

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE NA ADERÊNCIA  
DE REVESTIMENTOS DE ALUMÍNIO DEPOSITADOS POR  
ASPERSÃO TÉRMICA A CHAMA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA MECÂNICA.**

**OSSIMAR MARANHO**

**FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO DE 1996**

INFLUÊNCIA DA PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE NA ADERÊNCIA  
DE REVESTIMENTOS DE ALUMÍNIO DEPOSITADOS POR  
ASPERSÃO TÉRMICA A CHAMA

**OSSIMAR MARANHO**

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

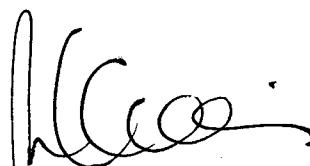
**MESTRE EM ENGENHARIA**

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL  
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



---

**Prof. Augusto J. A. Buschinelli, Dr. Ing. - Orientador**



---

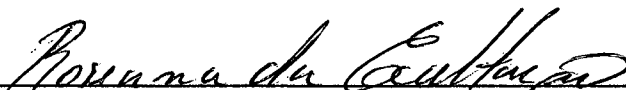
**Prof. Abelardo A. de Queiroz, PhD - Coord.do Curso**

**BANCA EXAMINADORA**



---

**Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng.**



---

**Prof. Roseana da Exaltação Trevisan, Dr. Eng.**



---

**Eng. Alexandre M. Pope, PhD (PETROBRAS)**

**Aos meus pais**

**Euclides Maranhão e Rosa Borgatto Maranhão,  
pela minha existência...**

**À minha esposa Eliane T. Maranhão,  
ao meu filho Henrique,  
pelo amor, carinho e compreensão.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a todas as pessoas que, pelas mais variadas razões, contribuíram e empenharam-se para a realização deste trabalho, com destaque especial:

- Aos meus familiares, em particular à minha esposa, e ao amigo Julião Caldeira pelo incentivo e apoio para iniciar o mestrado;
- Ao Prof. Buschinelli, pela inexorável orientação e esplêndida contribuição para que este trabalho expressasse na sua forma final, de maneira clara e objetiva, o seu conteúdo;
- Ao Eng. Ramón S. Cortés, doutorando do LABSOLDA, pela contribuição espontânea e indispensável para a iniciação, preparação e realização de todas as fases deste trabalho;
- Ao Prof. Carlos Niño, pelo companheirismo, consultas e explanações dos mais variados temas que surgiram durante minha permanência neste laboratório;
- Aos Engs. Marcelo Piza e Flavio Serra, da PETROBRAS, pelas valiosas discussões e co-orientação durante a realização deste trabalho;
- Ao graduando Fabricio Freire pelo empenho e dedicação na realização das mais variadas tarefas que fizeram parte deste trabalho, de maneira precisa e responsável;
- Ao graduando Ruy Pacheco pela editoração gráfica;
- Ao doutorando Luciano Bet e bolsista Gilmar Vicentin, pela colaboração nos ensaios de análise da superfície;
- Aos funcionários, bolsistas e pós-graduandos do LABMAT pela contribuição na utilização de equipamentos;
- À CAPES, pela concessão de bolsa;
- Ao CENPES/PETROBRAS pelo apoio financeiro;
- A todos os diretores e funcionários da empresa REVESTEEL, pelo apoio e contribuição imprescindíveis na preparação dos corpos de prova para os experimentos;
- Ao Sr. Gilberto Salvador, da METCO, pela grande disposição em contribuir para agilizar os trabalhos de aspersão dos corpos de prova;
- A todos os colegas da pós-graduação, em especial aos amigos Reginaldo, Leone, Niño, Ramón, Leonardo, Óder, Caceres, Okimoto, Willian, Baixo, Erwin, Raul, Paulinho, Binder, Mota, Jorge, Clayton, Bork, João Carlos, Galáz, pelos momentos de descontração.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>x</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiii</b>
<b>I - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 - Justificativas.....	1
1.2 - Objetivos.....	1
<b>II - ASPERSÃO TÉRMICA</b> .....	<b>4</b>
2.1 - Processos de Aspersão Térmica.....	4
2.1.1 - Processos a Combustão.....	5
a) Aspersão a Chama - (FS).....	5
b) Aspersão a Chama com Alta Velocidade - (HVOF).....	7
2.1.2 - Processos a Descarga Elétrica.....	8
a) Aspersão a Arco Elétrico.....	8
<b>III - ABRASIVOS</b> .....	<b>9</b>
3.1 - Introdução.....	9
3.2 - Classificação dos Pós Abrasivos.....	9
a) Abrasivos Metálicos.....	10
b) Abrasivos Não-Metálicos.....	10
3.3 - Testes para Caracterização de Pós Abrasivos.....	13
3.3.1 - Amostragem.....	13
3.3.2 - Granulometria.....	14
3.3.3 - Forma das Partículas.....	19
3.3.4 - Análise Química.....	21

