

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

**PEDRO HENRIQUE DE JESUS LOPES**

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO COMPOSTO Al/SiC DEPOSITADO POR AT  
SOBRE AÇO CARBONO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2019**

PEDRO HENRIQUE DE JESUS LOPES

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO COMPOSTO Al/SiC  
DEPOSITADO POR AT SOBRE AÇO CARBONO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Profa. Dr. Maria Nalu Verona

PATO BRANCO

2019

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO COMPOSTO Al/SiC DEPOSITADO POR AT SOBRE AÇO CARBONO

Pedro Henrique de Jesus Lopes

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 21/03/2019 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros

---

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk

---

Profa. Dra. Maria Nalu Verona  
Orientador

---

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

\*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

Dedico este trabalho aos dois amores da minha vida, Sr. Raimundo e Dona Suédia, por todo esforço e confiança depositados em mim, aos meus amigos com quem compartilhei os melhores momentos da minha vida em Pato Branco, onde aprendi mais sobre mim do que em todos os outros anos de existência.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, por permitir um acesso amplo ao conhecimento, ferramentas necessárias para minha pesquisa e por permitir meu desenvolvimento profissional.

Agradeço ao Laboratório de Materiais e de Aspersão Térmica da Universidade Federal do Paraná, por permitir o uso dos equipamentos para aplicação do revestimento e finalização do meu trabalho.

Agradeço a Professora Dra. Maria Nalu, por toda orientação, companhia, conselhos, ajuda e incentivo para concluir meu trabalho.

Agradeço a todos meus amigos que compartilharam comigo o mesmo sonho de estudar um curso de engenharia, em especial aos que moraram comigo durante este caminho e tenho como irmãos, Alexandre, Eder, Gabriel, Guilherme, Rafael, Tiago.

Agradeço também a Ketlen por todos os aprendizados compartilhados nos anos de graduação, a dedicação mútua e por sempre ter acreditado e confiado em mim.

Agradeço ao Sr. Possoli e Dona Ana, duas pessoas que me ajudaram muito durante minha passagem pelo Sul e moram no meu coração.

Agradeço também a Amanda, que em muitos momentos durante o processo de formulação deste trabalho se mostrou solícita e teve paciência comigo.

Agradeço a equipe Pato Baja por toda vivência proporcionada, fiz muitos amigos e companheiros nessa jornada.

Quando se tratava de ouvir, minha mãe me ensinou o silêncio, se você atropela a voz dos outros com a sua, ela dizia, não vai conseguir ouvi-los. Quando se tratava de falar, ela dizia, aja com seriedade cada palavra que você diz é de sua responsabilidade. Quando se tratava de existir, ela dizia, seja ao mesmo tempo dura e doce você deve ser vulnerável para viver plenamente e forte o bastante para ser uma sobrevivente. Quando se tratava de escolher, ela me pediu que fosse grata por cada escolha que eu fiz e ela nunca teve o privilégio de fazer. (KAUR, Rupi, 2018).

## RESUMO

LOPES, Pedro. Estudo das propriedades mecânicas do composto Al/SiC depositado por AT sobre aço carbono. 2019. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2019.

Esta pesquisa apresenta a deposição por Aspersão Térmica Chama pó (FSp) de um pó compósito com partículas micrométricas de matriz metálica em alumínio com a utilização do SiC como reforçante (Al/SiC) em duas condições de concentração formadas a partir da Moagem Rápida (MR). No revestimento formado foi avaliado através de ensaios de aderência e dobramento, medida de camada e análise microscópica por M.O e MEV as principais características encontradas em cada uma das composições. O objetivo desta pesquisa foi produzir um revestimento de caráter protetivo sobre o substrato de aço 1020, procurando associar os resultados obtidos através de cada condição utilizada as propriedades mecânicas de resistência ao desgaste e abrasão. Durante a aplicação foram controlados parâmetros como velocidade de aplicação, distância da pistola, pressão e velocidade dos gases utilizados, O processo de limpeza do substrato e a temperatura de pré-aquecimento foram rigidamente iguais nas duas configurações. Os resultados entre os revestimentos foram diferenciados de acordo com a interação do SiC, no Alumínio, nas proporções de 20 e 40% da composição total do compósito. Todas as análises indicam que é possível produzir revestimentos eficazes para aplicação em aço carbono. Obteve-se valores de aderência superiores a 18Mpa, com porosidade que variou de 6 a 12% e espessura de camada de até 500  $\mu\text{m}$ .

**Palavras-chave:** Aspersão Térmica. Chama pó. Moagem Rápida. Compósito. Propriedade Mecânicas.

## ABSTRACT

LOPES, Pedro. Study of the mechanical properties of the Al / SiC compost deposited by AT on carbon steel. 2019. 74 f. Course Completion Work - Mechanical Engineering Course, University Technological Federal of Paraná. Pato Branco, 2019.

This study presents the Thermal Spray Powder (FSp) deposition of a composite powder with micrometric aluminum matrix metal particles using SiC as a reinforcing agent (Al / SiC) in two concentration conditions formed from the Rapid Milling (MR). In the formed coating was evaluated through adhesion and folding tests, layer measurement and microscopic analysis by M.O and MEV the main characteristics found in each of the compositions. The objective of this research was to produce a protective coating on the steel subsurface 1020, trying to associate the results obtained through each condition used the mechanical properties of resistance to wear and abrasion. During the application parameters such as speed of application, gun distance, pressure and speed of the gases used were controlled. The substrate cleaning process and the preheating temperature were rigidly the same in both configurations. The results between the coatings were differentiated according to the interaction of SiC in Aluminum in the proportions of 20 and 40% of the total composition of the composite. All analyzes indicate that it is possible to produce effective coatings for application in carbon steel. Adhesion values higher than 18Mpa were obtained, with porosity varying from 6 to 12% and layer thickness up to 500  $\mu\text{m}$ .

**Keywords:** Thermal Spray Powder. Rapid Milling. Composite. Mechanical properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemático simplificado do revestimento depositado por aspersão térmica .....	21
Figura 2 – Fluxograma dos processos a partir de suas fontes de energia .....	22
Figura 3 – Esquema de FS alimentado por pó .....	23
Figura 4 – Esquema de FS alimentado por arame .....	23
Figura 5 – Graus de corrosão e limpeza .....	26
Figura 6 - Diagrama de equilíbrio do Sistema Si-C .....	30
Figura 7 – Tipos de reforços em compósitos.....	33
Figura 8 – Desenho detalhado da estrutura lamelar de um típico revestimento aspergido.....	34
Figura 9 – Ilustração da ancoragem mecânica das partículas à superfície do substrato .....	36
Figura 10 – Fluxograma dos processos .....	37
Figura 11 – Representação dos detalhes do sistema montado para moagem.....	40
Figura 12 – Representação do moinho “Periquito” e jarro utilizado.....	41
Figura 13 – Pesagem para verificar a massa do material retirado do jarro .....	41
Figura 14 – Modelagem dos corpos de provas utilizados .....	42
Figura 15 – Processo de medição da rugosidade superficial .....	43
Figura 16 – Detalhes do equipamento utilizado no processo .....	44
Figura 17 – Detalhes da pistola e painel de controle.....	45
Figura 18 – Controle da temperatura no pré-aquecimento.....	45
Figura 19 – Aplicação do Revestimento por Aspersão Térmica Chama Pó.....	47
Figura 20 – Equipamento utilizado no Ensaio de Dobramento .....	48
Figura 21 – Padrões para avaliação visual das tricas em corpos de prova ensaiados por dobramento .....	48

Figura 22 – Modelagem representativa do dispositivo utilizado para alinhamento dos corpos de prova cilíndricos.....	49
Figura 23 – Ensaio de adesão realizado na Máquina Universal de Ensaios .....	50
Figura 24 – Desenho esquemático para interpretação dos resultados pós ensaio ...	50
Figura 25 – Sequência dos equipamentos utilizados na preparação das amostras..	51
Figura 26 - Distribuição granulométrica por moagem - 80Al20SiC.....	53
Figura 27 – Histograma das faixas granulométricas obtidas durante o processo de moagem para formação do pó compósito 80Al20SiC .....	54
Figura 28 - Distribuição granulométrica por moagem - 60Al40SiC.....	55
Figura 29 - Histograma das faixas granulométricas obtidas durante o processo de moagem para formação do pó compósito 60Al40SiC .....	55
Figura 30 – Microscopia Eletrônica por varredura aplicada na mistura 80Al20SiC ...	56
Figura 31 – Análise da Microscopia Eletrônica por varredura aplicada na mistura 60Al40SiC antes e depois da MR.....	57
Figura 32 – Substrato de aço 1020 jateado .....	58
Figura 33 – Amostras dobradas no ensaio.....	59
Figura 34 – Gráfico da Tensão de Ruptura média para o Revestimento A e B.....	60
Figura 35 – Resultados do ensaio de aderência – Análise do rompimento nas amostras 80Al20SiC.....	61
Figura 36 – Resultados do ensaio de aderência – Análise do rompimento nas amostras 60Al40SiC.....	62
Figura 37 – Microscopia Óptica no revestimento aplicado de configuração 80Al20SiC – Aumento de 50x .....	64
Figura 39 – Processo de Limiarização de uma M.O por meio do software ImageJ aplicado para identificar a fração porosa do revestimento 80Al20SiC .....	65
Figura 40 - Microscopia Óptica no revestimento aplicado de configuração 60Al40SiC – Aumento de 100x .....	66

Figura 41 - Microscopia Óptica do revestimento 60Al40SiC em diferentes aumentos .....	66
Figura 42 - Processo de Limiarização de uma M.O por meio do software ImageJ aplicado para identificar a fração porosa do revestimento 60Al40SiC .....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos processos de aspersão térmica .....	24
Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos processos de aspersão térmica.....	24
Tabela 3 – Configurações do composto .....	38
Tabela 4 – Parâmetros e valores utilizados no processo de aspersão térmica.....	46
Tabela 5 – Condições durante a aplicação do composto Al/SiC .....	46
Tabela 6 – Critério de avaliação dos Ensaios de dobramento para aprovação das camadas.....	48
Tabela 7 – Rugosidade média dos Corpos de prova .....	58
Tabela 8 – Espessura média do Revestimento Al/SiC .....	59
Tabela 9 – Resultados do Ensaio de Adesão para o Revestimento Al/SiC.....	60
Tabela 10 – Fração de poros e óxidos nos revestimentos compósitos depositados por Chama Pó .....	67

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>2 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>19</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
3.1 ASPERSÃO TÉRMICA.....	21
3.1.1 Aspersão térmica a chama (Flame Spray) .....	22
3.1.2 Comparativo dos processos de aspersão térmica.....	24
3.2 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE PARA DEPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO...25	
3.2.1 Limpeza e rugosidade .....	25
3.2.2 Pré-aquecimento do substrato.....	26
3.3 ALUMÍNIO .....	27
3.3.1 Pó de alumínio .....	27
3.3.2 Aplicações .....	28
3.4 CARBETO DE SILÍCIO .....	28
3.4.1 Contexto histórico.....	29
3.4.2 Características .....	29
3.4.3 Aplicabilidade .....	30
3.5 COMPÓSITOS .....	31
3.5.1 Compósitos de matriz cerâmica .....	31
3.5.2 Compósitos de matriz polimérica .....	31
3.5.3 Compósitos de matriz metálica .....	31
3.5.4 Pós compósitos .....	32
3.5.5 Aplicação de materiais compósitos na aspersão térmica .....	32
3.6 PROPRIEDADE DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR AT .....	33
3.6.1 Porosidade, óxidos e microtrincas.....	34
3.6.2 Aderência .....	36

<b>4 METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)</b> .....	<b>37</b>
4.1 PREPARAÇÕES DOS PÓS PARA ASPERSÃO .....	37
4.1.1 Materiais Utilizados .....	37
4.1.2 Preparação do pó de alumínio .....	38
4.1.3 Preparação do pó de carbeto de silício .....	38
4.1.4 Composição do composto - Pesagem.....	38
4.2 MOAGEM.....	39
4.2.1 Produção do pó compósito.....	39
4.3 PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO .....	42
4.3.1 Limpeza do Substrato.....	43
4.3.2 Medição de Rugosidade.....	43
4.4 DEPOSIÇÃO POR ASPERSÃO TÉRMICA DO COMPÓSITO Al/SiC .....	44
4.5. CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO.....	47
4.5.1 Espessura de camada.....	47
4.5.2 Ensaio de dobramento .....	47
4.5.3 Ensaio de Adesão .....	49
4.5.4 Preparação das amostras por metalografia.....	51
4.5.5 Microscopia Óptica (MO).....	51
4.5.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) .....	52
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>53</b>
5.1 FORMAÇÃO DO PÓ COMPÓSITO .....	53
5.1.1 Microscopia eletrônica por varredura aplicada na mistura Al/SiC .....	56
5.2 RUGOSIDADE E ESPESSURA DO REVESTIMENTO .....	58
5.3 DOBRAMENTO.....	59
5.4 ADESÃO DO REVESTIMENTO.....	60
5.5 MICROSCOPIA ÓTICA (MO).....	63

<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>69</b>
---------------------------	-----------



## 1 INTRODUÇÃO

A aplicação de revestimentos protetores, com finalidades de engenharia, inicialmente era requerida para proteção de conjuntos e componentes mecânicos contra a corrosão. Devido ao avanço de pesquisas no desenvolvimento de novos materiais, atualmente os revestimentos são utilizados também para elevar a resistência ao desgaste, a corrosão, como isolamento térmico e elétrico e contra incompatibilidades químicas e biológicas (PAREDES, 2009).

Todos os materiais que passam pelo processo de aspersão térmica apresentam uma porcentagem de poros, podendo ela ser alta, média ou baixa, as quais se concentram entre as partículas que se achatam e aderem-se às irregularidades da superfície. A porosidade se forma dependendo do processo utilizado e a velocidade com que as partículas são depositadas no substrato, causando grande influência sobre os materiais aspergidos e degradando as propriedades mecânicas (LIMA, 2007).

De acordo com a literatura (BERNECCKI, 1992; KREYE, 1990; CORTÉS, 1998) as melhores propriedades dos revestimentos são através do alumínio (Al), que confere maior aderência e menor porosidade. Podendo ser alcançadas através de processos a arco elétrico (EA) ou a chama de alta velocidade (HVOF). Apesar disso, o mais antigo e convencional processo a chama oxiacetilênica (FS) ainda desperta grande vantagem pelo baixo custo do equipamento, sua aplicação, facilidade no manuseio da pistola e operação do equipamento.

PAREDES (2006) ainda caracteriza o alumínio como um material que quando depositado por chama oxiacetilênica pó – *Flame Spray Powder* (FSp), fornece ao substrato proteção contra a corrosão por um longo período de tempo, uma vez que este material, por possuir afinidade com o oxigênio, forma uma camada fina, aderente e protetora de óxido de alumínio (alumina) quando exposta à atmosfera oxidante. Explicando assim, o motivo de o Al, ser um dos materiais mais utilizados para proteção contra corrosão.

As combinações e as faixas das propriedades dos materiais foram, e ainda estão sendo ampliadas pelo desenvolvimento de materiais compósitos. De uma maneira geral, um compósito pode ser considerado como qualquer material multifásico que exibe uma proporção significativa das propriedades de ambas as fases

que o constituem, de modo tal que é obtida uma melhor combinação de propriedades. (CALLISTER; RETHWISCH; 2012).

A utilização de materiais compósitos de matriz Al tem sido amplamente estudada e aplicada na indústria automotiva e aeronáutica devido a relação peso-resistência. Para o melhoramento das propriedades de resistência mecânica e ao desgaste, partículas de materiais cerâmicos são usados como reforçante, dentre os quais dois se destacam, SiC e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Enquanto o SiC é utilizado pensando para aplicações em alta temperatura devido seu baixo coeficiente de expansão térmica e alta condutividade térmica, o Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aumenta a força e resistência à trinca por fadiga (KARBASI, et., 2013).

Com base nas considerações, o presente trabalho tem como objetivo geral obter um revestimento compósito de Al/SiC aplicado por aspensão térmica chama pó em substratos de aço carbono 1020 procurando associar o processo de deposição (cada proporção utilizada) com os benefícios encontrados.

Como objetivos específicos, esta pesquisa pretende:

Obter um pó compósito a partir da mistura dos pós de Al e SiC por meio de um processo de moagem rápida - MR;

Depositar o compósito obtido por AT para formar um revestimento sobre um substrato de aço carbono.

Estudar e determinar os parâmetros de mistura, quantidade e granulometria ideal para o processo de deposição;

Observar o desempenho desses revestimentos por meio de ensaios de aderência e dobramento.

Avaliar a morfologia do revestimento por Microscopia Óptica e Microscopia Eletrônica de Varredura;

Contribuir para o desenvolvimento da tecnologia para revestimentos sobre aços carbono para aplicações na indústria.

## 2 JUSTIFICATIVA

A aspersão térmica tornou-se uma parte importante da indústria moderna, muito devidamente a proteção de materiais contra corrosão. É um importante segmento de pesquisa para o desenvolvimento tecnológico e inovação para o setor petrolífero, já que esta área sofre com degradação dos materiais devido à corrosão por sulfidização e oxidação.

Este trabalho pretende obter um revestimento com fácil repetibilidade através da Aspersão Térmica – Chama Pó (FSp), a partir do pó compósito desenvolvido que combine aumento da resistência ao desgaste e corrosão por meio da moagem e deposição de pós de alumínio e carvão de silício. No que diz respeito ao controle do processo, o revestimento vai ser caracterizado por meio das propriedades mecânicas obtidas. Espessura de camada, porosidade, rugosidade, adesão e dobramento serão características verificadas durante o estudo.

A escolha de utilizar a mistura dos pós de alumínio e carvão de silício empregando matriz metálica em alumínio se dá exclusivamente pelas propriedades superficiais esperadas do compósito formado, uma vez que revestimentos com resistência ao desgaste e abrasão são bastante requeridos devido a ampla variedade de aplicações dentro da indústria.

A formação de revestimentos compósitos de matriz metálica com reforço cerâmico é uma solução interessante, pois possibilita a melhoria simultânea do revestido com relação ao desgaste e corrosão. A dificuldade de apresentar uma técnica de deposição barata e fácil que assegure resultados é o que torna esta pesquisa importante do ponto de vista de aplicabilidade no setor industrial.

Espera-se que a partir desta pesquisa, outros alunos sejam instigados ao estudo e desenvolvimento de projetos sobre os efeitos que os revestimentos por Aspersão térmica (AT) causam nos substratos.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ASPERSÃO TÉRMICA

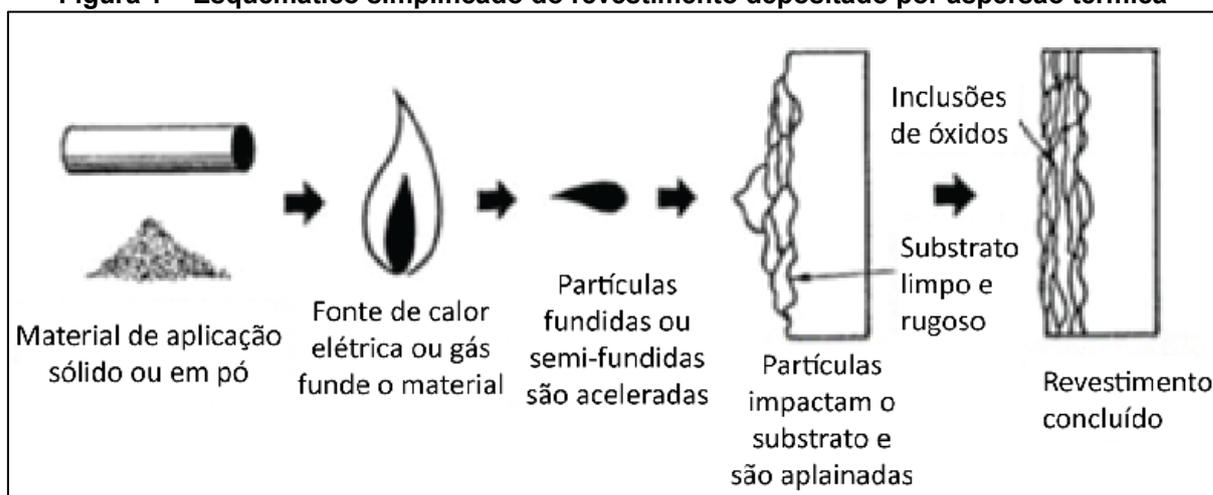
Segundo Paredes (2009), de forma simples a aspersion térmica é definida como um grupo de processos por meio dos quais é depositado sobre uma superfície previamente preparada (substrato), uma camada de materiais. Estes materiais são depositados na forma de partículas finamente divididas, na condição fundida ou semifundida, e ao se chocarem na superfície, as partículas se conformam e aderem às irregularidades, formando um revestimento com estrutura lamelar (MARQUES, 2003).

