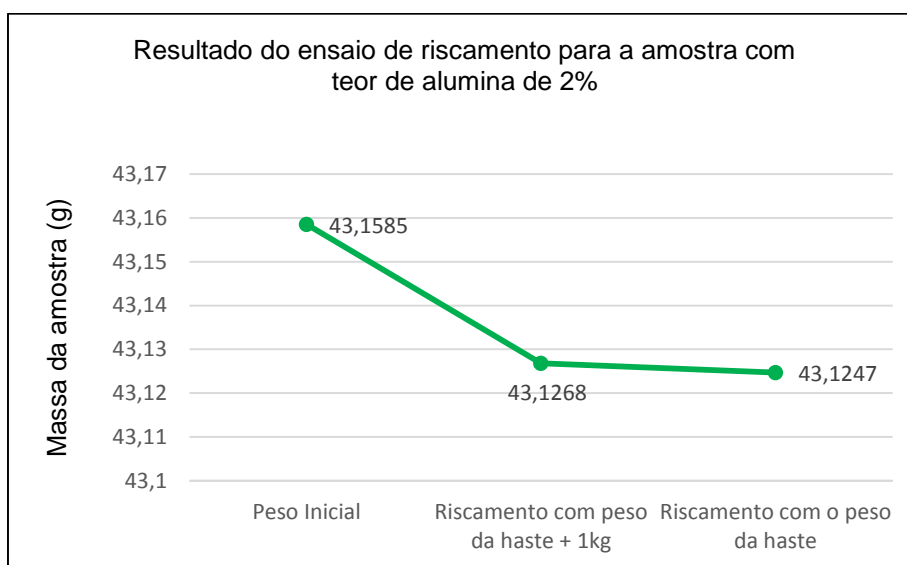


Figura 33 – Gráfico do ensaio de riscamento para amostra com teor de alumina de 2%.

Fonte: Autoria própria, 2017.

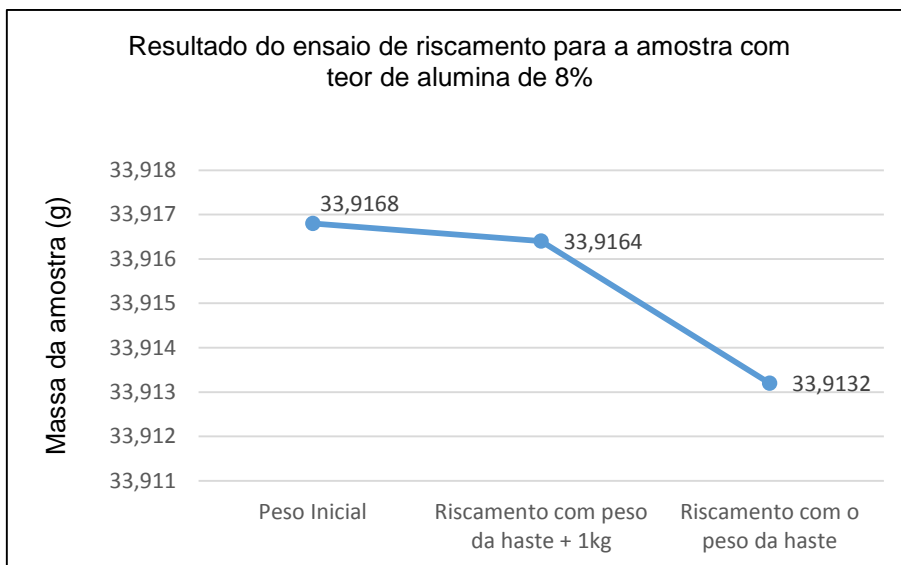


Figura 34 – Gráfico do ensaio de riscamento para a amostra com teor de alumina de 8%.

Fonte: Autoria própria, 2017.

Analisando os gráficos, nota-se que a liga que apresentou maior resistência ao desgaste foi a que continha 8% de alumina, visto que perdeu a menor quantidade de massa, 0,0036 g no total, comparado com as outras. Seguida da liga com 1% com uma perda de massa de 0,0175 g e da de 2% com perda de massa de 0,0338 g.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos e comparando-os com a literatura, através dos ensaios de aderência, microdureza Vickers e desgaste por riscamento e das análises de microscopia óptica, concluiu-se que:

Das quatro amostras, apenas as que continhas 1%, 2% e 8% de alumina foram usadas nos ensaios e análises. Isto porque a que possuía 4% de alumina não conseguiu se fixar no substrato.

Para o ensaio de dobramento, nenhuma das amostras foi aprovada.

Na análise via microscopia óptica, as amostras com 1% e 2% de alumina apresentam um excesso de porosidade, o que resultou em uma análise não satisfatória, uma maneira para melhorar o revestimento é fazer um estudo de parâmetros de deposição para diminuir poros e melhorar as camadas depositadas.

Para o ensaio de microdureza Vickers, a amostra de 2% teve, em sua maioria, valores de dureza mais elevadas do que a de 1%; entretanto a média de dureza foi maior para amostra de 1%. Isto porque a de 2% teve um desvio padrão maior do que a de 1%. Isto deve-se ao fato de que em uma região específica que foi feita a medida na amostra de 2%, foi em uma região com uma concentração de porosidade acima da média, ou seja, a medida foi realizada em uma região fragilizada, fazendo com que a média de dureza caísse.