<b>IV - PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE</b> .....	<b>22</b>
4.1 - Introdução.....	22
4.2 - Limpeza da Superfície.....	22
4.2.1 - Processos Químicos.....	24
a) Desengraxamento.....	24
b) Decapagem Ácida.....	24
4.2.2 - Processos Térmicos.....	25
a) Queima (Cozimento em Forno).....	25
b) Chama Direta.....	25
c) Atmosfera Redutora.....	25
4.2.3 - Processos Mecânicos.....	25
4.2.4 - Limpeza obtida por Jateamento Abrasivo.....	26
4.3 - Rugosidade.....	29
4.3.1 - Definição.....	29
4.3.2 - Sistemas e Parâmetros de Medição de Rugosidade.....	30
a) Desvio Médio Aritmético - Ra (CLA, AA).....	30
b) Altura das Irregularidades dos 10 pontos - RZ.....	30
c) Altura Máxima das Irregularidades - Ry (Rt).....	31
d) Espaçamento Médio das Irregularidades - Sm.....	31
4.3.3 - Rugosidade obtida por Jateamento Abrasivo.....	32
a) Importância das Característica do Abrasivo.....	32
b) Importância dos Procedimentos de Jateamento.....	33
4.4 - Preaquecimento.....	36
<b>V - ADERÊNCIA</b> .....	<b>38</b>
5.1 - Introdução.....	38
5.2 - Fatores Influentes na Aderência.....	39
5.2.1 - Efeito do Jateamento Abrasivo.....	39
5.2.2 - Efeitos da Espessura e Porosidade do Revestimento sobre a Aderência.....	43
5.3 - Testes de Aderência.....	46

5.3.1 - Testes de Tração em Laboratório.....	46
a) Tipos de Falhas.....	48
5.3.2 - Testes de Cizalhamento e Dobramento em Laboratório.....	49
5.3.3 - Testes para Avaliação da Aderência em Campo.....	51
a) Testes Qualitativos/Destrutivos.....	51
b) Testes Mecânicos Quantitativos.....	51
c) Testes não Destrutivos.....	52

## VI - METODOLOGIA EXPERIMENTAL..... 53

6.1 - Materiais e Tipos de Corpos de Prova.....	53
6.2 - Jateamento Abrasivo.....	55
6.2.1 - Etapas de Jateamento.....	55
6.2.2 - Equipamentos e Dispositivos.....	56
a) Equipamentos.....	56
b) Dispositivos.....	58
6.3 - Análise dos Abrasivos.....	58
6.3.1 - Coleta das Amostras.....	58
6.3.2 - Análise Granulométrica.....	59
6.3.3 - Análise Química.....	60
6.3.4 - Análise dos Constituintes e da Forma.....	61
a) Análise dos Constituintes.....	61
b) Análise da Forma.....	61
6.4 - Análise da Superfície do Substrato.....	61
6.4.1 - Medição da Rugosidade e Caracterização da Textura.....	61
6.4.2 - Impregnação por Partículas de Abrasivo.....	62
6.5 - Aspersão Térmica.....	63
6.5.1 - Procedimento de Aspersão.....	63
6.5.2 - Preparação e Classificação dos Corpos de Prova.....	64
6.6 - Ensaio de Aderência por Tração.....	64
6.6.1 - Procedimentos de Colagem e Tração.....	64
6.6.2 - Controle da Espessura dos Revestimentos.....	65
6.7 - Ensaio de Aderência por Dobramento.....	67

<b>VII - RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>68</b>
7.1 - Análise do Abrasivo.....	68
7.1.1 - Análise Granulométrica.....	68
7.1.2 - Contaminação por Ferro e Silício nos Abrasivos.....	71
7.1.3 - Análise dos Constituintes e da Forma.....	73
a) Análise dos Constituintes.....	73
b) Análise da Forma.....	73
7.2 - Análise da Superfície Jateada.....	76
7.2.1 - Rugosidade.....	76
7.2.2 - Textura da Superfície Jateada.....	79
7.2.3 - Impregnação por Partículas de Abrasivos.....	82
7.3 - Ensaios de Aderência por Tração.....	88
7.3.1 - Qualificação dos Revestimentos conforme Normas.....	88
7.3.2 - Efeito do Tipo e Granulometria dos Abrasivos.....	89
7.3.3 - Efeito da Reutilização dos Abrasivos.....	90
7.3.4 - Observações sobre os Tipos de Falhas.....	91
7.4 - Ensaios de Aderência por Dobramento.....	99
7.4.1 - Efeito da Preparação da Superfície.....	99
7.4.2 - Efeitos do Preaquecimento do Substrato e Trat. Térmico Posterior da camada.....	99
<b>VIII - CONCLUSÕES</b> .....	<b>103</b>
<b>IX - PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>105</b>
<b>X - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>107</b>
<b>ANEXO 1</b> .....	<b>113</b>
<b>ANEXO 2</b> .....	<b>118</b>
<b>ANEXO 3</b> .....	<b>122</b>