Os materiais utilizados no processo de aspersion podem ser fornecidos na forma de varetas, arame, tubos e pó. Estes podem ser metais, óxidos, compostos intermetálicos, pós compósitos, cermets, plásticos orgânicos e alguns vidros.

Os processos de aspersion térmica são específicos e gradativamente possuem a mesma importância tanto para fabricação quanto manutenção, ou seja, cada situação deve ser bem definida para permitir que a escolha do tipo de aplicação seja adequada e assim produzir uma melhor qualidade no resultado final, seja na construção ou recuperação de uma peça ou componente (MARQUES, 2003).

A seguir na figura 1, é mostrado de forma simplificada o processo de formação de um revestimento depositado por aspersion térmica.

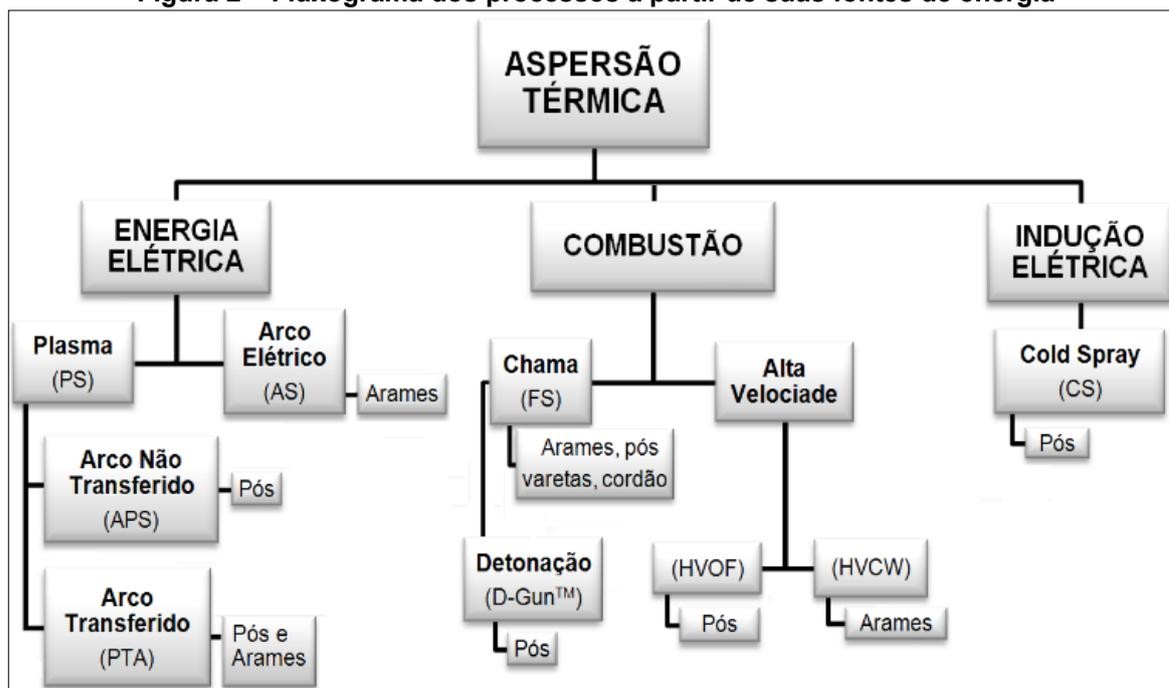
**Figura 1 – Esquemático simplificado do revestimento depositado por aspersion térmica**



Fonte: Unger (2003)

Conforme Sucharski (2012) os processos por aspersão térmica são classificados por meio da matéria-prima que utilizam (arames, pós, varetas ou cordões flexíveis), pela forma de aceleração de partículas (ar comprimido ou gás inerte) e também pela forma de aquecimento (combustão ou eletricidade), os quais estão representados dentro da figura 2, classificados conforme os grupos onde se encontram: energia elétrica, combustão e indução elétrica.

**Figura 2 – Fluxograma dos processos a partir de suas fontes de energia**



Fonte: Sucharski (2012)

Para realizar esta pesquisa será utilizado o processo de aspersão térmica a chama pó (FSp), com o material na forma de pó, proveniente da mistura de Al + SiC através da moagem dos pós em ambiente controlado. Os tópicos seguintes farão uma revisão sobre este e outros métodos como forma de comparação dos demais processos, incluindo vantagens e desvantagens. Além de um embasamento teórico da aplicabilidade desta mistura em revestimentos por chama pó.

### 3.1.1 Aspersão térmica a chama (Flame Spray)

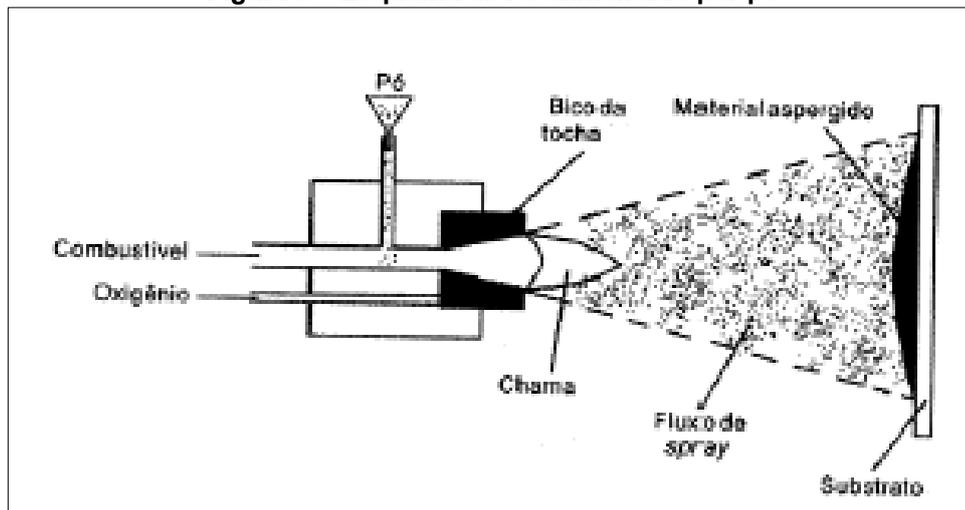
O processo de aspersão térmica por chama é comumente chamado de chama oxiacetilênica devido a mistura de oxigênio e gás combustível acetileno, composto que através da combustão funde o material de alimentação (pó ou arame),

o qual é acelerado através de um jato de ar comprimido ou gás inerte (argônio ou nitrogênio) e depositado sobre a superfície previamente preparada.

Este é o processo mais simples e versátil, pois é utilizado em metais, ligas, cerâmicas e plásticos (PAREDES, 2009). Segundo Clare (1982) o processo FS apresenta valores de aderência satisfatórios para serviços de menor responsabilidade, devido as baixas temperaturas e velocidade, se processa primeiramente por ancoragem (mecanismo mecânico), ou seja, exige-se uma limpeza rigorosa e rugosidade apropriada do substrato antes da deposição do material aspergido.

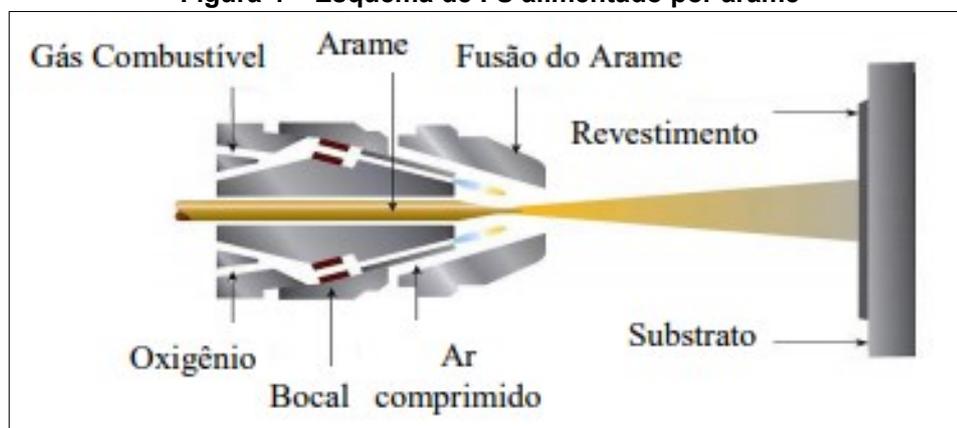
O princípio de funcionamento pode ser observado através das figuras 3 e 4, sendo respectivamente alimentação pó e arame.

**Figura 3 – Esquema de FS alimentado por pó**



Fonte: Lima (2007)

**Figura 4 – Esquema de FS alimentado por arame**



Fonte: Oerlikon (2016)

No caso da aplicação do processo com o material na forma de arame ou vareta, deve-se possuir um sistema de alimentação tracionando o arame para dentro do equipamento, este pode ser feito através de um motor elétrico, pneumático ou por turbina a ar (PAREDES, 2009).

### 3.1.2 Comparativo dos processos de aspersão térmica

As tabelas 1 e 2 apresentam alguns dos principais parâmetros nos processos de aspersão térmica e podem ser utilizadas para caracterizar as diferenças entre eles.

**Tabela 1 – Características dos processos de aspersão térmica**

Processos	Vazão de gases (m³/h)	Temperatura média de chama (°C)	Velocidade de impacto das partículas (m/s)	Aderência relativa (1 a 10)	Custo relativo (1 a 10)	Teor de óxidos (%)
Chama (Pó)	11	2200	30	3	3	6
Chama (Arame)	71	2800	180	4	3	4
Arco elétrico (Arame)	71	5500	240	6	1	0.5 - 3
Plasma	4.2	5500	240	6	5	0.5 - 1
Detonação	11	3900	910	8	10	0.1
HVOF	28-57	3100	610 - 1060	8	5	0.2

**Fonte: Thorpe, 1993 (adaptado de Paredes, 2009)**

**Tabela 2 – Vantagens e desvantagens dos processos de aspersão térmica**

Processos	Vantagens	Desvantagens
Detonação	Excelente coesão; Camada com baixo índice de porosidade; Grau de acabamento muito bom	Operações devem ser automatizadas; Ambiente necessita proteção acústica; Operações devem ser controladas a distância
Chama Oxiacetilênica	Permite aplicação de 3 tipos de camadas	Aderência prejudicada; Oxidação das partículas pelo contato com o ar comprimido
Arco elétrico	Maior aderência; Maior coesão	Aderência prejudicada; Oxidação das partículas pelo contato com o ar comprimido
HVOF	Menor porosidade; Maior dureza; Maior adesão	Requer maior atenção devido a utilização de combustíveis inflamáveis
Plasma	Melhor aderência; Porosidade reduzida; Menor quantidade de óxidos	Mão de obra especializada

**Fonte: Thorpe, 1993 (adaptado de Paredes, 2009)**

## 3.2 PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE PARA DEPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO

Segundo Marques (2008), a preparação da superfície é a etapa mais crítica da operação, a adesão do revestimento está diretamente relacionada a limpeza e a rugosidade da superfície do substrato escolhido. Deve-se aplicar rigorosamente os procedimentos padrão a fim de garantir o resultado esperado. Outro fator tão importante quanto a limpeza é a escolha do tipo de material do revestimento e do substrato, uma vez que estes determinam o processo e a qualidade de preparação necessária para se obter uma adesão satisfatória.

### 3.2.1 Limpeza e rugosidade

A primeira etapa para o preparo do substrato é garantir que a superfície esteja livre de qualquer tipo de contaminante, como óleo, graxa, tinta, ferrugem e umidade. Isto porque, qualquer nível de contaminação pode levar ao impedimento de adesão entre revestimento e substrato (LIMA; TREVISAN, 2007).

A limpeza pode ser realizada tanto de forma química como mecânica, o jateamento é a técnica mais utilizada para obtenção de uma limpeza e rugosidade da superfície do MB (material base). Consiste na propulsão de partículas abrasivas na direção do substrato através de ar comprimido atuando como um lixamento da região, pode-se utilizar qualquer tipo de material com dureza menor ou igual a 55 HRC (Rockwell C). Para caracterizar o tipo de limpeza é necessário aplicar a norma ISO 8501-1, que classifica os graus de limpeza Sa.

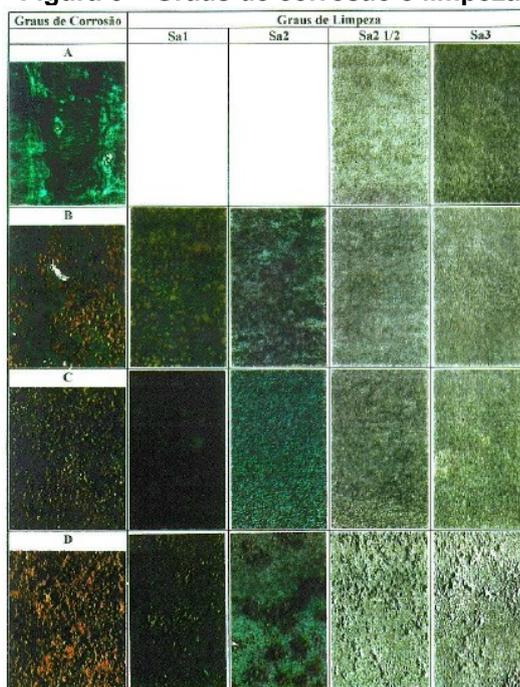
- *Grau Sa 1*: A superfície deve estar isenta de óleo, gordura, sujeiras visíveis, ferrugem, tinta e matérias estranhas de fraca aderência.
- *Grau Sa 2*: A superfície deve ser isenta como a de grau 1 e todos seus contaminantes residuais devem permanecer firmemente aderentes.
- *Grau Sa 2½*: A superfície deve ser isenta como a de grau 1 e 2, quaisquer resíduos remanescentes de contaminação devem aparecer somente como ligeiras marcas sob a forma de manchas ou riscas.
- *Grau Sa 3*: A superfície deve ser isenta como a de graus anteriores e sua superfície deve apresentar uma cor metálica uniforme.

A norma ISSO 85501-1 também classifica os graus de corrosão em superfícies de aço.

- *Grau A*: Superfície do aço completamente coberta de carepa de laminação intacta e aderente, com pouca ou nenhuma corrosão.
- *Grau B*: Superfície do aço com princípio de corrosão atmosférica da qual a carepa de laminação tenha começado a desagregar.
- *Grau C*: Superfície do aço da qual a carepa de laminação tenha sido removida pela corrosão atmosférica ou possa ser retirada por meio de raspagem.
- *Grau D*: Superfície do aço da qual a carepa de laminação tenha sido removida pela corrosão atmosférica e que apresenta corrosão alveolar de severa intensidade.

A figura 5 torna visível os graus de corrosão e limpeza, prevendo a inspeção da superfície através de padrões da norma sueca SIS 055900/67.

**Figura 5 – Graus de corrosão e limpeza**



Fonte: Norma SIS 055900/67

### 3.2.2 Pré-aquecimento do substrato

O pré-aquecimento é também uma atividade que faz parte do processo de preparação da superfície, este tem por objetivo volatilizar graxas, óleos e umidade que

estão retidos junto à superfície do metal. É possível fazê-lo utilizando a própria pistola de aspersão térmica, por um equipamento independente ou até mesmo por indução, quando a peça possui tamanho apropriado. Em (PETROBRAS, 2011) as temperaturas recomendadas para o substrato estão na faixa de 90 a 150 °C, segundo Kreye (1990) 250 °C é uma temperatura de pré-aquecimento adequada para reduzir tensões e o gradiente térmico.

Devido ao choque entre partícula e substrato há um resfriamento muito rápido, formando uma espécie de contração no material depositado, enquanto o substrato se dilata ao absorver a energia de impacto (cinética) contida nas partículas, junto da energia transferida pela chama durante a aplicação, ocorre tensões contrárias na interface substrato/camada denominada tensões internas, Assim, o pré-aquecimento também atua na redução das tensões internas e que por sua vez melhora a aderência e coesão da camada (PAREDES, 1998).

### 3.3 ALUMÍNIO

Segundo Callister; Rethwisch (2012) o alumínio possui estrutura cúbica de face centrada (CFC) que é estável entre -269 °C até 660 °C. Essa estrutura cristalina garante ao alumínio uma alta ductilidade até mesmo em temperaturas reduzidas.

A gama de produtos e propriedades mecânicas que podem ser desenvolvidas a partir do alumínio e suas ligas tornam ele um dos metais mais importantes para produção de peças nas indústrias espaciais, aeronáutica, automotiva naval e etc. A resistência mecânica do alumínio aumenta por meio da deformação plástica a frio e na formação de ligas, no entanto, estes mecanismos reduzem a resistência a corrosão que é uma das propriedades mais importantes na utilização do alumínio, juntamente com a densidade (2,7 g/cm<sup>3</sup>), uma vez que ela chega a ser aproximadamente um terço a do aço (8,93 g/cm<sup>3</sup>) ou latão (8,53 g/cm<sup>3</sup>) (CALLISTER; RETHWISCH; 2012; BRADY et., 2004).

#### 3.3.1 Pó de alumínio

Inicialmente o pó de alumínio era obtido por meio da folha de alumínio, usando o processo de estampagem a seco, no entanto, os moinhos utilizados na

fabricação de pós como de ouro eram ineficientes quando utilizados com o alumínio, devido a mistura metal/ar ser explosiva em algumas proporções. Na época o pó era utilizado apenas como matéria-prima para produzir pigmentos semelhantes a forma de “faca”, de ponta angular e corpo mais largo. O pó de alumínio como conhecido atualmente veio com a descoberta do processo de atomização e criação do moinho de bolas, para atender principalmente necessidades militares nos anos pós primeira guerra (K.L,1994; E.J, 1998).

### 3.3.2 Aplicações

Assim como as propriedades associadas ao alumínio é um fator determinante para o uso como material para revestimento, o pó de alumínio é muito utilizado para o desenvolvimento de peças que necessitam peso leve, resistência a corrosão, usinabilidade e variação de acabamento. O principal propulsor dessa aplicação é a tecnologia chamada metalurgia do pó, devido a capacidade de produzir peças complexas em forma líquida ou quase líquida e que pouco necessita de usinagem no acabamento. Este mercado está se desenvolvendo muito velozmente e através do pó de alumínio e a tecnologia de solidificação rápida se produz materiais que combinam, resistência a corrosão, dureza, fadiga, e desempenho em temperaturas elevadas que as ligas convencionais não atingem (ÜNAL et.,1998).

Assim como o pó de alumínio está sendo utilizado para formação de compósito nesse estudo, segundo Ünal et. (1998), o próximo passo é usá-lo juntamente com pós não-metálicos afim de produzir materiais compósitos com propriedades físicas controladas, como rigidez, fadiga e desgaste. Estes, serão aplicados na indústria aeroespacial.

### 3.4 CARBETO DE SILÍCIO

É um mineral artificialmente cristalino, preto-azulado, de composição SiC com uma dureza Knoop (microdureza) de 2500, muito utilizado por suportar temperaturas no ponto de decomposição 2301 °C. Além de manter sua resistência em temperaturas altas devido a sua baixa expansão térmica (BRADY et., 2004).

### 3.4.1 Contexto histórico

O carbetos de silício foi descoberto na tentativa de se produzir diamantes artificiais em 1891. Através da mistura de argila com pó de coca em uma panela de ferro, o resultado foram cristais verdes e brilhantes ligados ao eletrodo de carbono. Esse composto foi inicialmente utilizado para polimento devido a sua dureza e posteriormente vendido a um preço comparável ao pó de diamante.

Em 1903 houve uma publicação também com a descoberta do carbetos, no entanto esse era proveniente da mistura de quartzo e carbono. O SiC existe em forma natural e foi encontrado no Arizona em 1893, no meteorito Canyon Diablo (TIKKANEN, 2008).

### 3.4.2 Características

Os carbetos são a base da classe de cerâmicas avançadas, com infinitas aplicações. Os campos da engenharia mecânica, indústria de ferramentas, motores, óptica, eletrônica, nuclear e química são algumas das aplicações.