No ensaio de desgaste por riscamento, a de 1% teve uma perda de massa total de 0,0175 g; a de 2% apresentou uma perda de massa total de 0,0338 g; a de 8%, uma perda de massa total de 0,0036 g. Desta forma, concluiu-se que a amostra que possui maior resistência ao desgaste é a com 8% de alumina, já que perdeu menos massa. Esperava-se que a perda de massa iria diminuir a medida que fosse aumentando o teor de alumina. Isto não aconteceu pela provável presença de porosidade na amostra de 1% e 2%.

É normal o revestimento possuir porosidade, óxidos, microtrincas; entretanto a quantidades destes influenciará diretamente nas propriedades do revestimento. O excesso de porosidade se deve ao fato de que o pó de revestimento foi preparado pra ser usado na soldagem SATG-Pó (soldagem ao arco tungstênio com atmosfera gasosa com deposição de pó), com uma granulometria entre 36 μm e 180 μm . O ideal para a aspensão térmica é uma

granulometria de 45 μm à 106 μm ou 106 μm à 180 μm . Por esta causa o fluxo de pó não foi o ideal e com isso o revestimento não foi o ideal. Outro método para melhorar a deposição das ligas estudadas é fazer um estudo dos parâmetros de deposição, para que haja uma melhor qualidade do revestimento.

Portanto, apesar da qualidade dos revestimentos não ficarem boa, nota-se que a presença da alumina melhorou as propriedades do revestimento, principalmente no desgaste: a perda de massa da amostra com 8% de alumina foi muito menor do que comparada a perda de massa de 1% e 2% alumina. Para a dureza, tinha uma tendência de quanto mais a quantidade de alumina, mais elevado seria os resultados. Desta forma, pode-se concluir que é válido a adição de alumina na liga Stellite 6 para a melhoria das propriedades mecânicas, principalmente na de desgaste.

REFERÊNCIAS

BAPTISTA, A.L.B.; NASCIMENTO, I.A. (2012). **Revestimentos duros resistentes ao desgaste depositados por soldagem utilizados na recuperação de elementos de máquinas.** Disponível em: <<http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/soldadesgaste.pdf>>. Acesso em: 5 out. 2016.

CALLISTER, Willian D; **Ciencia e engenharia de materiais uma introdução.** 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1940. 75p.

CERAMTEC. **The Ceramic Experts.** Disponível em :<<http://www.ceramtec.com.br/materiais-ceramicos/oxido-de-aluminio/>> Acesso em: 14 out. 2016.

CERSOSIMO, A. G. **Deposição de Revestimentos Superficiais Duros por Soldagem e por Aspersão Térmica.** Disponível em: <<http://www.petroblog.com.br/wp-content/uploads/Deposi%C3%A7%C3%A3o-de-revestimentos-duros1.pdf>>. Acesso em: 9 jun. 2017.

COLPAERT, HUBERTUS. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns;** 3ª edição, Editora: Edgard Blucher Ltda. 1974.

ESAB. **Processo de soldagem TIG.** Disponível em: <http://www.esab.com.br/br/pt/education/blog/processo_soldagem_revestimento_duro.cfm>. Acesso 2 out. 2016.

COZZA, R. C. (2006). **Estudo do comportamento do coeficiente de desgaste e dos modos de desgaste abrasivo em ensaio de desgaste micro-abrasivo.** Tese (mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2016.

ÉTICA. **Ética Empreendimentos Tecnológicos.** Disponível em :<<http://www.etalaboratorio.com.br/dureza>>. Acesso em: 10 out. 2016.

Garcia, A., Spim, J. A., Santos, C. A. **Ensaio dos materiais.** 7.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HARDFACING ALLOYS. **Ligas para revestimentos duros.** Disponível em: <<http://www.stellite.com/Portals/0/HARDFACING%20ALLOYS-%20PORTUGESE.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2016.

INFOSOLDA. **Portal brasileiro de soldagem.** Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos>>. Acesso em: 07 maio 2016.

LIMA, C. R. C.; TREVISAN, R. E. **Aspersão térmica: fundamentos e aplicações.** 2. ed. São Paulo: Artliber Editora, 2007.

MARANHO, Ossimar. (2006). **Aspersão térmica de ferro fundido branco multicompetente**. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

MARIN, J. J. C. (2010). **Efeito do tamanho do abrasivo no desgaste de metais**. Tese (doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

MOREIRA, E. F., 2014. **Análise da influência dos parâmetros de pulso na microestrutura de revestimento duro pelo processo stag-pó(gtaw) utilizando a liga stellite 6**. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio, 2014.

MOSELLI, P. C. (2013). **Desenvolvimento de dispositivo, adaptado à tocha SATG, para a realização de revestimento duro, utilizando ligas, em forma de pó**. 136 f Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

MOSELLI, P. C., DE OLIVEIRA, M. F., MORENO, J. R. S. **Deposited properties in hardfacing SAE 1020 substrate by using alloy welding GTAW Stellite 6 in powder form**. 22nd International Conference on Production Research. Fóz do Iguaçu, 2013.

RIBEIRO, R. (2004). **Avaliação da resistência ao desgaste abrasivo de revestimentos soldados do tipo Fe-C-Cr utilizados na indústria sucroalcooleira**. Tese (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Campus Ilha Solteira, 2004.

ROCHA, C. D. (2011). **Estudo do processamento da alumina visando aplicação em geometria hemisférica**. Tese (mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

Telecurso 2000, Apostila. Mecânica, Ensaios. Editora Globo. 1995

TWI. **The Welding Istitute**. Disponível em :< <http://www.theweldinginstitute.com/>> Acesso em: 4 out. 2016.