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros e propriedades dos processos de aspersão térmica.....	5
Tabela 2 - Propriedades e Constituintes dos Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e SiC para jateamento.....	12
Tabela 3 - Propriedades e Constituintes do óxido de alumínio Sinterball.....	12
Tabela 4 - Dimensões das peneiras para teste de abrasivos.....	17
Tabela 5 - Distribuição do tamanho das partículas.....	18
Tabela 6 - Distribuição granulométrica de abrasivos cerâmicos para jateamento.....	18
Tabela 7 - Distribuição granulométrica de granalhas conforme norma SAE J444.....	19
Tabela 8 - Fatores de forma das partículas.....	20
Tabela 9 - Relação das normas de preparação da superfície e graus de limpeza.....	23
Tabela 10 - Graus de corrosão e limpeza por jateamento abrasivo.....	28
Tabela 11 - Condições de jateamento e rugosidade obtida.....	34
Tabela 12 - Métodos de jateamento.....	42
Tabela 13 - Condições de jateamento.....	42
Tabela 14 - Aderência em função da rugosidade.....	42
Tabela 15 - Condições de jateamento das etapas do trabalho.....	55
Tabela 16 - Espessura média dos corpos de prova ensaiados por tração.....	66
Tabela 17 - Comparação da distribuição granulométrica dos abrasivos novos com a classificação da ANSI B-74-12.....	69
Tabela 18 - Níveis de Contaminação de Fe e Si dos abrasivos novos Alundum e Sinterball.....	72
Tabela 19 - Contaminação de Fe e Si em 10Kg do abrasivo Alundum.....	72
Tabela 20 - Idem para o abrasivo Sinterball.....	72
Tabela 21 - Rugosidade média e desvio padrão das séries de jateamento.....	77
Tabela 22 - Resultados do teste de tração com rugosidade Ra, Ry, e Sm do substrato.....	92
Tabela 23 - Resultados dos testes de tração com preaquecimento do substrato.....	93
Tabela 24- Resultados dos ensaios de dobramento.....	101
Tabela 25- Dureza dos revestimentos após aspersão.....	101

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sequência esquemática de eventos na aspersão térmica.....	4
Figura 2 - Classificação dos processos de aspersão térmica.....	5
Figura 3 - Esquema da pistola de aspersão a chama (FS) com arame.....	6
Figura 4 - Esquema da pistola de aspersão por HVOF.....	7
Figura 5 - Esquema da pistola de aspersão a arco elétrico (ASP).....	8
Figura 6 - Separação de amostras por cuba giratória (spinning riffler).....	14
Figura 7 - Formas de partículas.....	19
Figura 8 - Grandezas principais de um gráfico de rugosidade.....	29
Figura 9 - Parâmetros de rugosidade.....	32
Figura 10 - Rugosidade e resíduo versus distância de jateamento.....	35
Figura 11 - A influência do ângulo de jateamento sobre a rugosidade e resíduo.....	35
Figura 12 - Relação entre rugosidade e resíduo em função da pressão, ângulo e tempo.....	36
Figura 13 - Relação entre padrões de limpeza e aderência.....	41
Figura 14 - Aderência do alumínio versus espessura do revestimento para diferentes abrasivos.....	41
Figura 15 - Relação entre os meios de jateamento e aderência para revestimentos de 100µm.....	42
Figura 16 - Aderência em função da espessura do revestimento.....	44
Figura 17 - Aderência em função do diâmetro para duas espessuras de revestimento.....	44
Figura 18 - Aderência em função da espessura relativa do revestimento.....	44
Figura 19 - Variantes de testes de aderência por tração com e sem uso de adesivo.....	47
Figura 20 - Dispositivo de tração com amostra.....	48
Figura 21 - Esquema dos tipos de falha nos testes de tração.....	49
Figura 22 - Variantes de testes de aderência por cisalhamento.....	50
Figura 23 - Corpos de prova para ensaios.....	54
Figura 24 - Equipamento de jato por pressão.....	57
Figura 25 - Cabine de jateamento.....	57
Figura 26 - Dispositivo para fixação do ângulo e distância de jateamento.....	58
Figura 27 - Sequência da operação de quarteamento.....	59
Figura 28 - Pistola de aspersão a chama com arame.....	63
Figura 29 - Dispositivo para colagem dos corpos de prova.....	65