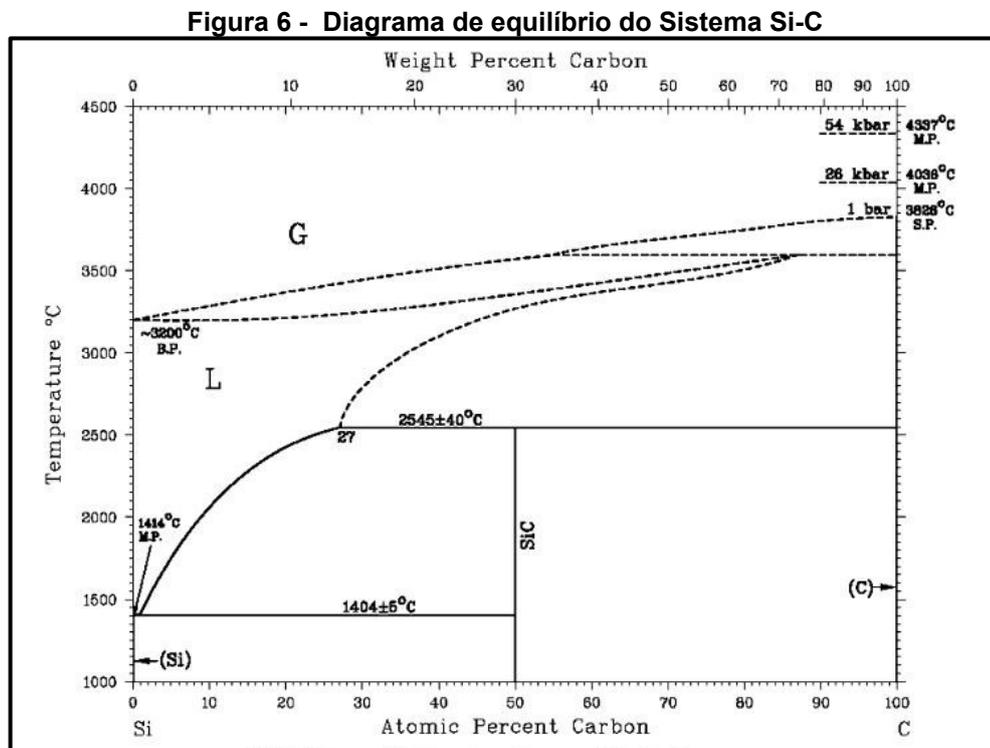
Os carbetos do ponto de vista químico, são compostos nos quais o carbono é combinado com elementos menos eletronegativos de um metal, ou semimetal. Como o carbono é um dos elementos químicos mais abundantes em massa, somado o fato dele ser um elemento que permite ligação nos 4 elétrons livres, esse elemento acaba formando mais compostos do que qualquer outro disponível da crosta terrestre. Eles podem ser classificados conforme sua composição química, ligação química, método de fabricação, forma física ou de acordo com suas aplicações (MATOVIC; YANO; 2013)

Segundo Lee e Rainforthe (1994) o carbetos de silício (SiC) é classificado como carboneto equivalente, uma vez que a eletronegatividade é muito semelhante ao próprio carbono e, portanto, formam carbonetos de alto grau de ligação covalente. A diferença na eletronegatividade dos átomos de C e Si (1,5 e 1,8 = 0,7) indica que o caráter iônico da relação é mais ou menos de 10%. A força de adesão do SiC é de cerca de 300KJ / mol, o diamante é 365 KJ / mol. O átomo de silício é apenas ligeiramente maior que o de carbono. As principais características do SiC são:

- Composto não-metálico;

- Possui baixo peso atômico;
- Baixa densidade;
- É um material extremamente duro e forte;
- Excelente refratário (alto ponto de fusão, estabilidade térmica e química);
- Pode ser usado como semicondutor;

Segundo Shaffer (1969) O carbeto de silício é o único composto estável no sistema silicocarbon, possui fase binária com uma composição de 70,05% de peso em silício e 29,95% em peso de carbono, como mostra do diagrama de equilíbrio do sistema Si-C abaixo na figura 6.



Fonte: Matovic; Yano (2013)

### 3.4.3 Aplicabilidade

Partículas do carboneto são usadas como reforços em compostos de liga de alumínio, servem também como reforço na formação de compósitos para matriz metálica ou cerâmica. Em forma de fibra, possui vantagens sobre as fibras de carbono, como resistência à oxidação em altas temperaturas até 1800 °C, resistência à compressão e resistência elétrica (BRADY et., 2004).

### 3.5 COMPÓSITOS

São materiais que tem por objetivo atingir uma combinação de propriedades que não é exibida por um material isolado, ou seja, são formados por dois ou mais materiais, os quais podem ser metais, cerâmicas e polímeros. A primeira classificação que se faz é com relação à matriz (fase contínua) e posteriormente o reforço (fase reforçante) (CALLISTER; RETHWISCH; 2012).

#### 3.5.1 Compósitos de matriz cerâmica

Os materiais cerâmicos apresentam alto ponto de fusão, dureza, módulo de elasticidade, resistência à corrosão, e baixa densidade. São os materiais mais utilizados para fins estruturais, no entanto, possuem fragilidade e, conseqüentemente, baixa confiabilidade em serviço. Os compósitos de matriz cerâmica (CMC's) são capazes de manter excelente resistência e tenacidade à fratura em altas temperaturas e são os principais materiais para essas aplicações (GENELIN, 2008).

#### 3.5.2 Compósitos de matriz polimérica

Os materiais poliméricos possuem ponto de fusão, dureza e módulo elástico inferiores aos materiais cerâmicos e metálicos, essas características simplificam os processos de fabricação, o que torna o custo de fabricação baixo e por isso tornam os polímeros mediante a utilização de reforço um material com extensa aplicação automotiva.

#### 3.5.3 Compósitos de matriz metálica

Compósitos com matriz metálica (MMC's) são uma classe de materiais com potencial para uma ampla variedade de aplicações, consistem basicamente de uma fase contínua metálica reforçada com um material não metálico. A combinação de baixa densidade, resistência à corrosão e propriedades mecânicas úteis que faz dessas ligas tão populares (ASM INTERNATIONAL, 1992).

### 3.5.4 Pós compósitos

O processo de adição de partículas de uma segunda fase tem sido uma das formas mais bem-sucedidas de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais. Assim como a aplicação de um compósito para a construção ou desenvolvimento de um equipamento transformou a indústria nos últimos anos, conclui-se que a aplicação deste método para deposição de camadas também poderia trazer benefícios para a técnica de aspersão térmica (KARBASI, et., 2013).

Segundo Santos (2005), existe uma grande variedade de métodos físicos, químicos e mecânicos disponíveis para a preparação de pós de tamanhos micro e nano, a definição do método está intrinsecamente ligado as propriedades esperadas, ou seja, as condições do meio são importantes na obtenção da mistura. Dessa forma destaca-se também o custo de produção em escala industrial e laboratorial.

### 3.5.5 Aplicação de materiais compósitos na aspersão térmica

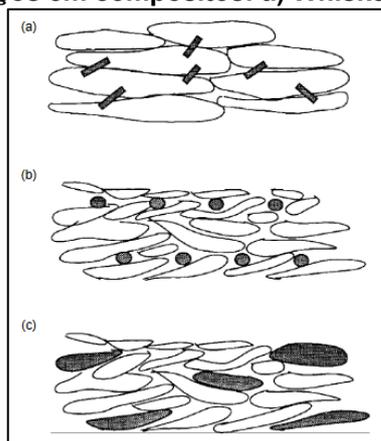
De acordo com Pawlowski (2008), na aspersão térmica, o revestimento só é considerado compósito quando existe uma espécie de mistura de diferentes materiais, podendo ser dividido em duas classes:

- Múltiplos revestimentos, no qual existe camadas de diferentes materiais;
- Composto granulado contendo uma matriz, material de maior concentração e uma segunda fase, chamado “reforço”.

No que se refere a tecnologia, o multi-revestimento é a deposição de diversas camadas de materiais diferentes, sua aplicação não difere do uso convencional de um único material como revestimento.

Na figura 7, pode-se observar os tipos de morfologias possíveis para utilização do reforço em compósito.

**Figura 7 – Tipos de reforços em compósitos: a) Whiskers, b) Fibras, c) Partículas**



**Fonte: Pawlowski (2008)**

Whiskers são caracterizados por serem pequenos monocristais de forma cilíndrica de diâmetros entre 0,05 a 8  $\mu\text{m}$  e comprimento de 3 a 80  $\mu\text{m}$ . Estes podem ser misturados com pós de matriz para obtenção das propriedades desejadas, essa mistura é pulverizada sobre o substrato. O método mais recomendado para implementação homogênea em revestimentos é através da secagem por pulverização (IWANAMOTO et, 1987; BERNDT; YI, 1987).

Fibras são aplicadas em substratos cilíndricos, a matriz é pulverizada de forma a preencher os espaços, este procedimento é repetido até que a espessura do revestimento seja alcançada.

Partículas podem ser preparadas misturando-se com o pó da matriz, outra forma é com a injeção simultânea de dois pós diferentes. Os pós compósitos podem ser preparados na proporção desejada, afim de obter-se as características necessárias (PAWLOWSKI, 2008).

### 3.6 PROPRIEDADE DOS REVESTIMENTOS DEPOSITADOS POR AT

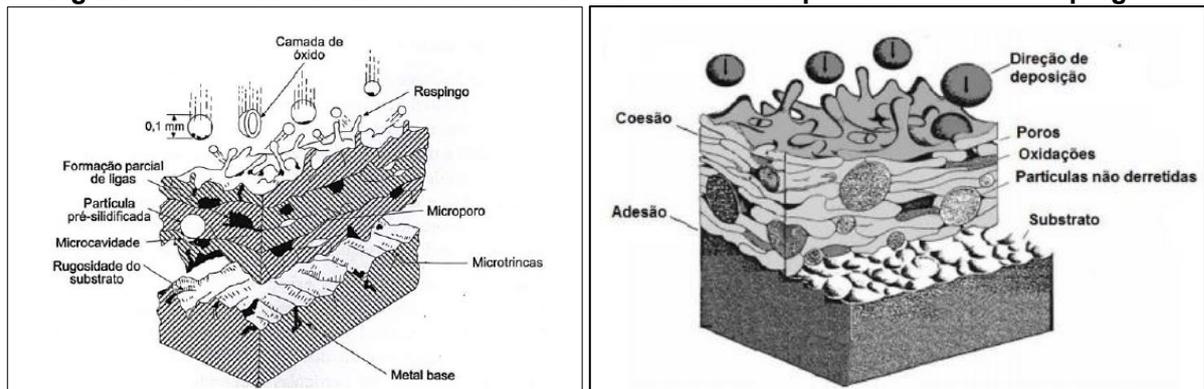
As propriedades do revestimento estão diretamente ligadas com a microestrutura formada nas camadas, a adesão no substrato e a coesão interna entre as partículas dependem das energias térmicas e cinéticas que estão envolvidas juntamente com a atmosfera que envolve as partículas durante a trajetória até o substrato (GOMES, 2016).

Os revestimentos são formados a partir do depósito de sucessivas camadas de partículas fundidas ou semi-fundidas que se solidificam durante o impacto

no substrato. Dessa forma, uma estrutura típica de revestimentos aspergidos é constituída de lamelas do material aspergido, entre a inclusão de óxidos, microtrincas, porosidade e partículas sólidas não fundidas. Segundo Mcpherson (1981) a pouca adesão do substrato está diretamente ligada ao número de partículas não fundidas obtidas durante a deposição do material aspergido (LIMA; TREVISAN, 2007).

A figura 8 detalha de maneira esquemática todo tipo de estrutura típica de um revestimento formada através da aspersão térmica.

**Figura 8 – Desenho detalhado da estrutura lamelar de um típico revestimento aspergido**



Fonte: Cortés (1998); Mendes (2010)

As características dos revestimentos vão depender de um número grande de variáveis, tais como: distância de aplicação, ângulo, velocidade do fluxo, pressão e gás utilizado, material e modo de aplicação, distribuição de tamanho de partículas a serem aspergidas, além das características do substrato como material, temperatura de pré-aquecimento, rugosidade e limpeza (LIMA; TREVISAN, 2007).

Devido a esses números de variáveis a microestrutura do revestimento se torna complexa, porém as camadas de um revestimento serão sempre formadas por “panquecas” sobrepostas como está apresentada na figura 8, onde a estrutura final é composta por um revestimento com trincas, poros, óxidos, interfaces e vazios. Podendo variar em maior ou menor escala de acordo com as variáveis do processo.

### 3.6.1 Porosidade, óxidos e microtrincas

Segundo Paredes (2009), a porosidade pode ser definida como cavidades isoladas ou poros interconectados dentro do revestimento. Ela afeta diretamente as

propriedades física como condutividade elétrica e térmica, diminui coesão das camadas e aderência ao substrato.

Os revestimentos podem apresentar duas formas de porosidade, a macroscópica, que apresenta tamanhos que vão de décimos de nanômetros até décimos de micrômetros. Essa formação acontece durante o preenchimento incompleto dos espaços intersticiais, e também durante os tratamentos pós aspersão. A segunda forma é classificada como porosidade fina ou microscópica, apresenta tamanho na ordem de nanômetros. É formada quando partículas aspergidas não conseguem molhabilidade suficiente sobre as partículas já ancoradas no substrato, surgindo lacunas entre as camadas (PAWLOWSKI, 2008).

A oxidação das partículas normalmente acontece entre o processo de aquecimento, dentro da pistola, até a sua deposição no substrato. Essa oxidação é dependente também do tipo de gás utilizado no transporte e da natureza da partícula (ZHANG, 2006). Segundo Lima e Trevisan (2007), os óxidos encontrados em revestimentos metálicos se mostram em fases mais escuras e alongadas, podendo ser vistos na seção transversal do revestimento como no esquema da figura 8. Essas inclusões podem elevar a dureza do revestimento o tornando quebradiço.

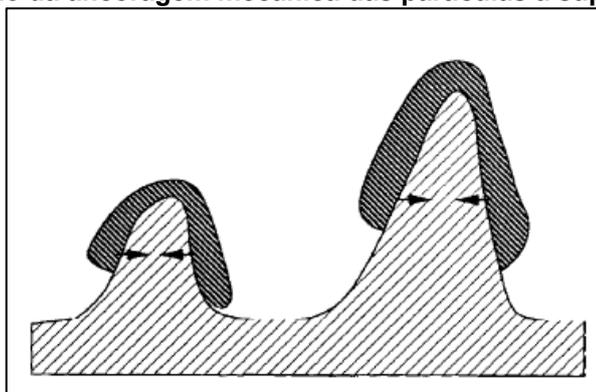
A porcentagem de óxido vai influenciar na qualidade do revestimento, podendo diminuir sua força coesiva, aumentando inclusive a porosidade do revestimento. No caso de um revestimento metálico com a utilização de partículas de alumínio num processo Flame Spray, os teores de óxidos variam de 0,4% até 10%, enquanto a faixa porosa é de 5 a 15%. No entanto, em algumas aplicações a inclusão de óxidos são desejadas, pois aumentam a resistência ao desgaste e diminui a condutividade térmica, assim como a porosidade (BERNDT; YI, 1987; PAREDES, 2009).

A aparição de microtrincas embora seja encontrada em revestimentos aspergidos, somente são aceitáveis em materiais cerâmicos. Isto porque, as microtrincas permitem a deformação do mesmo sob tensões térmicas, ou seja, atuam como um efeito de alívio de tensões, elevando a tolerância a deformação e resistência à fadiga. Estas trincas não são encontradas em materiais metálicos devido a deformação térmica, elas acabam sendo preenchidas através do escoamento plástico (LIMA; TREVISAN, 2007; MENDES, 2010).

### 3.6.2 Aderência

A aderência entre a camada e o substrato é um requisito fundamental para caracterizar um bom revestimento. O ancoramento mecânico depende da rugosidade da superfície do substrato e a coesão entre as partículas faz com que ocorra aderência entre as lamelas conforme a deposição de camadas ocorre, esse processo só acontece devido a força de contração exercida sobre as partículas durante o processo de solidificação (NOVICKI, 2008; PAREDES, 2009).

**Figura 9 – Ilustração da ancoragem mecânica das partículas à superfície do substrato**



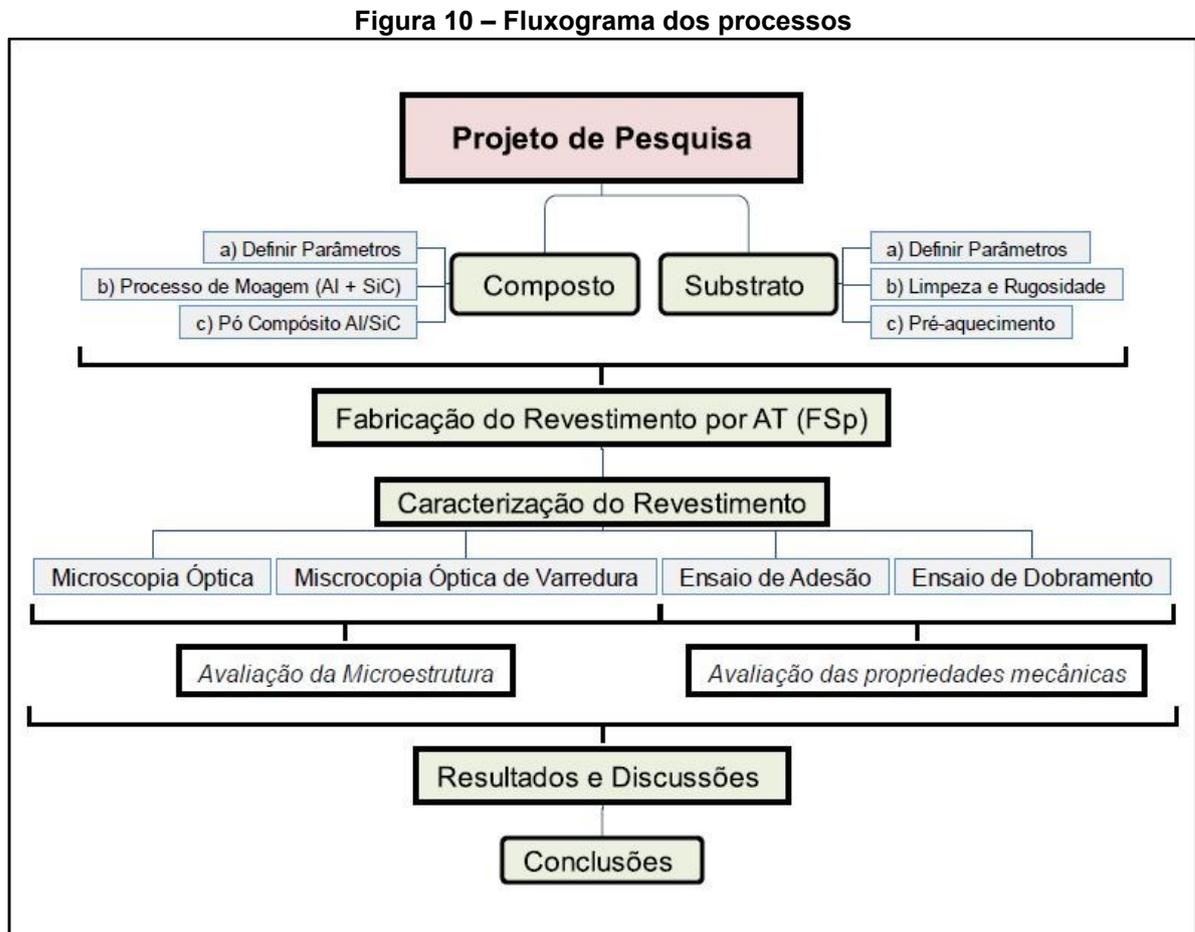
Fonte: Powlowski (2008)

A análise da aderência de um revestimento considera três mecanismos fundamentais, de acordo com a natureza das forças atuantes: ancoramento mecânico, químico-metalúrgico e físico, podendo ser isoladamente ou a combinação dos três. E é influenciada por diversos fatores, como: material do revestimento, condição do substrato, rugosidade, limpeza, temperatura da tocha e temperatura da superfície a ser revestida, antes e durante o processo e velocidade de impacto das partículas no substrato (GOMES,2016; MENDES,2010).

O ancoramento mecânico deve-se à contração ocorrida no resfriamento das partículas aquecidas e aceleradas contra a superfície do substrato (NOVICKI,2008). Já o mecanismo metalúrgico é função da natureza do material e do calor transferido pela partícula a superfície do substrato, promovendo o que se define de microsoldagem (fusão localizada). O mecanismo de aderência física é considerado secundário, corresponde a interação entre os átomos sob a ação das forças de Van Der Waals (PAWLOWSKI, 2008). A figura 9 mostra uma representação esquemática do ancoramento mecânico.

## 4 METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)

A figura 10 apresenta o fluxograma dos processos que foram realizados no decorrer deste trabalho.



Fonte: Autoria própria

### 4.1 PREPARAÇÕES DOS PÓS PARA ASPERSÃO

#### 4.1.1 Materiais Utilizados

Para a deposição dos revestimentos, foram utilizados a mistura dos pós, alumínio (*Metco 54NS-1*) com pureza superior a 98%, partículas entre 75 e 150  $\mu\text{m}$  e SiC (carbeto de silício) que passou por um processo de peneiramento para obter uma faixa granulométrica diferente do Al, especificamente entre 38 e 54  $\mu\text{m}$ , para facilitar

o preenchimento de vazios deixados pelas partículas de alumínio, e consequentemente com objetivo de reduzir a porosidade do revestimento.