Figura 30 - Espectro para constatação da passagem de adesivo.....	66
Figura 31 - Distribuição granulométrica nas séries de jateamento c/ Alundum, granas 16 e 30.....	70
Figura 32 - Idem com abrasivos Sinterball de granas 1220 e 2040.....	70
Figura 33 - Desgaste dos abrasivos Alundum e Sinterball após a 4ª série jateamento.....	70
Figura 34 - Forma das partículas do abrasivo Alundum de grana 16.....	74
Figura 35 - Idem Alundum de grana 30.....	74
Figura 36 - Idem Sinterball de grana 1220.....	75
Figura 37 - Idem Sinterball de grana 2040.....	75
Figura 38 - Médias das rugosidades Ra obtidas com óxido de alumínio Alundum e Sinterball.....	78
Figura 39 - Idem para Rz.....	78
Figura 40 - Idem para Ry.....	78
Figura 41 - Textura das superfícies jateadas com abrasivo Alundum de grana 16.....	80
Figura 42 - Idem com Alundum de grana 30.....	80
Figura 43 - Idem com Sinterball de grana 1220.....	81
Figura 44 - Idem com Sinterball de grana 2040.....	81
Figura 45 - Partículas de abrasivos aderidas na superfície jateada.....	82
Figura 46 - Superfície jateada com Alundum de grana 16 - micro, espectro e quantificação.....	84
Figura 47 - Idem com Alundum de grana 30.....	85
Figura 48 - Idem com Sinterball de grana 1220.....	86
Figura 49 - Idem com Sinterball de grana 2040.....	87
Figura 50 - Aderência versus rugosidade com abrasivos novos.....	93
Figura 51 - Aderência versus rugosidade com a reutilização dos abrasivos.....	93
Figura 52 - Corpos de prova e extração mostrando o tipo de falha na etapa AA1.....	94
Figura 53 - Idem para a etapa AA2.....	95
Figura 54 - Idem para a etapa AS1.....	96
Figura 55 - Idem para a etapa AS2.....	97
Figura 56 - Corte transversal dos revestimentos de alumínio.....	98
Figura 57 - Partículas de abrasivos aderidas na superfície de fratura.....	98
Figura 58 - Corpo de prova ensaiado por dobramento com substrato preaquecido a 120°C.....	102
Figura 59 - Idem com substrato preaquecido a 250°C.....	102
Figura 60 - Idem com substrato preaquecido a 120°C e trat. térmico do revestimento a 400°C...102	102

## RESUMO

É analisada a influência da preparação da superfície de aço carbono, com graus A e C de corrosão, na aderência de revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica a chama. Para esta análise verificou-se o desgaste através do peneiramento, variação da forma por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e contaminação por análise química dos abrasivos a base de óxido de alumínio após quatro operações controladas de jateamento. O efeito da reutilização dos abrasivos sobre as superfícies foi detectado pelas medições, com rugosímetro portátil e de bancada, dos parâmetros de rugosidade Ra, Rz, Ry e Sm, caracterização da textura e constatação por análise quantitativa e fotográfica, por MEV, da impregnação com partículas de abrasivos, nas primeiras e quartas utilizações. Além disso foram efetuados preaquecimentos dos substratos a 120 °C, 250 °C e tratamento térmico a 400 °C dos revestimentos. As variações na aderência dos revestimentos com as reutilizações dos abrasivos e preaquecimentos do substrato foram definidas pelos ensaios de tração e dobramento. Os resultados, relativamente bons em relação a literatura, mostraram a possibilidade de reutilização dos abrasivos, porém é necessário o preaquecimento do substrato para se atingir os requisitos de aderência das normas de qualificação de procedimentos de aspersão térmica.

## ABSTRACT

This work evaluated the influence of surface preparation, of carbon steel with A and C degrees of corrosion, on the adherence of aluminium coating deposited by flame spraying. Wear, shape variation and contamination of the abrasives were evaluated after four controlled blasting operation, through sieving methods, scanning electron microscopy (SEM) and chemical analysis respectively. The effect of the repeated utilisation of the abrasives on the surfaces was quantified for the parameters Ra, Rz, Ry and Sm, using portable and bench roughness meter instruments. Topography and substrate surface impregnation with abrasive particles were analysed using SEM. The deposition of thermal sprayed coating were performed on substrate preheated to 120 °C and 250 °C, and in some cases was applied a 400 °C thermal treatment to the coating. The adherence was evaluated using tensile and bend tests. The good adherence results obtained, as compared to similar data published by other authors, indicate that is possible to reuse for several times the abrasive, but in order to achieve the thermal spraying standards requirements fixed for procedure qualification, a preheat of the substrate is necessary.

## I INTRODUÇÃO

A corrosão dos materiais metálicos é de conhecimento da humanidade a milhares de anos, sendo comprovada pelo grande valor dado a metais, como ouro e prata, que possuem desprezíveis taxas de deterioração. Mesmo assim ainda hoje existe a preocupação de se criar mecanismos que impeçam ou minimizem as perdas ocorridas, pois são altos os gastos na reparação dos equipamentos e estruturas que estão sujeitos ao desgaste por corrosão. Estimou-se uma perda da ordem de US\$ 200 bilhões no ano de 1990 a nível mundial, enquanto no Brasil esta cifra situa-se na faixa de US\$ 5 bilhões. Estes valores poderiam ser minimizadas em US\$ 15 bilhões e US\$ 300 milhões a nível mundial e nacional, respectivamente, aplicando-se corretamente a tecnologia de tratamento de superfícies [1].

Métodos de proteção de superfícies são praticados desde o século XIX quando o inglês Humphry Davy usou a proteção catódica para resolver o problema de corrosão em navios, nas longas viagens da Inglaterra para a Índia. Também nessa época Faraday e outros pesquisadores observaram a resistência a corrosão do ferro ligado com cromo. Porém o grande salto no combate a corrosão ocorreu com a Revolução Industrial devido ao surgimento de diferentes tipos de materiais e produtos anti-corrosivos como aços inoxidáveis, tintas, além de vários inibidores de corrosão [2].

O revestimento das superfícies com materiais mais resistentes a corrosão é uma técnica denominada proteção por barreira. Entre os métodos de revestimento incluem-se a soldagem (cladding, lining), imersão a quente, que se caracterizam pela exposição do metal base a altas temperaturas, e pintura, aspersão térmica onde a deposição ocorre com baixas temperaturas do substrato. Nos primeiros métodos obtém-se revestimentos mais aderentes, mas o substrato pode sofrer transformações microestruturais indesejáveis. Ao contrário nos métodos de deposição a frio (pintura, aspersão térmica) apesar de menor aderência o substrato não sofre modificações na sua microestrutura, além de permitir reparos em menor tempo e com custos mais baixos.

Dentre os métodos citados a aspersão térmica tem sido utilizada para deposição de revestimentos desde 1920 na proteção contra corrosão [3] e, com materiais adequados (alumínio, zinco), conseguiu-se uma vida útil de 20 anos, sem reparos, em estruturas e equipamentos sujeitos a corrosão por atmosfera marinha, imersos em água do mar e na zona de variação da maré [3, 4].

Os relatórios de várias instituições, como o Instituto de Pesquisa Naval da Noruega, a Marinha Americana, Instituto Tecnológico de Hokkaido - Japão e American Welding Society,

atestam a eficácia do sistema de revestimento com alumínio ou zinco, por aspersão térmica, no combate a corrosão. Entre as aplicações feitas podem ser citadas aquelas para proteção de estruturas e instalações “offshore”, convés e corpo de válvulas de vapor dos navios, válvulas de vapor de mísseis, bombas de combustível de baixa pressão, aplicações criogênicas e em meios contendo cloretos [4, 5, 6].

Entretanto esta técnica (aspersão térmica) não era muito utilizada no Brasil até alguns anos atrás, tendo atualmente um desenvolvimento acelerado, principalmente em empresas como a Petrobras, por servir de opção na proteção contra corrosão tanto para equipamentos de refinarias como na exploração e transporte do petróleo.

## **1.1 Justificativas**

O propósito deste estudo nasceu da necessidade de desenvolver e qualificar procedimentos de deposição de revestimentos de alumínio por aspersão térmica, utilizando os vários processos de aplicação (aspersão a chama, aspersão a chama de alta velocidade e arco elétrico), para se ter o controle dos requisitos necessários a serem exigidos na contratação de serviços junto a empresas aplicadoras. Daí surgia, em colaboração com o CENPES-PETROBRAS, uma linha de pesquisa para determinar quais condições de deposição favoreceriam a obtenção de revestimentos com melhores níveis de resistência a corrosão, correlacionadas com a aderência, nível de porosidade e teor de óxidos.

## **1.2 Objetivos**

Nesse trabalho, especificamente, procurou-se correlacionar o preparo da superfície (limpeza, rugosidade e preaquecimento) com a aderência dos revestimentos de alumínio.

Por isso foram analisados os abrasivos e procedimentos industrialmente utilizados na preparação da superfície, por jateamento abrasivo, para aspersão térmica de alumínio sobre aço carbono, com os seguintes objetivos específicos:

a) Comparar dois tipos de abrasivos comerciais a base de alumina (Alundum e Sinterball), distintos quanto ao processo de fabricação, nível de pureza e custo, analisando em função de seu desgaste e grau de contaminação, a viabilidade de sua reutilização para atingir padrões de limpeza e faixas de rugosidades Ry exigidas pelas normas MIL 2138A, AWS C2-18 e Petrobras N-2568;

- b) Verificar a correlação entre as faixas de rugosidade  $R_y$  recomendadas pelas normas citadas no item “a” e os níveis de aderência atingidos na aspersão térmica a chama;
- c) Verificar a necessidade de preaquecimento para atingir os níveis de aderência exigidos para qualificação de procedimentos para deposição de revestimentos por aspersão térmica;
- d) Analisar a aplicabilidade do ensaio de dobramento, como alternativa mais simples e sem uso de adesivo, ao ensaio padronizado de tração (ASTM C-633).