O revestimento teve matriz predominante em alumínio visando a inserção de diferentes porcentagens de carbeto de silício na mistura, dessa forma foi possível avaliar as características dos revestimentos encontrados.

#### 4.1.2 Preparação do pó de alumínio

Foi utilizado neste trabalho Alumínio (*Metco 54NS-1*) comercial, fornecido pela ALCOA com pureza superior a 98%. Este pó foi peneirado de forma manual através de peneiras granulométricas de marca TPL fornecidas pelo laboratório de materiais de Engenharia Civil da UTFPR – Câmpus Pato Branco, em malhas da série Taylor com 100#, 150#, 200# e 270#, para obter um tamanho médio de partículas entre 75 e 150  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.3 Preparação do pó de carbeto de silício

O carbeto de silício utilizado foi o F-1000, também fornecido pela ALCOA, com pureza acima de 96%, sem nenhum tratamento químico. Este pó foi peneirado de forma manual, assim como feito com o alumínio, no entanto foi utilizado apenas dois tamanhos de malhas, 200# e 400# respectivamente. Obteve-se tamanho médio de partículas entre 38 e 75  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.4 Composição do composto - Pesagem

Foram utilizadas duas proporções (tabela 3) de partículas diferentes para formação do material a ser depositado (pó compósito), isto porque um dos objetivos específicos do estudo foi investigar a influência das propriedades do SiC dentro do revestimento final do substrato

**Tabela 3 – Configurações do composto**

Configuração	Al	SiC	Al+SiC	Bolas	Relação	Total
A	72g	18g	90g	1530g	17x1	1620g
B	54g	36g	90g	1530g	17x1	1620g

**Fonte: Autoria própria**

## 4.2 MOAGEM

O pó compósito foi produzido através da técnica “Moagem Rápida” (MR). Define-se moagem rápida, neste trabalho, a utilização de um material de dureza maior e tamanho de partícula menor, no caso o carbetto de silício (hóspede), e o outro com tamanho de partícula maior e dureza menor, este sendo o alumínio (hospedeiro). O principal objetivo desta técnica é garantir por meio da moagem que a aplicação por FSp seja feita de forma homogênea, que partículas de menor tamanho e maior dureza sejam “fixadas” nas partículas de maior tamanho e menor dureza (CSANÁDY, 1997; GOMES, 2016).

### 4.2.1 Produção do pó compósito

Esta etapa do processo foi dividida em 3 fases: homogeneização, moagem e separação. Estas, foram reproduzidas para atender os critérios de tamanho do pó e de não contaminação tanto na configuração A, quanto B.

A homogeneização consiste em realizar uma mistura dos dois pós, em um misturador do tipo Y, durante 10 a 15 minutos, seguido de 30min dentro da estufa a 60°C para retirar a umidade e deixar a mistura seca.

A moagem, caracterizada como a segunda fase ocorreu de forma minuciosamente controlada, garantindo-se peso, relação e atmosfera. Ao todo foram 10 amostras de 90 g cada, 5 na configuração A e 5 na configuração B. Para o processo de MR, todos os parâmetros de homogeneização e separação foram equivalentes para as duas configurações, exceto o tempo de processo de moagem, enquanto na configuração A foram 3x5min intercalados com 10 min de descanso em cada MR, a configuração B passou por 3x4min, com os mesmos 10 min entre cada MR.

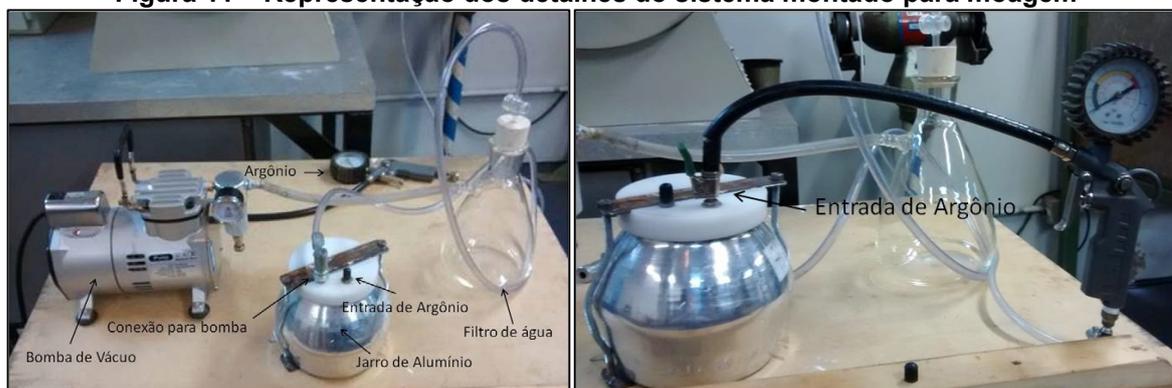
Os tempos utilizados para MR foram curtos e diferentes por 3 motivos: Curtos para que não ocorresse uma interação superior ao necessário das partículas de SiC no Al. Uma vez que a partir de um determinado tempo as partículas de SiC deixam de adentrar no Al e acabam por formar ou aglomerados de tamanhos menores do que o exigido para a deposição, ou uma superfície “protetora” de tamanho acima do desejado impedindo o Al de conduzir o SiC de forma homogênea até o substrato na deposição das camadas durante a aplicação do revestimento. Segundo para que

o alumínio não pudesse sofrer deformação plástica severa, ocasionado por um superaquecimento do material, decorrendo uma perda de resistência a corrosão. E diferentes, porque na configuração B as chances de ocasionar os problemas citados anteriormente seriam maiores devido a porcentagem do SiC ser 40% do composto, o que aumenta a porcentagem de formação de aglomerados de tamanhos menores que o determinado.

De forma que fosse garantida uma interação mecânica entre as partículas no jarro, as esferas utilizadas possuíam tamanhos de 8 e 6 mm. Com uma relação de proporção de 17:1, sendo 90 g de material e 1330 g de esferas, ocupando cerca de 30% do volume de todo o jarro. Utilizou-se um jarro construído em alumínio, com uma tampa produzida em Nylon, permitindo a vedação do sistema durante o processo, garantido assim, a não ocorrência de oxidação do material. Na tampa foram instaladas válvulas de entrada e saída para controlar a atmosfera no interior do jarro.

O sistema montado para esta pesquisa foi equivalente ao mostrado na figura 11, onde utilizou-se uma bomba de vácuo de marca PUMP, para redução de pressão do ar contido no jarro e posteriormente foi introduzida a atmosfera controlada o gás argônio 5.0 com pureza de 99,9%, a fim de minimizar o efeito oxidante do ar durante o processo de MR.

**Figura 11 – Representação dos detalhes do sistema montado para moagem**



**Fonte: (GOMES, 2016)**

O controle da atmosfera foi realizado através do seguinte procedimento: 1 min de vácuo com pressão de 50 bar; 1 min de alimentação de argônio com 1 bar e bomba de vácuo ligada para expulsão completa de todo ar contido no jarro; por fim o argônio foi injetado por mais o tempo necessário até obter pressão interna de 1,5 bar.

Todo procedimento de MR foi realizado em um moinho do tipo “periquito”, modelo CT 242 da Servitech, com dois módulos, 1 CV de potência e rotação máxima de 380 rpm. A figura 12 mostra um modelo equivalente ao que foi utilizado.

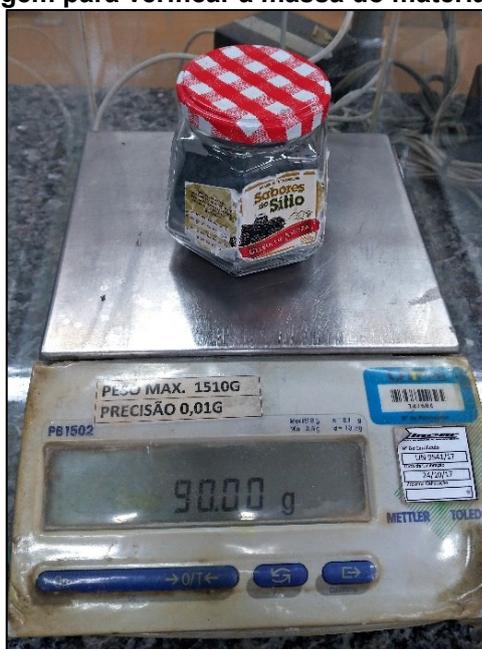
**Figura 12 – Representação do moinho “Periquito” e jarro utilizado**



Fonte Autoria própria

Para cada fim de MR, era feito a separação e pesagem de cada porção granulométrica do material retirado do jarro como mostra a figura 13.

**Figura 13 – Pesagem para verificar a massa do material retirado do jarro**



Fonte: Autoria própria

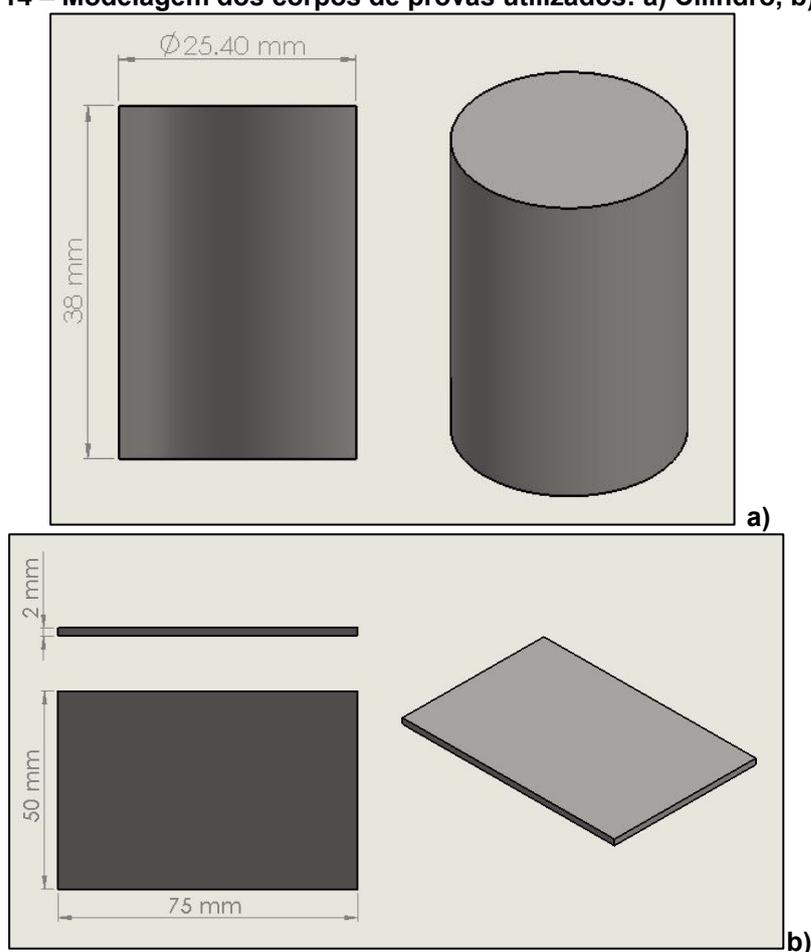
Utilizou-se as peneiras de malha de série de Taylor com as respectivas numerações, 3,5#, 60#, 100#, 200# e 325#. A de 3,5# era necessária para separar as

esferas do pó compósito formado e as subsequentes eram pesadas e catalogadas para posteriormente serem acondicionadas dentro do forno.

### 4.3 PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO

Utilizou-se como substratos corpos de prova de aço SAE 1020, tanto na forma de chapa como cilíndrico. Os cilindros com 25,4 mm de diâmetro x 38 mm de altura, conforme a norma ASTM C 633 para realização do ensaio de aderência. Para o ensaio de dobramento e caracterização das camadas foi utilizado chapas de 75 mm x 50 mm x 2 mm (C x L x A). As figuras 14a) e 14b) mostram respectivamente o modelo esquemático do cilindro e da chapa utilizados. A escolha do material se justifica pelo fato de se tratar de um material acessível, com ductilidade e tenacidade suficientes para atender grande parte das necessidades de serviço, e compõe um custo baixo, conforme especificidade deste projeto.

**Figura 14 – Modelagem dos corpos de provas utilizados: a) Cilindro, b) Chapa**



Fonte: Autoria própria.

#### 4.3.1 Limpeza do Substrato

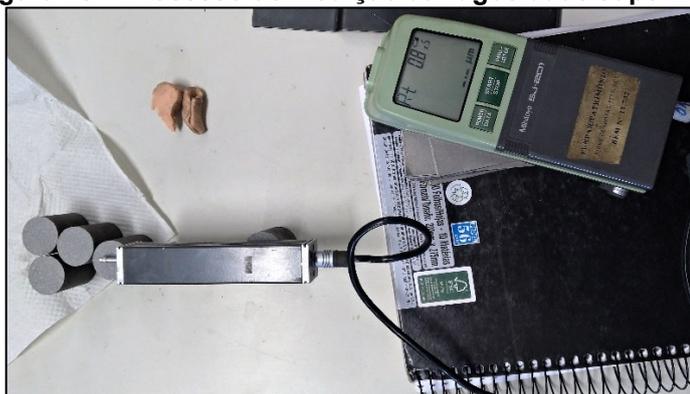
Nesta etapa foram realizadas operações para garantir a limpeza e adequação dos substratos para o processo de aspersão, seguindo as recomendações da norma ISO 8501-1. Para eliminar as impurezas da superfície, a adequação foi realizada com a aplicação de um processo de jateamento abrasivo sobre a superfície a ser depositada. O equipamento utilizado nesta etapa foi uma cabine de marca CMV modelo 65 9075. Utilizou-se como abrasivo a granalha de aço angular (GRIT), com granulometria SAE G-25 (1 – 0,71 mm), utilizando ar comprimido como gás transporte. A pressão de aplicação foi de 60-80 psi, a uma distância de 150 mm por aproximadamente 30 s em cada lote de substrato. Após o processo de jateamento, as amostras foram lavadas com álcool isopropílico seguido de jato de ar comprimido.

Este procedimento garantiu uma superfície com grau de limpeza Sa3, conforme a comparação visual com a norma PETROBRAS N-2568 (1996).

#### 4.3.2 Medição de Rugosidade

Utilizou-se de um rugosímetro de contato mecânico de marca MITUTOYO e modelo SJ-201 apresentado na figura 15, seguindo as normas de medição ABNT NBR 4287:2002.

**Figura 15 – Processo de medição da rugosidade superficial**



**Fonte: Autoria própria**

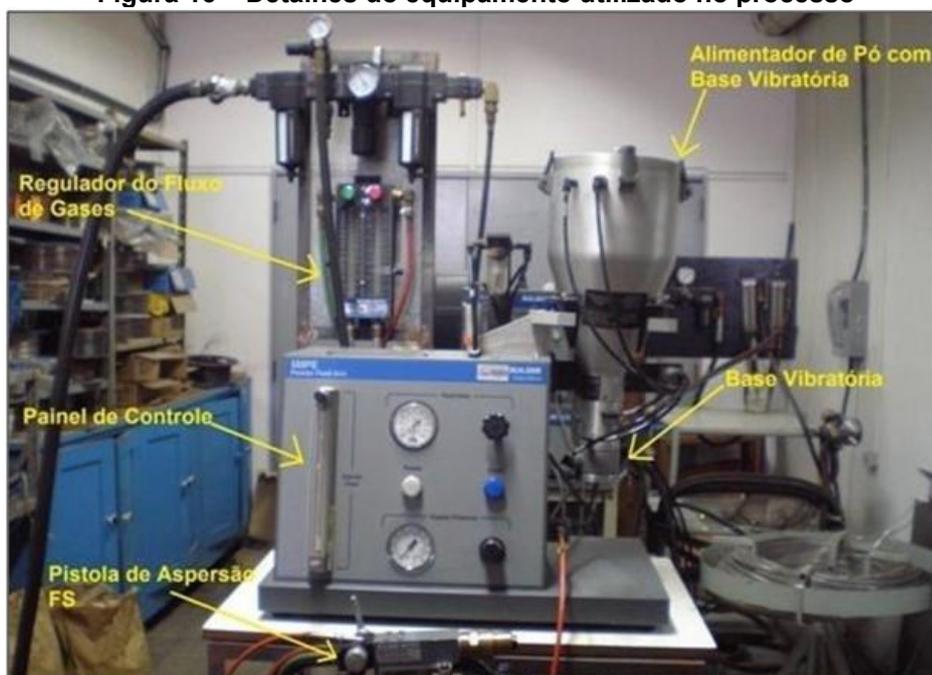
Foram feitas 5 medidas nas chapas e 5 medidas nos cilindros. Segundo a norma PETROBRAS N-2568 (1996) a rugosidade necessária para aplicação do revestimento deve estar entre 60 e 100  $\mu\text{m}$  para o parâmetro de  $R_t$  (rugosidade total).

Já segundo Lima e Trevisan (2007), para a maioria dos revestimentos a rugosidade adequada deve estar entre 2,5 e 13  $\mu\text{m}$  para o parâmetro Ra (rugosidade média). Dessa forma optou-se por seguir os parâmetros correspondentes a Rt, como principal, de forma que o Ra seja apenas complementar durante a análise. Os dados de entrada do medidor de dureza, para todas as medições foram 0,8 de Cut-off com 5 repetições cada.

#### 4.4 DEPOSIÇÃO POR ASPERSÃO TÉRMICA DO COMPÓSITO AL/SIC

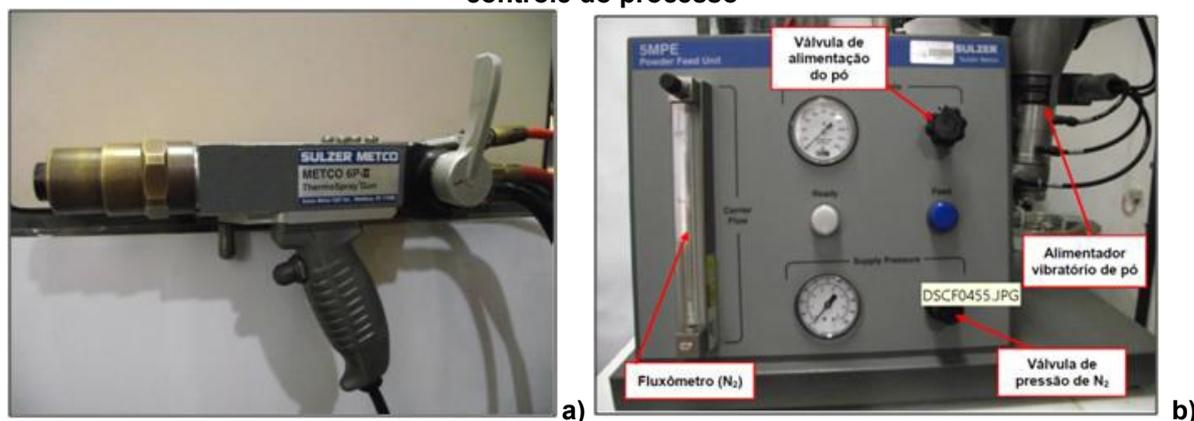
Todo o processo de deposição foi realizado no Laboratório de Aspersão Térmica e Soldagens Especiais (LABATS) do Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC) da UFPR. O equipamento utilizado foi a pistola de modelo METCO 6P-II de fabricação pela Sulzer Metco com uma unidade alimentadora de pó com base vibratória de modelo 5MPE do mesmo fabricante. O detalhe de construção do equipamento está apresentado nas figuras 16 e 17.

**Figura 16 – Detalhes do equipamento utilizado no processo**



Fonte: (LABATS/DEMEC/UFPR, 2012).

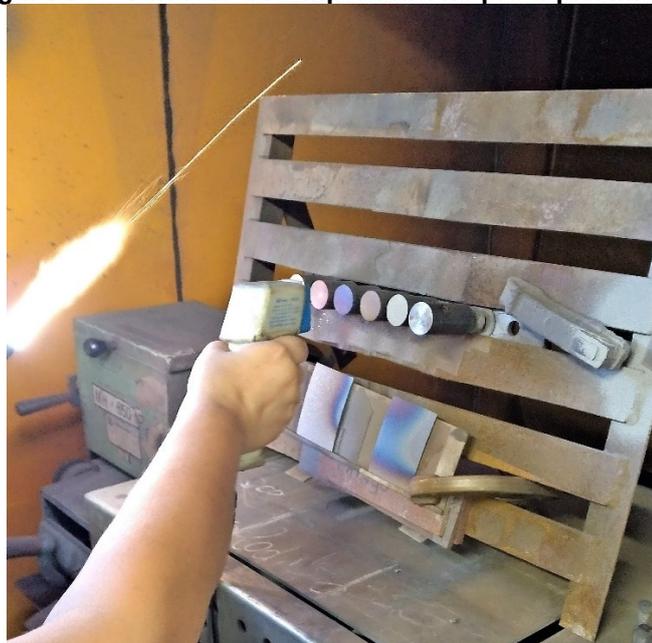
**Figura 17 – Detalhes da pistola e painel de controle: a) Pistola de aspersão, b) Painel de controle do processo**



Fonte: (LABATS/DEMEC/UFPR, 2012).