## II ASPERSÃO TÉRMICA

### 2.1 Processos de Aspersão Térmica

Aspersão térmica é o nome dado a um grupo de processos utilizados para a deposição de revestimentos metálicos ou não metálicos em substrato de aço a plásticos. Nestes processos o material do revestimento, na forma de pó ou arame, é fundido por uma fonte de calor química ou elétrica e impulsionado por ar comprimido ou outros gases de encontro a uma superfície previamente preparada no que diz respeito a limpeza, rugosidade e aquecimento. As partículas aspergidas aderem ao substrato por mecanismos de natureza mecânica, química-metalúrgica e física dependendo da temperatura da fonte de calor e velocidade imposta as partículas, que pela sobreposição formam camadas de estrutura lamelar com óxidos e poros [7 a 10]. A figura 1 mostra a seqüência esquemática da aspersão térmica.

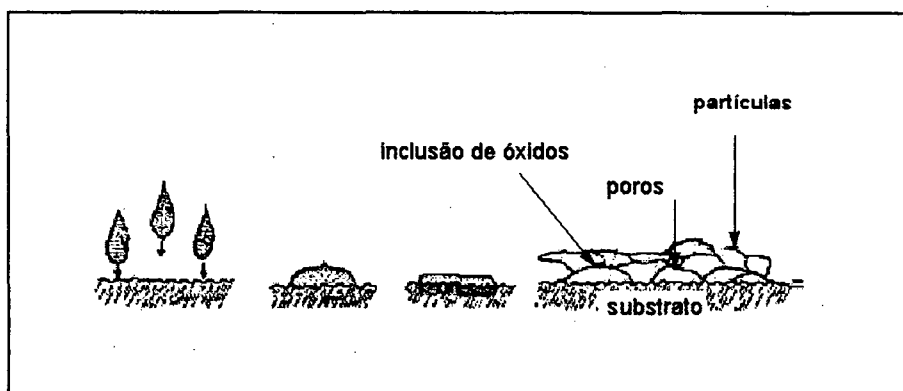


Figura 1 - Seqüência esquemática de eventos na aspersão térmica [9]

São vários os processos utilizados para deposição de revestimentos por aspersão térmica, porém podem ser classificados em função dos métodos de aquecimento e material a ser aspergido [7, 11, 12]. Na figura 2 é mostrado um esquema da classificação dos processos, sendo que os mais utilizados para deposição de alumínio são: aspersão a chama convencional (FS), aspersão a chama com alta velocidade (HVOF) e aspersão a arco elétrico (ASP). Os parâmetros característicos desses processos, bem como algumas propriedades dos revestimentos estão reunidos na tabela 1.

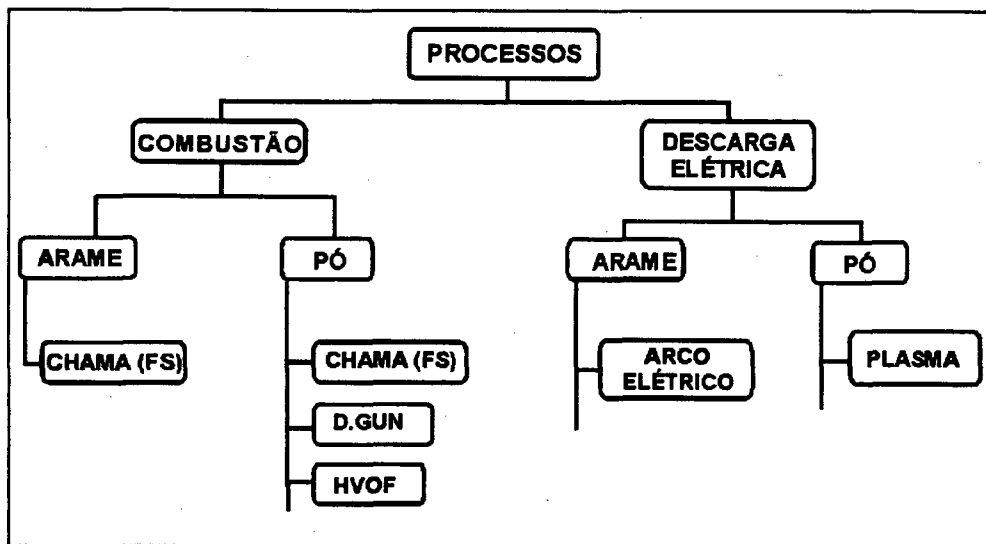


Figura 2 - Classificação dos processos de aspersão térmica [7, 11, 12]

Tabela 1 - Parâmetros e propriedades dos processos de aspersão térmica [8, 13 a 20]

Processos → Parâmetros ↓	FS		HVOF	Arco Elétrico
	pó	arame	pó	arame
Temperatura da Chama/Arco [°C]	2200 - 3200	2800 - 3200	2700 - 3100	4000 - 6000
Velocidade das partículas [m/s]	30 - 150	180 - 250	600 - 1200	100 - 250
Atmosfera da Chama/Arco	CO - CO <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> - CO CO <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> - CO CO <sub>2</sub> - H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub> - O <sub>2</sub>
Aderência [MPa]	4 - 20		70 - 100	10 - 36
Teor de Óxidos [%]	6 - 15 (0,4)	4 - 15 (0,4)	0,2 - 5	10 - 20 (0,5 - 3)
Porosidade [%]	5 - 15	5 - 15	0 - 2	10 - 15 (2 - 3)

### 2.1.1 Processos a Combustão

#### a) Aspersão a Chama - FS (Flame Spray)

Foi com este processo que teve início a aspersão térmica nos idos de 1910, através da descoberta de M.U.Schoop. Este engenheiro suíço foi o primeiro a descobrir que materiais na forma de pó (em 1912 utilizou arame como consumível) aquecidos e impulsionados com jatos de ar poderiam revestir superfícies. Estava patenteado o primeiro processo de aspersão térmica. Com alguns avanços tecnológicos surgiram as pistolas atuais de aspersão a chama (FS) [17].

Os equipamentos de aspersão a chama convencional (FS), como pode ser visto na figura 3, caracterizam-se por apresentar como fonte de calor uma chama oxi-gás combustível para fundir o material na forma de pó ou arame, que é impulsionado por ar comprimido ou gases inertes até o substrato

Os gases utilizados como combustível são: propano, gás natural, hidrogênio e acetileno. Destes o que mais se usa na prática é o acetileno, que pelo maior poder calorífico produz chamas com temperatura de até 3.200 °C.

As menores velocidades (em relação ao processo HVOF) tendem a expor as partículas, menos aquecidas (comparando-se com arco elétrico e arco plasma), por tempo mais longo durante o percurso bocal/substrato. Isto é a causa da presença de maior teor de óxidos nos revestimentos depositados por FS. Estes óxidos e partículas semi-fundidas são responsáveis pelo aparecimento de maior percentual de porosidade, por impedir que as partículas subsequentes preencham os interstícios criados a sua volta.

Outro ponto a ser destacado neste processo é o mecanismo de aderência que, devido as baixas temperaturas e velocidades das partículas, se processa primeiramente por ancoragem (mecanismo mecânico) exigindo uma limpeza rigorosa e rugosidade apropriada do substrato.

Apesar destas deficiências o processo FS apresenta valores de aderência satisfatórios para serviços de menor responsabilidade. Além disso é um processo ainda muito utilizado pela sua versatilidade, baixo custo, fácil manutenção e obtenção de altas taxas de deposição [8].

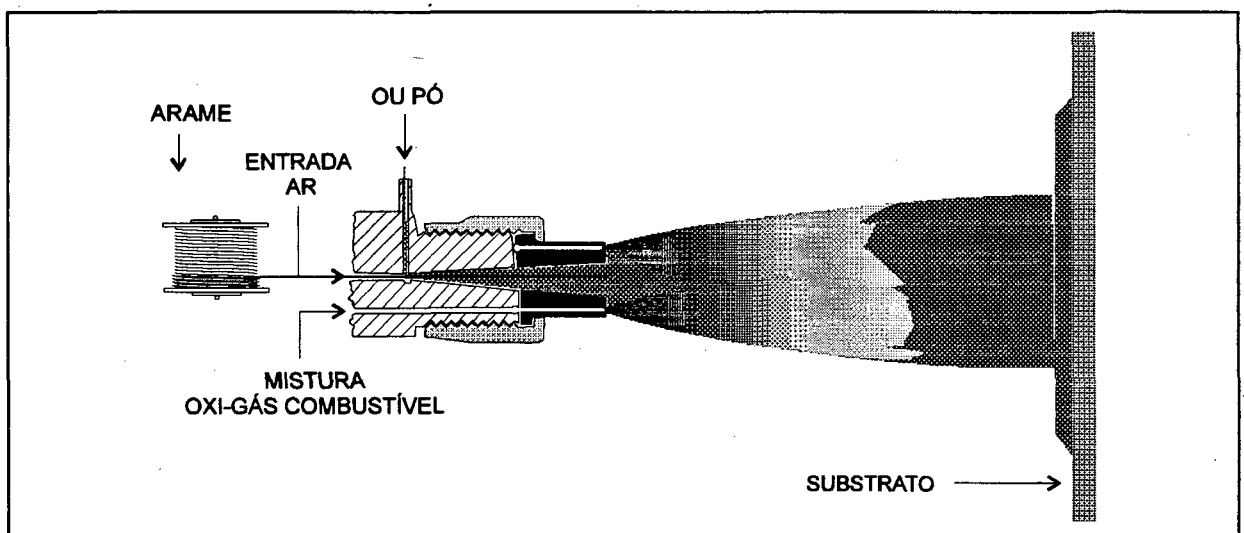


Figura 3 - Esquema da pistola de aspersão a chama (FS) com arame ou pó [9].