O pré-aquecimento dos substratos foram feitos a partir da mesma pistola utilizada para deposição do material. Esta foi realizada até a temperatura média do substrato alcançasse 200<sup>o</sup>C eliminando toda ou qualquer camada de óleo, graxa, impureza ou humidade presente na superfície do substrato a fim de minimizar as tensões na interface revestimento/substrato, conforme Kreye (1990) apresenta. Foi controlada a temperatura por meio de um termômetro infravermelho com mira a laser de marca MINIPA e modelo MT-320A. A figura 18 permite a visualização do momento aplicado.

**Figura 18 – Controle da temperatura no pré-aquecimento**



Fonte: Autoria própria

O FSp foi realizado para alcançar uma espessura de revestimento entre 280 – 350  $\mu\text{m}$ , foram 5 passes nos substratos em formato de chapas e 6 passes nos cilíndricos, esse passe a mais deve-se ao fato de que os cilindros serão utilizados para o ensaio de adesão e conforme a norma ASTM C 633 é necessário garantir uma espessura mínima de 300 $\mu\text{m}$  de camada.

A seguir na tabela 4 e 5, encontra-se os valores para as condições e parâmetros utilizados durante a aplicação do revestimento e na figura 19 o momento da aplicação. Estes parâmetros foram determinados previamente, a fim de obter uma baixa porosidade do revestimento. Por questões técnicas, usou-se uma taxa de alimentação de 1 g/s.

**Tabela 4 – Parâmetros e valores utilizados no processo de aspersão térmica**

Parâmetros	Valores aproximados
Pressão do Oxigênio	58 psi (4 bar)
Pressão do Propileno	10.15 psi (70 bar)
Pressão Ar Comprimido	108 psi (7,5 bar)
Taxa de Alimentação	1g/s
Velocidade de deslocamento da Pistola	150 cm/min
Número de passes (Cilindros)	6 passes
Número de passes (Chapas)	5 passes

**Fonte: Autoria própria**

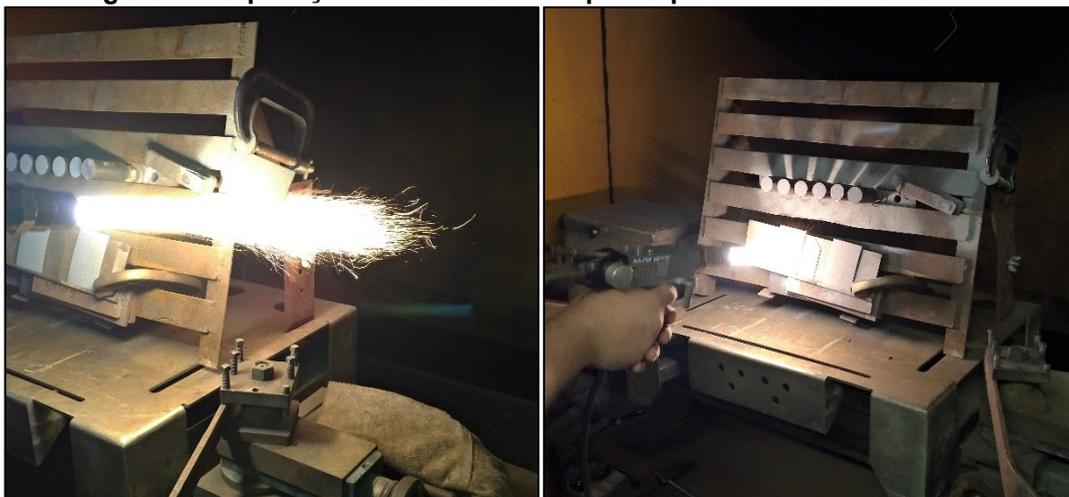
**Tabela 5 – Condições durante a aplicação do composto Al/SiC**

Condições	Configuração A	Configuração B
Umidade Relativa do Ar	50%	44%
Temperatura Ambiente	28 °C	26 °C

**Fonte: Autoria própria**

Através da tabela 5 verifica-se que a aplicação do revestimento respeitou as condições ambientais necessárias antes da aplicação das camadas. Segundo a norma PETROBRAS N-2568 (1996).

**Figura 19 – Aplicação do Revestimento por Aspersão Térmica Chama Pó**



Fonte: Autoria própria

#### 4.5. CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO

Essa etapa é importante pois transforma ensaios e análises em resultados, caracterizar a microestrutura do revestimento é um dos objetivos descritos e foi realizada por meio das seguintes técnicas.

##### 4.5.1 Espessura de camada

A espessura foi medida logo após a aplicação do revestimento, através de micrômetro analógico com resolução de 0,001 mm, desta forma foi possível atingir a espessura pré-estabelecida. Para isso foram realizadas 3 medidas em pontos diferentes em uma amostra do lote aspergido para assegurar a camada desejada.

##### 4.5.2 Ensaio de dobramento

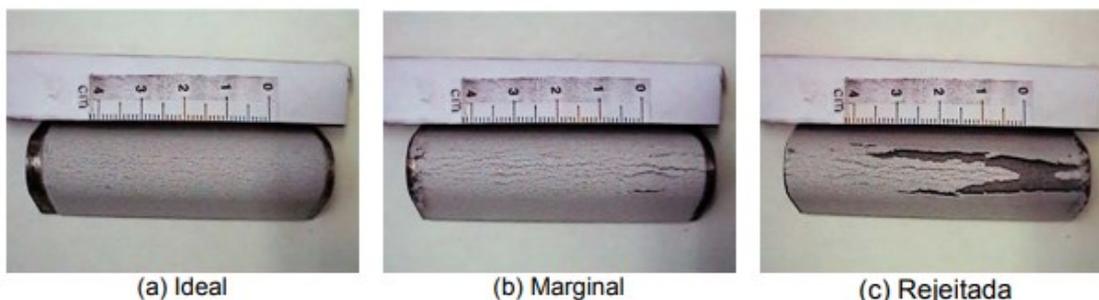
O ensaio foi realizado conforme estabelece os parâmetros determinados na norma PETROBRAS N-2568 (2011), via um dispositivo com um mandril de diâmetro de 13 mm (figura 20). Ainda conforme a norma, após o ensaio é verificado visualmente a região da dobra e a figura 21 e tabela 6 mostram os critérios necessários para aprovação das camadas. Este ensaio foi realizado em dois corpos de prova, um para cada configuração.

**Figura 20 – Equipamento utilizado no Ensaio de Dobramento**



Fonte: Autoria própria

**Figura 21 – Padrões para avaliação visual das trincas em corpos de prova ensaiados por dobramento**



(a) Ideal

(b) Marginal

(c) Rejeitada

Fonte: (Norma Petrobras N-2568, 2011)

**Tabela 6 – Critério de avaliação dos Ensaios de dobramento para aprovação das camadas**

Condição	Aparência da Superfície
Ideal	Sem micro-trincas ou micro-trincas superficiais
Marginal	Contém micro-trincas, sem desgarramento ou deslocamento da camada
Rejeitada	Contém trinca e fendas com desgarramento e deslocamento da camada

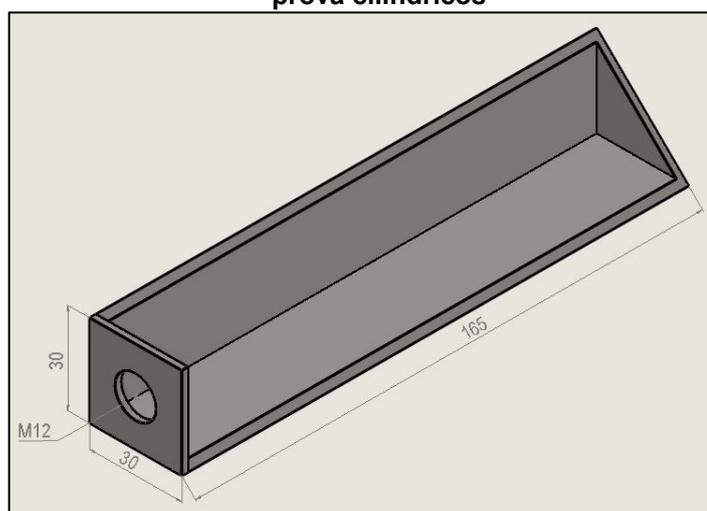
Fonte: (Norma Petrobras N-2568, 2011)

#### 4.5.3 Ensaio de Adesão

Esta etapa seguiu conforme é descrito nas normas ASTM C633 e ABNT NBR 15877, que indicam alguns parâmetros necessários de recomendação para reprodução do ensaio. Trata-se de um método de caracterizar a resistência do revestimento aplicado. O resultado é determinado pela maior tensão obtida no momento do arrancamento ou desprendimento da camada.

O ensaio foi executado em 3 etapas: colagem, aplicação da força e análise. A colagem foi realizada com o adesivo epóxi araldite, de 90 min de cura. De forma que pudesse eliminar o máximo possível de bolhas na mistura do adesivo, utilizou-se um dispositivo ultrassom de modelo L100 e marca Schuster por cerca de 6min, não podendo ultrapassar esse tempo pois a mistura perderia molhabilidade no momento da aplicação. Após aplicado o adesivo, os corpos de prova foram acondicionados em um dispositivo de alinhamento (figura 22) por 24 horas, utilizando pressão de uma mola para garantir o adesivo entre os corpos de prova.

**Figura 22 – Modelagem representativa do dispositivo utilizado para alinhamento dos corpos de prova cilíndricos**

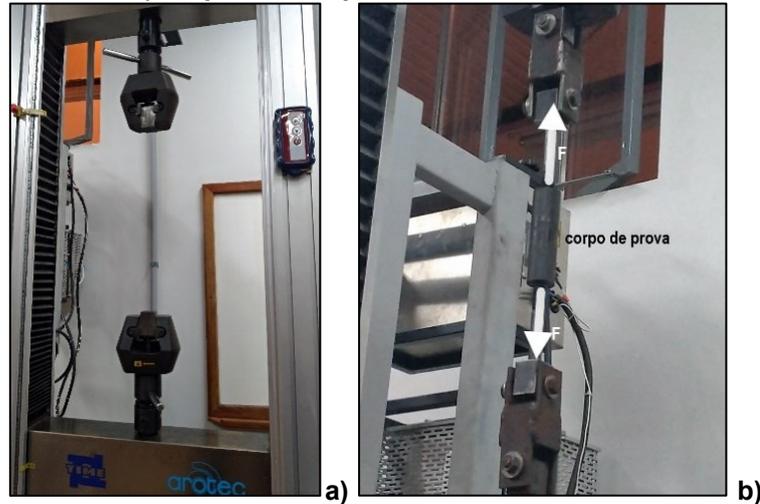


**Fonte: Autoria própria**

A segunda etapa foi realizada por uma máquina Universal de Ensaios, disponível no Laboratório de Ensaios (H005), na UTFPR - Câmpus Pato Branco, conforme mostra a figura 23a), na figura 23b) é ilustrado de forma didática a aplicação da força. Utilizou-se uma velocidade de avanço de 1 mm/min para todas as configurações. Em cada condição foi realizada uma ruptura de dois corpos de prova

para caracterizar a resistência do adesivo, sem nenhuma camada aplicada, exceto o adesivo.

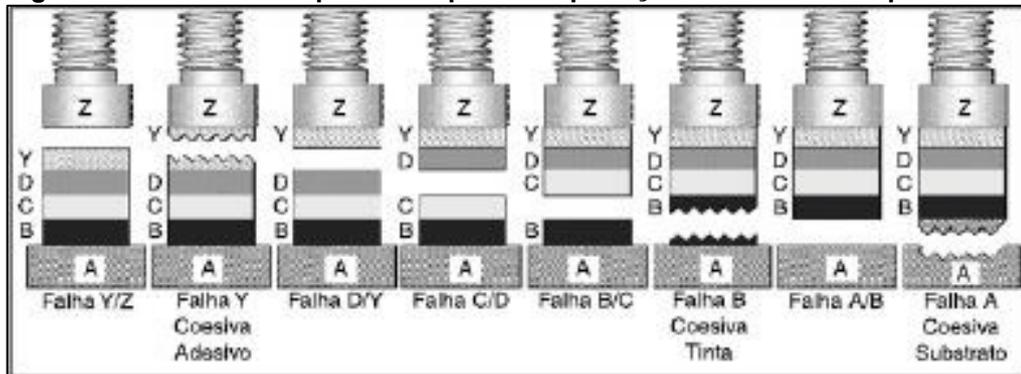
**Figura 23 – Ensaio de adesão realizado na Máquina Universal de Ensaios: a) Máquina Universal de Ensaios, b) Esquema de aplicação de forças durante o ensaio**



Fonte: Autoria própria

Através da terceira etapa é possível examinar os corpos de prova e chegar a um indicativo da falha ocorrida. A figura 24 ilustra os tipos de falhas, podendo ser adesiva, coesiva ou mista.

**Figura 24 – Desenho esquemático para interpretação dos resultados pós ensaio**



Fonte: (NBR 15877,2010)

A falha adesiva é caracterizada quando ocorre na interface recobrimento/substrato, falha coesiva quando ocorre no interior do recobrimento e falha mista, que é na verdade uma combinação das duas anteriores. Quando ocorre uma falha no adesivo significa que a adesão e coesão ficaram acima do limite do adesivo, ou seja, a cola usada possui resistência menor que a camada depositada. As fotografias foram realizadas através da câmera do Smartphone Asus 4.

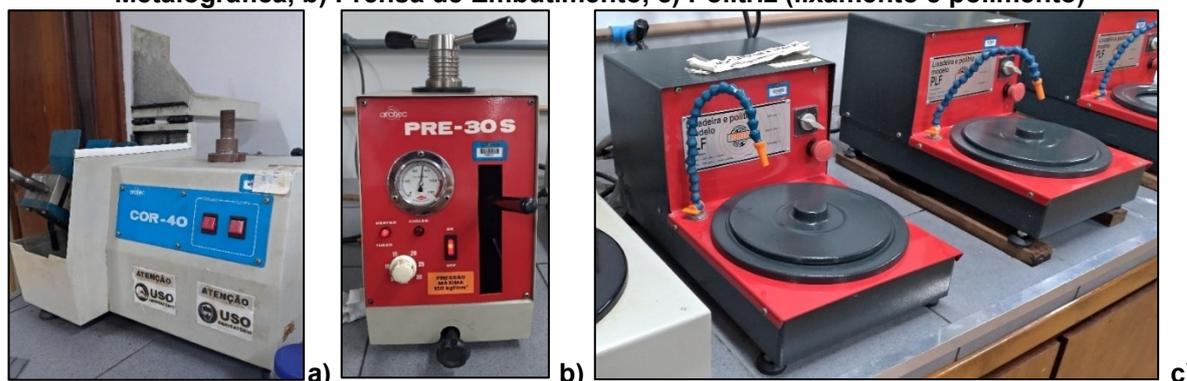
#### 4.5.4 Preparação das amostras por metalografia

Esta etapa foi realizada no Laboratório de Ensaios (H005), na UTFPR - Câmpus Pato Branco, conforme Norma ASTM E1920-03 (re-aprovada em 2014). Foi realizado corte, embutimento, lixamento e posteriormente polimento para obter as amostras prontas para análises microscópicas. Foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- Cortadora Metalográfica, Modelo COR – 40 e Marca Arotec.
- Prensa de embutimento, Modelo PRE – 30S e Marca Arotec
- Politriz, Modelo APL-4 e Marca Arotec (Utilizou-se lixas 120, 300, 600 e 1200)

O polimento foi realizado em alumina e finalizado em diamante de 1 $\mu$ m. Na figura 25 abaixo é possível ilustrar toda a sequência do procedimento metalográfico.

**Figura 25 – Sequência dos equipamentos utilizados na preparação das amostras: a) Cortadora Metalográfica, b) Prensa de Embutimento, c) Politriz (lixamento e polimento)**



Fonte: Autoria própria

#### 4.5.5 Microscopia Óptica (MO)

Este procedimento foi realizado para analisar as características morfológicas e microestruturas dos revestimentos A e B, visualizando as fases presentes e, conforme os aumentos de 50x até 1kx retirar fotos das camadas na superfície do substrato, com foco dinâmico em diferentes regiões da amostra.

Foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Microscópio com lentes Olympus BX51M, acoplado a uma câmera AxionCam MRc5 que permitiu a captura das imagens no Laboratório de Materiais da UTFPR - Campus Curitiba;
- Microscópio ótico Olympus BX51M, com câmera AxionCam MRc5 do Laboratório de Engenharia de Superfície da UTFPR - Campus Curitiba;
- Lupa Olympus SZx10 no Laboratório de Materiais da UTFPR – Campus Curitiba

#### 4.5.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

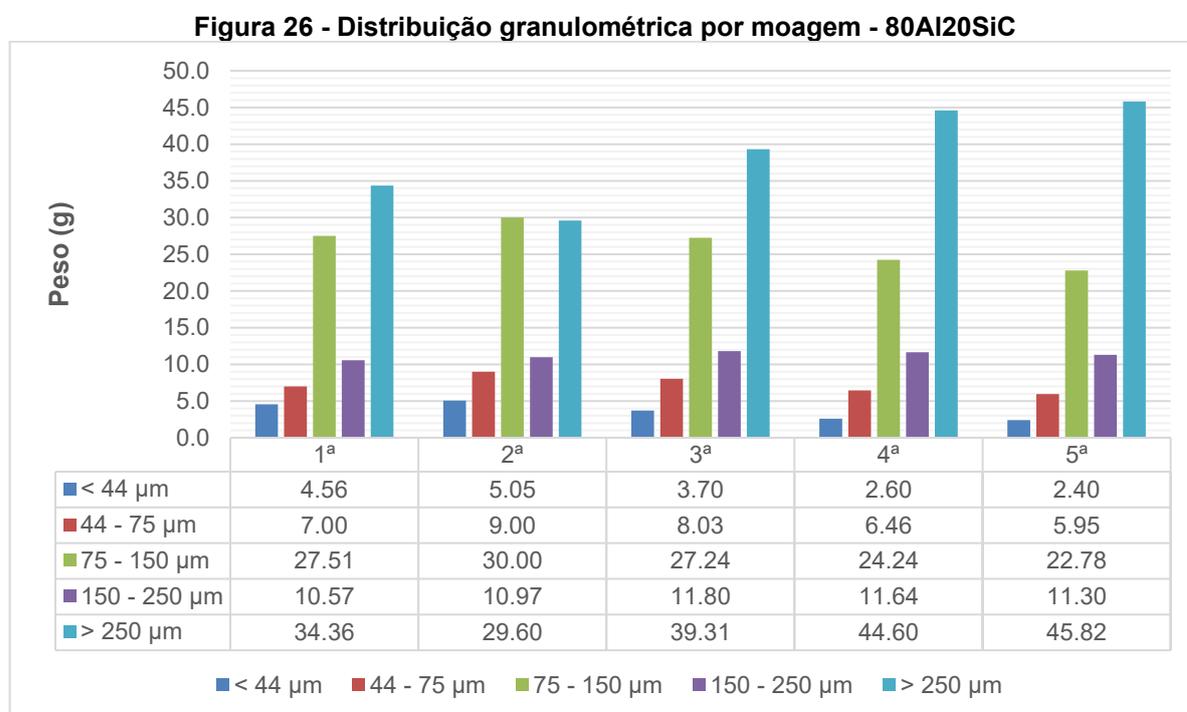
Esta última etapa permitiu obter imagens de alta resolução para complementar a análise realizada por MO, foram capturadas imagens de 500x a 30000x por BSE (Elétrons retroespalhados) e SE (Elétrons secundários). Todos os equipamentos foram do Centro de Microscopia Eletrônica – CME da UFPR.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 FORMAÇÃO DO PÓ COMPÓSITO

O processo de moagem do compósito de condição A e B, foi descrito no item 4.2.1 e ao final percebeu-se que a condição A tinha produzido muitos aglomerados de tamanhos maiores que 150  $\mu\text{m}$ , enquanto B, inversamente produziu mais aglomerados abaixo que 44  $\mu\text{m}$ , confirmando na prática que o tempo de moagem tem efeito, na forma, no tamanho e na homogeneidade dos aglomerados. Dentro do processo de separação do pó compósito na condição A notou-se a necessidade de acondicionar as porções que possuíam tamanho maior ou igual a 150  $\mu\text{m}$  para um novo procedimento de MR, visto que a faixa considerada ideal, utilizaria para deposição era 75 – 150  $\mu\text{m}$ , e dessa forma deveria possuir volume suficiente para depositar todas as amostras futuras.

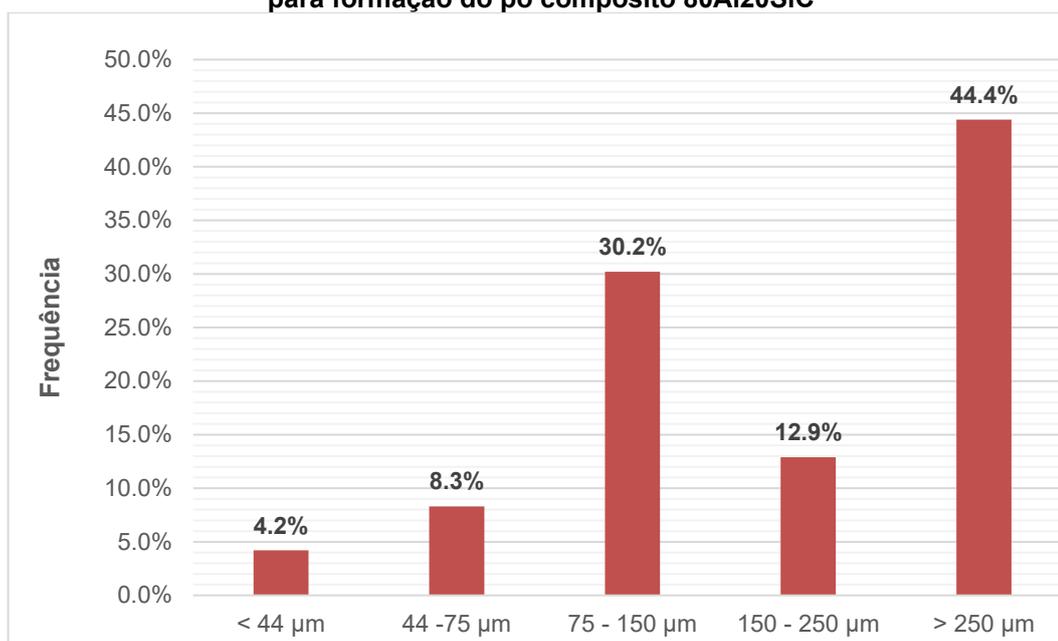
A partir dessas especificidades foram construídos gráficos para melhor entender a distribuição granulométrica do pó nas condições A e B, conforme mostra as figuras 26, 27, 28 e 29.



Fonte: Autoria própria

A figura 26 apresenta a distribuição granulométrica em cada processo de moagem para formação do pó compósito de condição A. É possível verificar que houve um crescimento do volume de pó acima de 250  $\mu\text{m}$  observando da primeira até a última moagem. Enquanto que o volume da faixa entre 75 - 150  $\mu\text{m}$  teve o comportamento inverso. Outro ponto interessante é que a faixa entre 150 - 250  $\mu\text{m}$  teve um comportamento quase que constante.

**Figura 27 – Histograma das faixas granulométricas obtidas durante o processo de moagem para formação do pó compósito 80Al20SiC**

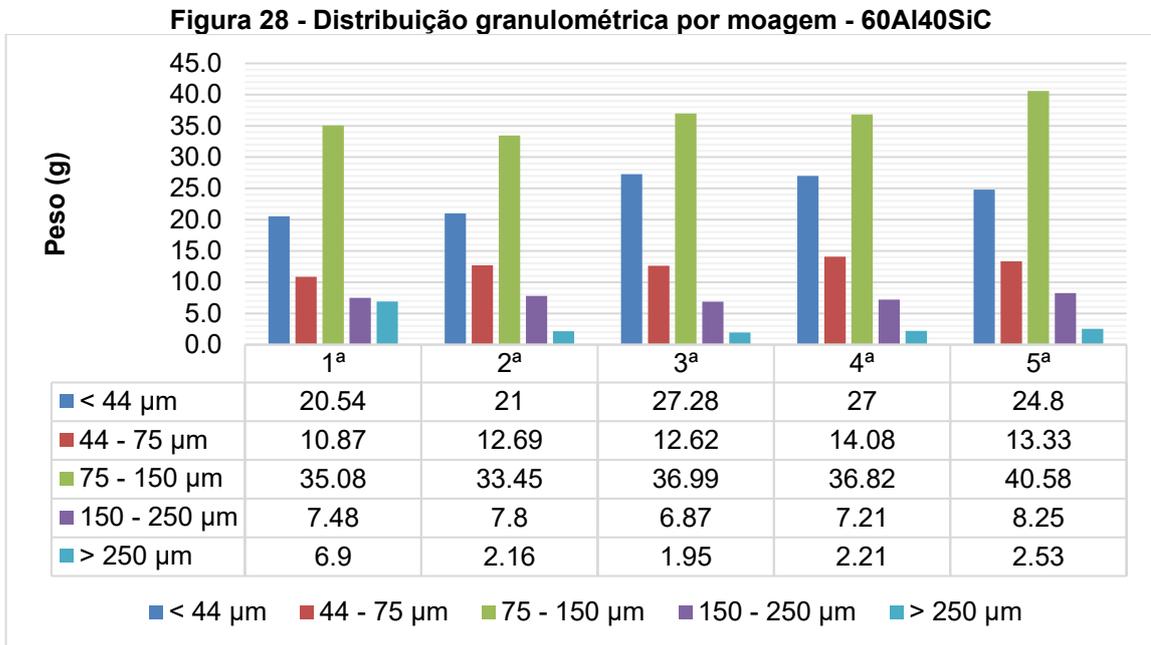


Fonte: Autoria própria

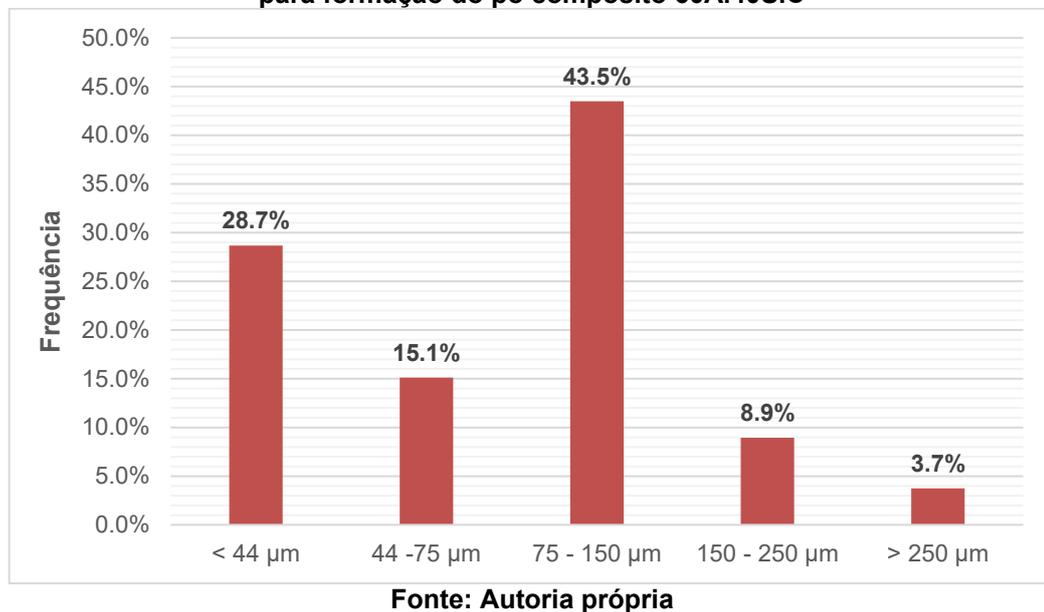
É possível verificar no histograma apresentado na figura 27 que em média, 61% do pó proveniente da moagem estava fora da faixa pré-estabelecida como ideal, entre 75 e 150  $\mu\text{m}$ , isso leva-se a pensar na hipótese de que os tempos de moagem mesmo que curtos foram acima do necessário para que a interação mecânica ocorresse. Outra hipótese é que a temperatura na qual o processo ocorreu possa ter influenciado diretamente na aglomeração e produção de óxidos por fora da partícula de Al, conforme foi apresentado no item 4.2.1.

Na figura 28 é possível fazer uma análise paralela, enquanto na condição A (figura 26) o maior volume de massa era da faixa granulométrica acima de 250  $\mu\text{m}$ , na condição B tem-se a faixa ideal com maior volume, seguido da faixa menor que 44  $\mu\text{m}$ . Existem dois fatores que diferenciam as condições o tempo de moagem, onde a condição B foi 20% menor que a A. E a composição de Al e SiC. Como citado no item

4.2.1 na configuração 60Al40SiC a probabilidade de ocorrer aglomerados de partículas pequenas (abaixo  $< 44 \mu\text{m}$ ) era maior que aglomerados de tamanhos acima de  $250 \mu\text{m}$ .



**Figura 29 - Histograma das faixas granulométricas obtidas durante o processo de moagem para formação do pó composto 60Al40SiC**



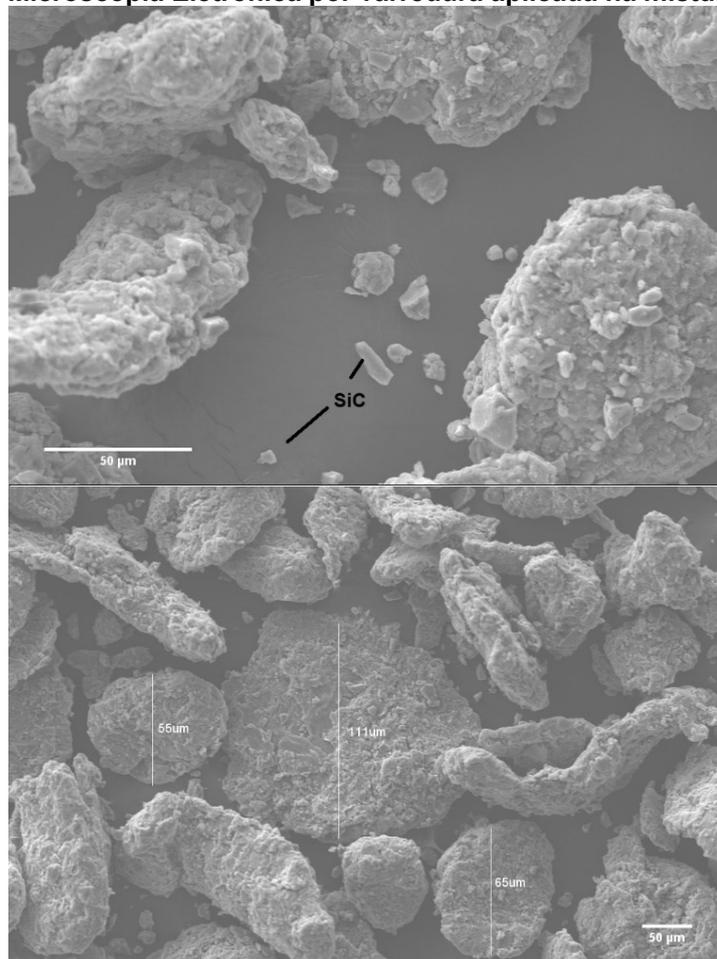
Através do histograma montado na figura 29 é possível concluir que aproximadamente 59% do volume de pó após o processo de formação do composto B estava ideal para aplicação, cerca de 20% a mais que na condição A.

### 5.1.1 Microscopia eletrônica por varredura aplicada na mistura Al/SiC

Para garantir que durante o processamento de MR os pós compósitos não fossem descaracterizados conforme o tempo de preparo ou que fenômenos térmicos pudessem reduzir a efetividade da aplicação do pó, foi aplicado o MEV de forma a caracterizar e garantir a eficiência do revestimento sobre os substratos.

As micrografias mostradas nas imagens da figura 30 apresentam as amostras após o processo de moagem. É possível notar a formação da mistura onde as partículas hóspedes estão incorporadas ao hospedeiro. Essa afirmação é validada pela característica da morfologia que resulta em partículas mais rugosas como é visto nas aproximações da mistura.

**Figura 30 – Microscopia Eletrônica por varredura aplicada na mistura 80Al20SiC**



**Fonte: Autoria própria**

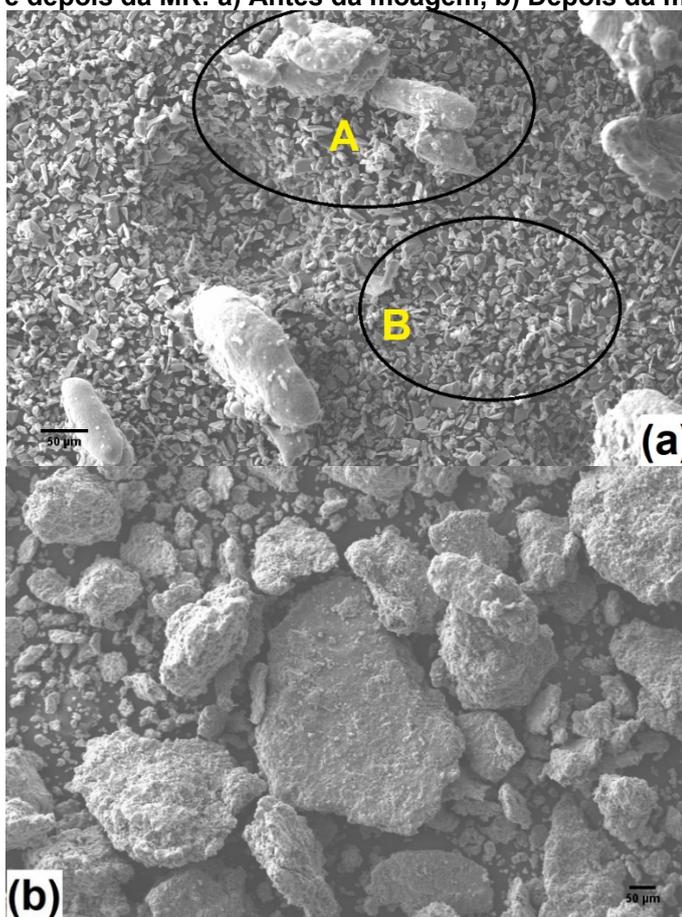
Usando o Software ImageJ é possível medir os diâmetros das partículas, conforme mostra a figura 30. O aumento do tempo do processo faria com que o

tamanho médio das partículas evoluísse podendo inviabilizar a aplicação, como citado anteriormente no estudo de distribuição de partículas.

Para a mistura 60Al40SiC foi realizado micrografia por MEV antes e depois do processo de moagem, dessa forma é possível apresentar a evolução completa na formação do compósito. A figura 31 (a) apresenta a mistura antes da moagem, apenas depois do processo de homogeneização, nela encontra-se destacado duas regiões, o círculo A que corresponde a partícula de alumínio com algumas inserções de carbeto devido ao tempo de processo do misturador em Y. E o círculo B definindo as partículas de carbeto misturadas com algumas fissuras das partículas de alumínio.

Na sequência é possível verificar toda a evolução na figura 31 (b), enquanto antes da moagem era simples diferenciar as partículas de SiC e Al, na figura que representa o final da mistura não é mais possível desvencilhar o carbeto do alumínio, embora ainda seja possível encontrar pequenas partículas do carbeto que não penetraram no interior do alumínio.

**Figura 31 – Análise da Microscopia Eletrônica por varredura aplicada na mistura 60Al40SiC antes e depois da MR: a) Antes da moagem, b) Depois da moagem**



Fonte: Autoria própria

## 5.2 RUGOSIDADE E ESPESSURA DO REVESTIMENTO

Verificou-se a rugosidades dos corpos de prova posteriormente a aplicação do jateamento abrasivo, tanto nas chapas como nos cilindros, na tabela 7 está o valor médio das cinco medições das amostras em cada configuração nos cilindros. Em todos os casos os valores de rugosidade estavam dentro dos padrões mínimos estabelecidos, segundo a Norma Petrobras N-2568, que são valores de  $R_t$  entre 60 e 100  $\mu\text{m}$ .

O  $R_t$  é mais preciso na avaliação da superfície, devido a considerar todo o comprimento de avaliação e não só uma amostragem, embora em alguns casos, possa obter-se resultados distorcidos dependendo da amplitude do pico e vale. Dessa forma, optou-se então por também analisar o parâmetro  $R_a$ , segundo Lima e Trevisan (2007) utilizando  $R_a$ , a faixa recomendada deveria estar entre 2,5 e 13  $\mu\text{m}$ .

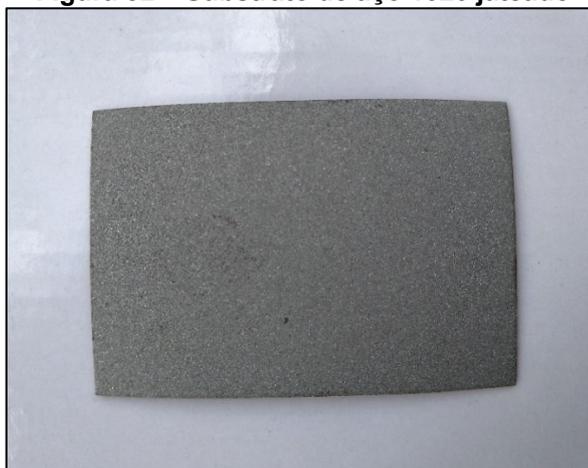
**Tabela 7 – Rugosidade média dos Corpos de prova**

Corpos de Prova	Rugosidade ( $R_t$ ) - Média	Rugosidade ( $R_a$ ) - Média
Configuração A	70,27	7,02
Configuração B	68,16	6,70

**Fonte: Autoria própria**

A figura 32 apresenta o substrato antes da aplicação do revestimento, somente para ilustrar o grau de corrosão e limpeza de acordo com o padrão mostrado na norma sueca SIS 055900/67.

**Figura 32 – Substrato de aço 1020 jateado**



**Fonte: Autoria própria**

A espessura medida dos revestimentos está apresentada na tabela 8, todas estão dentro da conformidade segundo as Normas Petrobras N-2568 e ASTM C 633.

**Tabela 8 – Espessura média do Revestimento Al/SiC**

<b>Corpos de Prova</b>	<b>Chapa</b>	<b>Cilindro (aprox)</b>
Configuração A	280 $\mu\text{m}$	330 $\mu\text{m}$
Configuração B	240 $\mu\text{m}$	300 $\mu\text{m}$

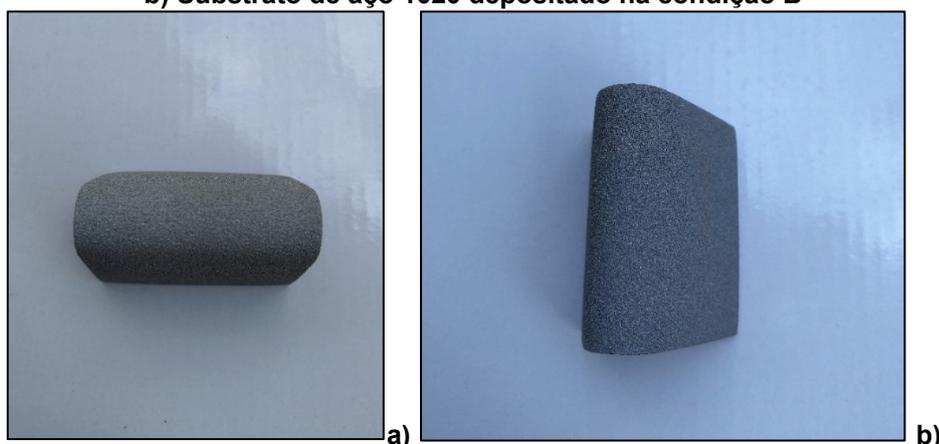
**Fonte: Autoria própria**

Os corpos de prova em chapas foram medidos posteriormente a aplicação do revestimento através do micrometro analógico, e através da proporção utilizada com relação a aplicação nas chapas os valores de espessura de camada nos cilindros são uma aproximação quase exata, levando em consideração o tempo e processo de deposição.

### 5.3 DOBRAMENTO

Os corpos de prova utilizados no ensaio de dobramento estão apresentados na figura 33. Foi confeccionado apenas uma chapa para cada configuração para verificar visualmente se o revestimento estava de acordo com os critérios da Norma N-2568 (2011).

**Figura 33 – Amostras dobradas no ensaio: a) Substrato de aço 1020 depositado na condição A, b) Substrato de aço 1020 depositado na condição B**



**Fonte: Autoria própria**

Conforme análise pelo método comparativo através do quadro de corpos de prova padrões na figura 21, pôde avaliar que tanto o substrato depositado na configuração A que possuía 80% Al e 20% SiC quanto o de configuração B, 60% Al e 40% SiC. Estavam de acordo com o ideal apresentado na Norma, uma superfície lisa, sem microtrincas ou trincas.

#### 5.4 ADESÃO DO REVESTIMENTO

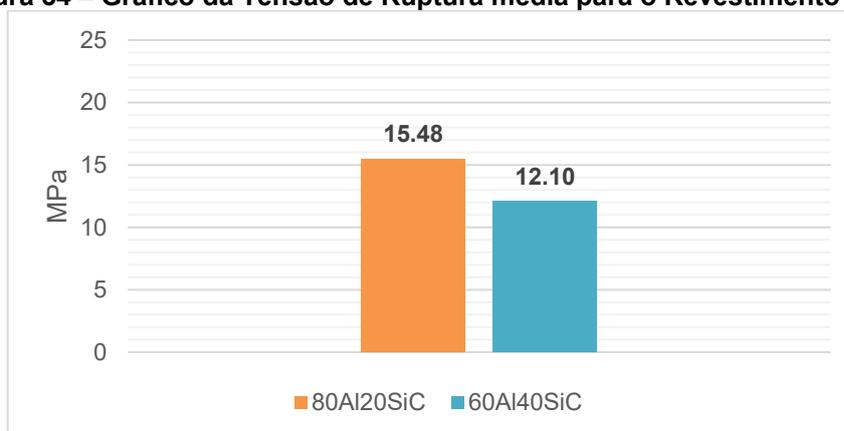
Nesta etapa, os 3 corpos de prova de cada configuração foram analisados. A seguir na tabela 9, é possível verificar os valores obtidos em cada ensaio.

**Tabela 9 – Resultados do Ensaio de Adesão para o Revestimento Al/SiC**

Amostra	Tensão (MPa)	Força (kN)	Velocidade da força aplicada (mm/min)	Tipo de Rompimento
A <sub>0</sub> (cola)	26,03	13,20	1	-
A <sub>1</sub> (80Al20SiC)	14,12	7,16	1	substrato/revestimento
A <sub>2</sub> (80Al20SiC)	13,80	7,00	1	substrato/revestimento
A <sub>3</sub> (80Al20SiC)	18,51	9,38	1	substrato/revestimento
B <sub>0</sub> (Cola)	30,73	15,57	1	-
B <sub>1</sub> (60Al40SiC)	13,46	6,82	1	substrato/revestimento
B <sub>2</sub> (60Al40SiC)	12,53	6,35	1	substrato/revestimento
B <sub>3</sub> (60Al40SiC)	10,30	5,21	1	substrato/revestimento

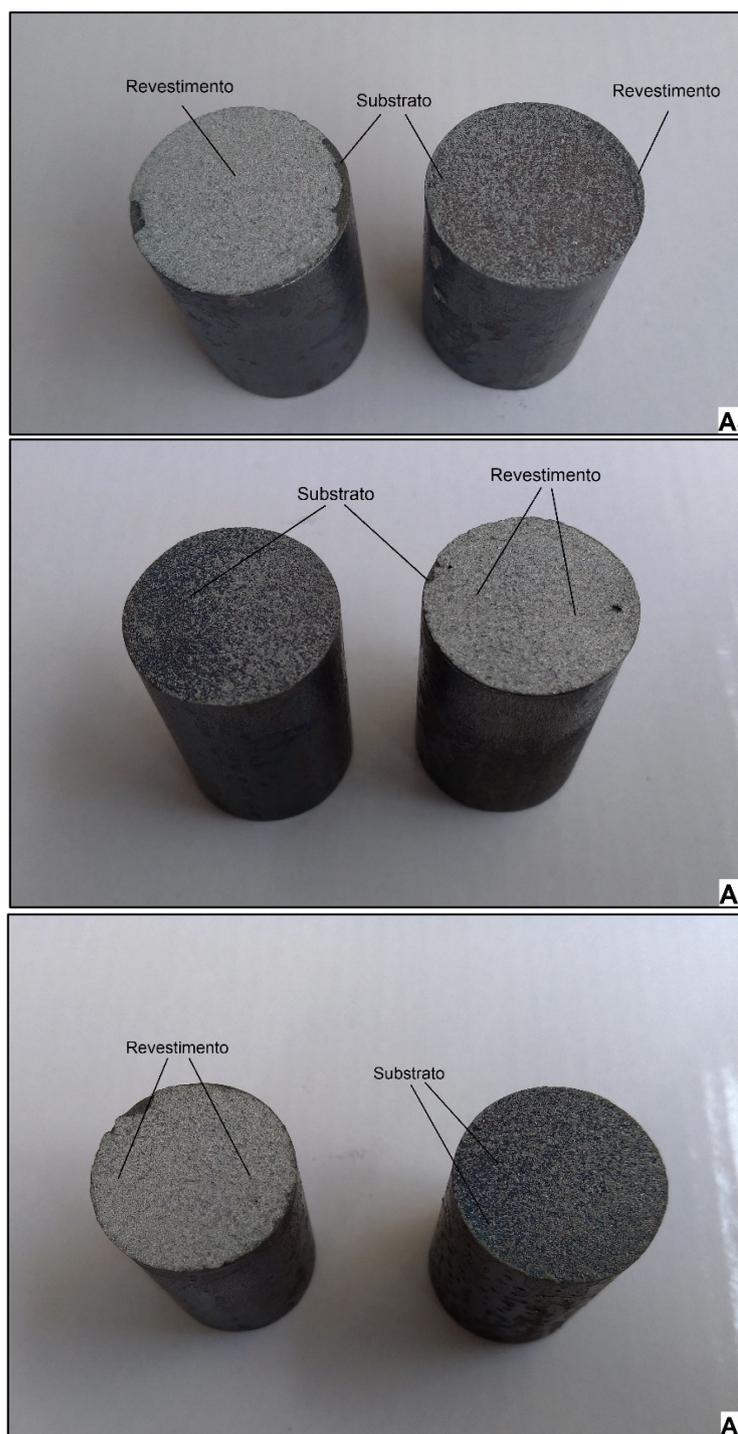
Fonte: Autoria própria

**Figura 34 – Gráfico da Tensão de Ruptura média para o Revestimento A e B**



Fonte: Autoria própria

**Figura 35 – Resultados do ensaio de aderência – Análise do rompimento nas amostras 80Al20SiC**

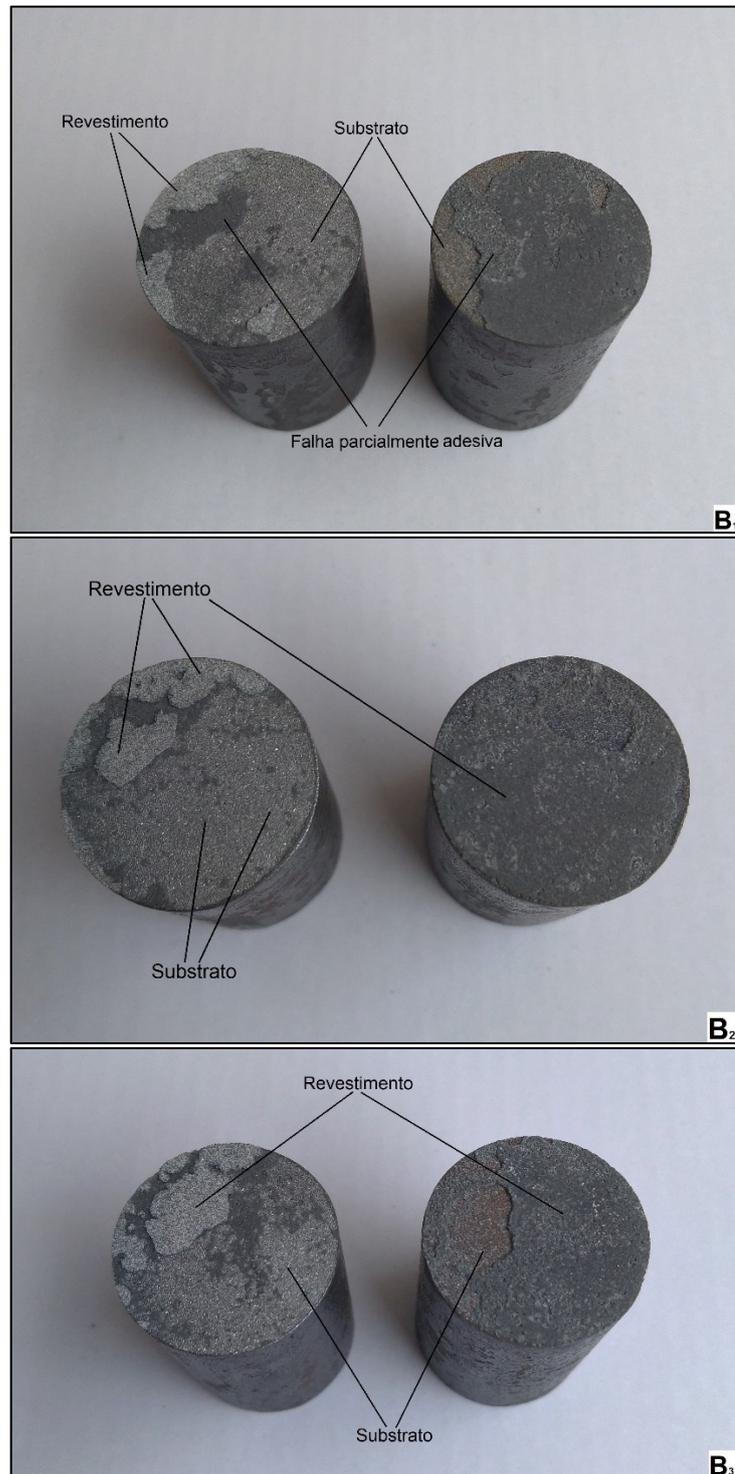


**Fonte: Autoria própria**

A tabela 9, figura 34, 35 e 36 são complementares. Apresentam os resultados obtidos durante o ensaio de aderência. É possível verificar visualmente cada tipo de falha ocorrida. Na configuração A, com 80% de alumínio, todas as falhas ocorreram na interface substrato/revestimento. O gráfico (figura 34) mostra uma

tensão média de 15,48 Mpa, esta é caracterizada como resistência adesiva pois rompeu-se fora da interface do revestimento.

**Figura 36 – Resultados do ensaio de aderência – Análise do rompimento nas amostras 60Al40SiC**



**Fonte: Autoria própria**

Na configuração B, com 40% de SiC na mistura. Obteve-se rompimentos mais coesivos em comparação com a configuração A, aproximadamente 70% do rompimento foi adesivo, no entanto é possível verificar na figura 36 que em todas as amostras parte do revestimento ficou aderida ao substrato e não ao adesivo. É possível verificar também, que nas amostras da configuração A (figura 35) existem partículas ancoradas ao substrato, ou seja, leva-se ao entendimento que essa forte ancoragem só foi possível devido a uma união metalúrgica entre o revestimento e o substrato (CORTÉS, 1998).

Segundo a Norma ANSI/AWS C2.18-93, todos os valores de tensão de ruptura devam estar acima de 10,3 MPa e a média ser superior a 13,8Mpa durante o ensaio de aderência. Nessas condições apenas para o revestimento 80Al20SiC obteve uma média superior a exigida. No entanto, todos os valores de ruptura no revestimento 60Al40SiC foram a partir de 10,3 MPa.

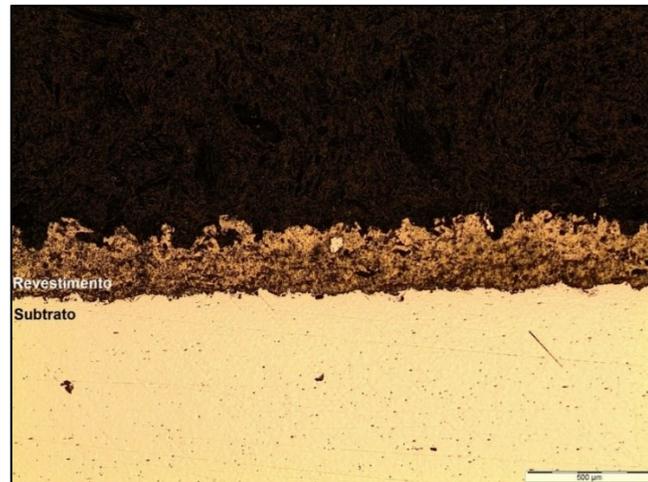
Com base nos resultados, verificou-se que os revestimentos com maior quantidade de SiC tiveram melhor aderência ao substrato. No entanto, não apresentaram média superior a especificada na norma. Uma forma de melhorar essa análise seria aplicando o revestimento com faixas de distância e temperaturas de pré-aquecimento diferentes. Outra possibilidade seria aplicar novamente os revestimentos A e B mas em substratos com uma rugosidade superior a utilizada, Uma vez que rugosidades maiores promovem melhor ancoragem das partículas durante a aspersão. Mesmo dentro da norma como apresentado no item 5.2 (Tabela 9) a rugosidade apresentada está mais próxima do mínimo exigido. Essa análise poderia apresentar valores melhores para rugosidades próximas a 100  $\mu\text{m}$  no parâmetro  $R_t$  e 13  $\mu\text{m}$  em  $R_a$ .

## 5.5 MICROSCOPIA ÓTICA (MO)

Conforme apresentado no tópico 4.5.4 e na figura 25, foram realizadas todas as etapas da metalografia afim de caracterizar o revestimento. Os resultados obtidos por meio do microscópio estão descritos nas figuras a seguir. As figuras 37 e 38 apresentam as características encontradas através da análise microscópica para o revestimento de configuração A. É possível identificar poros, vazios entre panquecas, ocorrência de intermetálicos, partículas atomizadas e a interface entre o

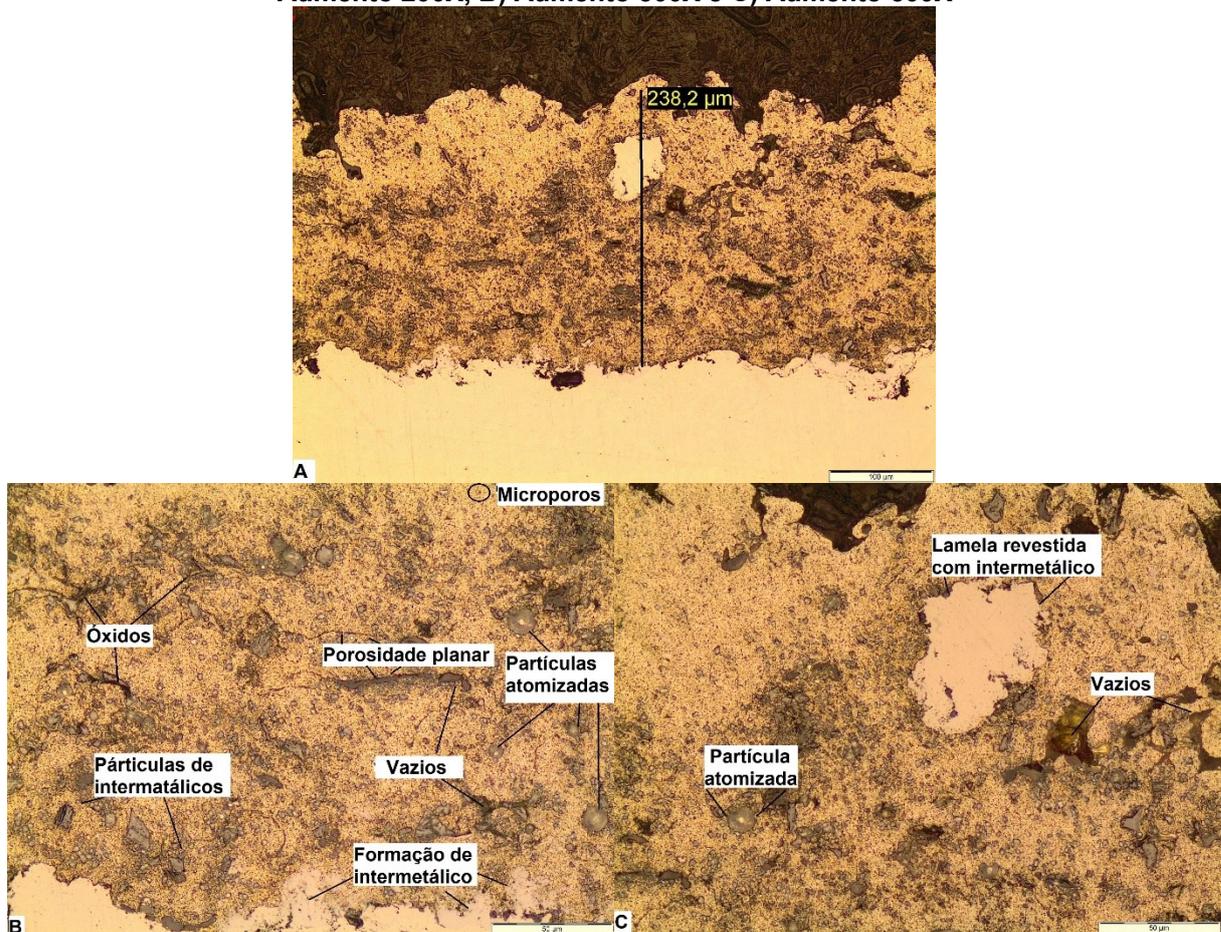
substrato e o revestimento. Mesmo com a ampliação chegando a 1k não é possível com clareza determinar todos os materiais que constituem o revestimento. Seria necessário a utilização de técnicas que auxiliem na identificação, como o DRX.

**Figura 37 – Microscopia Óptica no revestimento aplicado de configuração 80Al20SiC – Aumento de 50x**



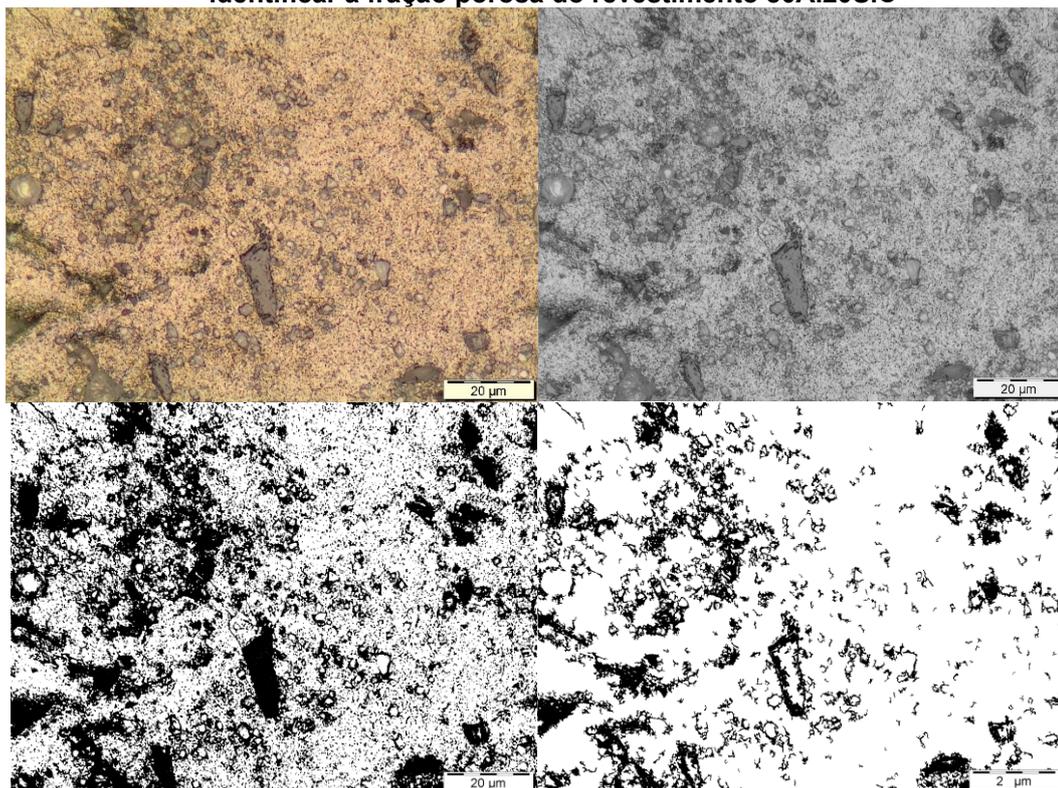
Fonte: Autoria própria

**Figura 38 – Microscopia Óptica do revestimento 80Al20SiC em diferentes aumentos: A) Aumento 200X, B) Aumento 500X e C) Aumento 500X**



Fonte: Autoria própria

**Figura 39 – Processo de Limiarização de uma M.O por meio do software ImageJ aplicado para identificar a fração porosa do revestimento 80Al20SiC**



**Fonte: Autoria própria**

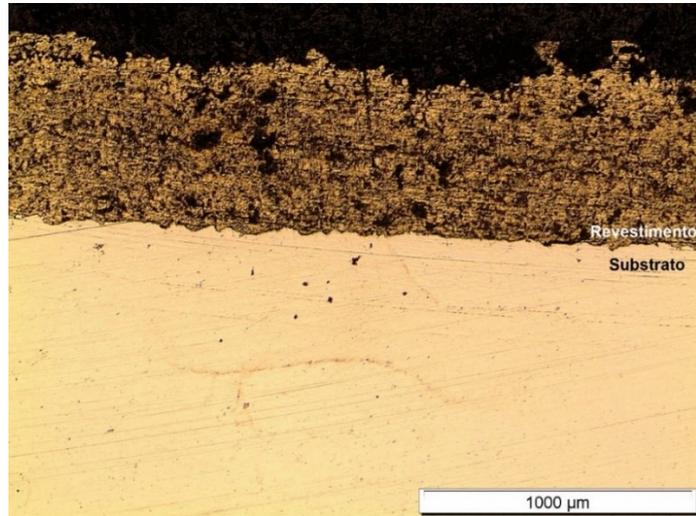
As figuras 39 e 42 foram especialmente tratadas por meio do Software ImageJ para medição da fração de poros e teor de óxidos dentro do revestimento e os dados obtidos estão mostrados na tabela 10.

Utilizando com base a imagem analisada na figura 38, foi possível estimar uma porcentagem fracionária da porosidade encontrada no revestimento. Essa ferramenta transforma a imagem em diferentes tons de cinza evidenciando o contraste de cores claras e escuras, para quantificar a área escura que nesse caso representa os poros. No caso do revestimento estudado, por se tratar de uma deposição de pó compósito, a literatura não fornece um valor médio de porosidade para esse tipo de revestimento, apenas delimitando ao tipo de processo utilizado, nesse caso foi chama pó.

As figuras 40 e 41 respectivamente apresentam as aproximações do revestimento 60Al40SiC obtidas por meio da microscopia óptica. É possível verificar falhas entre as panquecas que muito se aproximam a microtrincas nas regiões próximas a superfície do revestimento, evidenciando uma falta de coesão. Identificou-

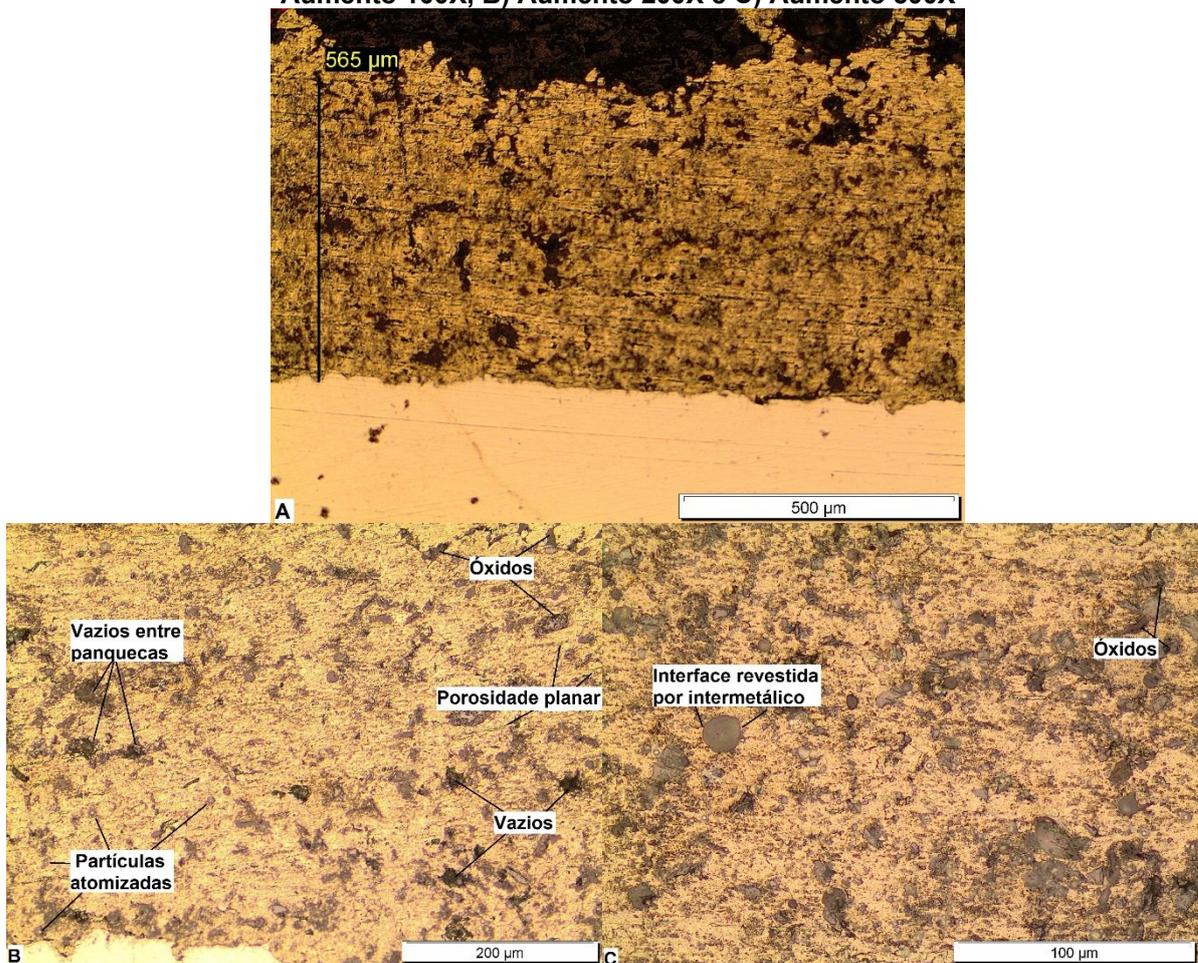
se vazios e poros, intermetálicos e as regiões onde mais houveram formação de óxidos.

**Figura 40 - Microscopia Óptica no revestimento aplicado de configuração 60Al40SiC – Aumento de 100x**



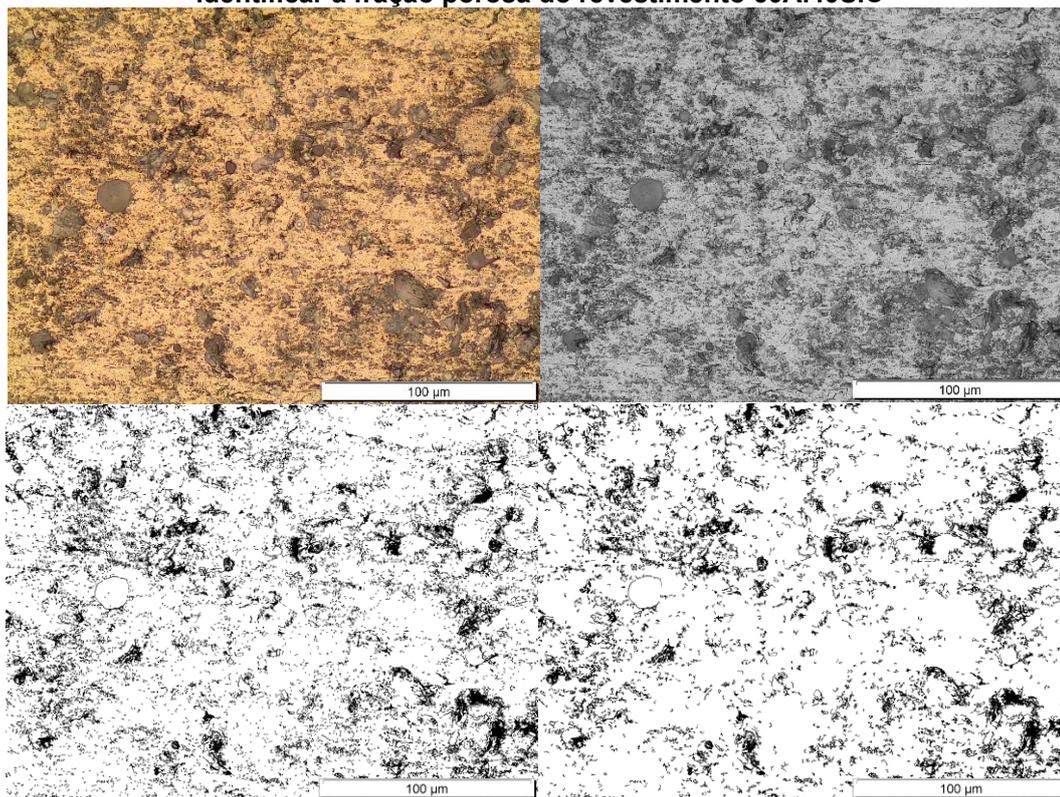
Fonte: Autoria própria

**Figura 41 - Microscopia Óptica do revestimento 60Al40SiC em diferentes aumentos: A) Aumento 100X, B) Aumento 200X e C) Aumento 500X**



Fonte: Autoria própria

**Figura 42 - Processo de Limiarização de uma M.O por meio do software ImageJ aplicado para identificar a fração porosa do revestimento 60Al40SiC**



**Fonte: Autoria própria**

Na tabela 10 encontra-se os valores em porcentagem de cada análise obtida por meio do software ImageJ.. Nota-se que os valores com relação a porosidade estão próximos do que foi apontado por Paredes (2009).

**Tabela 10 – Fração de poros e óxidos nos revestimentos compósitos depositados por Chama Pó**

Revestimento	Fração porosa (%)	$\sigma$	Taxa de Óxidos (%)	$\sigma$
80Al20SiC	12,45	0,26	8,20	0,78
60Al40SiC	9,35	2,00	6,23	1,20

**Fonte: Autoria própria**

A bibliografia recomenda porosidade entre 5 a 15% e com relação a óxidos entre 0,4 a 10%. É possível observar que houve alteração significativa com relação a distribuição de óxidos e porosidade de um revestimento para o outro, o que possa significar que a maior adição de carbetos de silício na mistura tenha sido efetiva no sentido de ocupar os espaços entre as lamelas de alumínio, a medida que eram depositadas as camadas, uma vez que a única diferença dos dois processos foi a

quantidade de SiC na mistura. Essa hipótese é reforçada se analisarmos quadro a quadro das figuras que representam cada revestimento, é possível verificar que no revestimento A há grandes vazios ocasionados pela diferença de tamanhos entre SiC e Al. Segundo Maranhão (2006), as características que mais influenciam no aumento de porosidade são partículas grande, baixas temperaturas e velocidades de impacto e menor granulometria do pó.

## 6 CONCLUSÕES

A mistura dos pós de Al e SiC foram obtidas com sucesso, as duas configurações com 20 e 40% de SiC foram depositadas conforme previsto e os resultados foram discutidos. Este tópico foi organizado para expor as principais informações conclusivas extraídas durante o estudo e apresentar sugestão para novos trabalhos.

O processo de moagem rápida (MR) se mostrou muito eficaz, produzindo uma distribuição homogênea de partículas compósitas, embora o tempo de 15 minutos para a configuração A e 12 minutos para a configuração B tenha sido pouco conclusivo do ponto de vista de eficiência sendo necessário mais observações. Houve um acréscimo de 20% na eficiência entre a formação do compósito A e B. Isto pode ter ocorrido porque além do efeito da redução do tempo, o percentual de SiC também acabou “limitando” a aglomeração em massa como ocorreu no compósito A, por fim pôde atestar na prática as diferentes distribuições do SiC dentro da partícula de Al. Essa afirmação é baseada nos resultados do tópico de formação do compósito dentro da análise distributiva de tamanhos de partículas e análise por MEV.

A técnica de MR se mostrou satisfatória para esse tipo de estudo, pois obteve-se os valores na faixa pré-determinada entre 75 e 150  $\mu\text{m}$  e na quantidade acima do necessário criando um revestimento médio de 300  $\mu\text{m}$  de espessura, dessa forma essa técnica pode ser muito bem utilizada quando se tem um material de matriz dura e outro dúctil.

Ambos os resultados para o ensaio de dobramento foram considerados ideais, com uma superfície lisa, sem microtrincas ou trincas. Já para o ensaio de aderência pôde-se verificar que o revestimento A conseguiu valores melhores para resistência, cerca de uma média de 22% melhor, e quando analisado os dois melhores resultados de cada revestimento, a configuração A eleva esse valor para aproximadamente 30%. Na análise visual dos corpos de prova foi possível verificar que o revestimento com 40% de SiC possuiu uma ancoragem maior do revestimento ao substrato do que o revestimento com 20% de SiC, porém com uma menor coesão entre camadas no revestimento. Dessa forma aconselha-se que a escolha de cada

compósito deva-se levar em conta o tipo de aplicação do revestimento e em quais situações ele será submetido.

A caracterização dos revestimentos por microscopia ótica apresentou morfologia complexa com óxidos, poros, microtrincas, intermetálicos e partículas não fundidas.

A quantificação de porosidade pela aplicação do software ImageJ apresentou valores para cada revestimento. Para o revestimento 80Al20SiC obteve-se valores de óxidos e porosidade aproximadamente 27% maior que o 60Al40SiC, ambos na faixa considerada normal para revestimentos por FSp. Por meio de um controle mais rigoroso nos parâmetros de aspensão térmica e diminuição do tamanho de grão utilizado para o carbetto de silício é possível obter uma redução de porosidade e de óxidos.

A escolha deste trabalho foi por trabalhar com grãos de tamanhos micrométricos, mas é possível utilizá-los em tamanhos menores (nanométricos) diminuindo o efeito limitante da temperatura média e compactando melhor o compósito na deposição por FSp.

Entre as sugestões para trabalhos futuros nessa linha de pesquisa encontra-se:

- Obter compósitos com diferentes composições, diferentes tamanhos e parâmetros de fabricação para medir a interferência dos mesmos.
- Aplicar a composição estudada em outro material, utilizando variáveis e parâmetros como rugosidade e pré-aquecimento iguais para medir a formação do revestimento e confrontá-lo com a pesquisa atual.
- Analisar os revestimentos estudados, quanto ao desgaste abrasivo, resistência a corrosão e ensaios térmicos.
- Utilizar a técnica de difração de raios x para quantificar com precisão os elementos de liga e tipos de óxidos presentes nos revestimentos estudados.

## REFERÊNCIAS

ASM INTERNATIONAL, **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. Volume 2, 1992.

BERNECCKI, T.F., “**Characterizing Thermal-Spray Coatings**”, *Advanced Materials & Processes*, 5, p.23-27, 1992.

BERNDT, C. C., BERNECKI, T., et.al, **Handbook of Thermal Spray Technology**, ASM International, 2004.

BERNDT, C. C., YI, P. **Strength enhancement of plasma sprayed coatings**, in *Thermal Spray: Advances in Coatings Technology*. ASM International, D.L. Houck (ed), 1987.

BRADY, George S., CLAUSER Henry R., VACCARI John A. **Materials, Their Properties and Uses**. *Materials Handbook – 15 ed.* 2004.

CALLISTER, W.; RETHWISCH, D.F. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução 7ª edição**. LTC Editora, 2008, 704 pp.

CLARE, J.H., CRAWMER, D.E. **Thermal spray coatings, in Metals Handbook**, Vol. 5: *Surface Cleaning Finishing and Coating*, 9<sup>th</sup> ed., ASM International, 1982.

CORTÉS R. Tese de doutorado. **Estudo de revestimentos de Al depositados por três processos de AT para a proteção do aço contra a corrosão marinha**. UFSC, 1998.

CSANÁDY, A., CSORDÁS-PINTÉR, A., VARGA L., TÓTH, L., VINCZE, G. **Solid State Reactions in Al Based Composites Made by Mechanofusion**. *MikrochimicaActa*, v. 125, p. 53-62, 1997

E.J. Hall; K.L. **Production of Aluminum and Aluminum-Alloy Powder A**. Aluminum Company of America. *ASM Handbook – Vol 7 – Powder Metal Technologies and Applications*, 1998.

GENELIN, C. L. **Effects of Environment on Creep Behavior of Nextel 720/Alumina-Mulite Ceramic Composite at 1200<sup>o</sup> C**. 2008, 11p.

GOMES, M. N. V. **Desenvolvimento do Compósito de Fe<sub>3</sub>Al-k Nanométrico em Matriz de Alumínio para Revestimento Depositado por Aspersão Térmica Chama a Pó.** Tese – Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 297 f. 2016.

IWANOMOTO, N; UMESAKI, N; ENDO, S; MORIMURA, T. **Characterization of plasma sprayed and whisker reinforced alumina coatings.** 1987. 6p.

KARBASI, M.; RAZAVIL, M.; TAHERI, M.; VASHAEE, D.; TAYEBI, L. **Preparation of Al-SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composite powder by mechanochemical reaction between Al, SiO<sub>2</sub> and C.** 2013, 4p.

KREYE, H. **“State of Development and Prospects of High-Velocity Flame Spray”**, Welding & Cutting, p. e119-e124,1990.

LIMA, Carlos C.; TREVISAN, Roseana. **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicação.** 2 ed. São Paulo: Artliber Editora, 2007.

LEE, W.; RAINFORTH, M. **Ceramic Microstructures property control by processing.** London: Chapman and Hall, 1994. p. 415-451.

MCPHERSON, R. **The relationship between the Mechanism of Formation, Microstructure and Properties of Plasma-Sprayed Coatings.** p. 297-310, 1981.

MARANHO, O. **Aspersão Térmica de Ferro Fundido Branco Multicomponente.** 2006. 188p. Tese (doutorado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, 2006.

MARQUES, Paulo V. **Aspersão Térmica.** Infosolda. 2003. 16 p.

MATOVIC´; B., YANO, Toyohiko. **Silicon Carbide and Carbides: From Stars to the Advanced Ceramics**, In: Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing, and Properties. 2013.

MENDES, M. W. D. **Revestimentos a base de Ta/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> produzidos por aspersão térmica.** Tese (doutorado) – UFRN. Centro de Ciências Exatas e Engenharia de Materiais, 2010.

NORMA ABNT 15877. **Pintura Industrial – Ensaio de aderência por tração.** 2010, 10p.

NORMA ASTM C 633 – 79 (Reapproved). **Standard Test Method for Adhesion Or Cohesive Strength of Flame-Sprayed Coatings.** 1993, 10p.

NORMA ASTM E 1920 – 03. **Standard Guide for Metallographic Preparation Of Thermal Sprayed Coatings.** 2014, 5p.

NORMA ISO 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** 2002, 18p.

NORMA ISO 85501-1. **Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Visual assessment of surface cleanliness.** 2007.

NORMA PETROBRAS N-2568. **Revestimentos Metálicos por Aspersão Térmica.** 2011, 49p.

NORMA PETROBRAS N-2568. **Seleção e Aplicação (Por Aspersão Térmica) do Alumínio, Zinco e Suas Ligas como Revestimento Anticorrosivo.** 1996, 34p.

NOVICKI, N. **Aplicação da Aspersão Térmica na Soldagem em Operações de Tubulações com Pequena Espessura Remanescente.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – UFSC, 2008.

OERLIKON METCO. **An introduction to Thermal Spray.** Issue 6. Switzerland, 2016.

PAREDES, Ramón S. C. **Aspersão Térmica.** Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica. Curitiba, 2009. 102 f. Apostila.

PAWLOWSKI, Lech. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings.** Second Edition, 2008.

SANTOS, M. A. P; COSTA, C. A. **Moagem de pós de carbeto de silício em moinho planetário.** 2005, 6p.

SHAFFER, P.T. **A review of the structure of silicon carbide.** Acta Cryst B, 1969.

SUCHARSKI, G. B. **Deposição De Revestimentos Tipo Barreira Térmica Por Aspersão Térmica**. Universidade Federal do Paraná, 2012.

TIKKANEN, A. Silicon Carbide. Britannica Academic, 2008. Disponível em: <<https://academic-ebbritannica.ez48.periodicos.capes.gov.br/levels/collegiate/article/silicon-carbide/67765/history#>>. Acesso em: 10 Fev. 2019.

ÜNAL, D. D. LEON; T. B. GURGANUS; G. J. HILDEMAN. **Production of Aluminum and Aluminum-Alloy Powder A**. Aluminum Company of America. ASM Handbook - Vol 7 - Powder Metal Technologies and Applications, 1998.

UNGER, R. H. **Termal Spray Coating**. Handbook Corrosion – Fundamentals, Testing, and Protection, Vol. 13 A. ASM International, 2003.

ZHANG, Z.-1, LI, D.-y, WANG, S. **High Temperature performance of arc-sprayed aluminum bronze coatings for steel**. Transactions of Non ferrous Metals Society of China, Vol. 16, p. 868-872, 2006