### b) Aspersão a Chama com Alta Velocidade - HVOF (High Velocity Oxi-Fuel)

Uma das limitações nos processos a combustão é o poder calorífico dos gases combustíveis, por isso os avanços tecnológicos tiveram como meta aumentar a velocidade das partículas. Com velocidades maiores as partículas tendem a chegar ao substrato com alta energia térmica (fonte de calor) e cinética (alta velocidade) [11].

Objetivando essas melhorias foi criado pela Union Carbide o sistema de aspersão por detonação que proporcionava camadas de melhor qualidade pela alta velocidade imposta as partículas quando da explosão. Porém este equipamento por ser de grande porte inviabilizava sua locomoção para uso em campo, e sendo propriedade exclusiva seu uso ficou restrito a células de manufatura criadas pela própria empresa [7].

Em 1982 James Browning revolucionou o mercado apresentando as pistolas de aspersão a chama com alta velocidade (HVOF) com o nome de Jet Kote, que alia o desempenho dos equipamentos de detonação com a versatilidade das pistolas de aspersão a chama (FS). Vale ressaltar que nos anos seguintes este processo foi patenteado com outras denominações por vários fabricantes [21].

Nestas pistolas ocorre essencialmente a combustão de um gás (propileno/propano/hidrogênio/acetileno) ou líquido (querosene) dentro de uma câmara pressurizada. Os pós são introduzidos nesta câmara por um alimentador pressurizado, onde são aquecidos até as temperaturas alcançadas com a ignição da mistura e impulsionados com alta velocidade até o substrato [21]. Estas altas velocidades são responsáveis pelo menor tempo de permanência no trajeto bocal/substrato e aumento da energia das partículas. Portanto se obtém revestimentos mais densos com menores teores de óxidos e poros além do favorecimento do mecanismo de aderência metalúrgico. A figura 4 mostra um esquema das pistolas de HVOF.

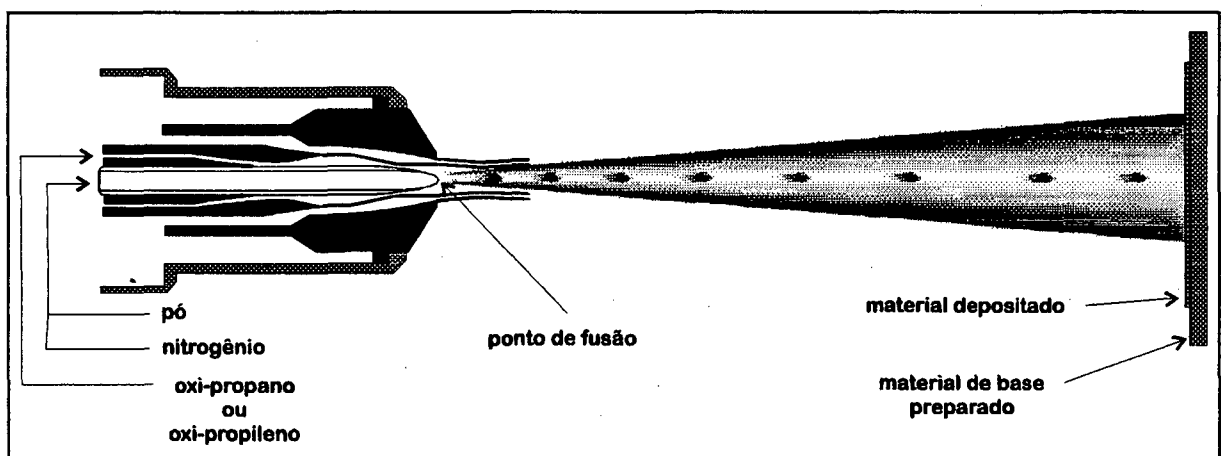


Figura 4 - Esquema das pistolas de aspersão por HVOF [22].

## 2.1.2 Processos a Descarga Elétrica

### a) Arco Elétrico - ASP (Arc Spray Process)

Este equipamento foi desenvolvido com o intuito principal de aumentar a temperatura de fusão do material a ser aspergido, pois a temperatura da descarga é maior em comparação a combustão de gases. As temperaturas obtidas podem chegar ao patamar de 6000 °C, porém as velocidades situam-se na mesma faixa do processo FS. Com estas altas temperaturas e baixas velocidades obtém-se revestimentos com valor elevado de óxidos e poros. Era de se esperar baixos valores de aderência, mas felizmente não ocorrem, pois as altas temperaturas propiciam o mecanismo de aderência metalúrgico.

O processo a arco elétrico utiliza dois arames carregados eletricamente, que aproximados por um alimentador geram um diferencial de tensão para produzir a fusão do material a ser pulverizado por um jato de ar comprimido ou gases [8]. A figura 5 mostra um esquema das pistolas de arco elétrico.

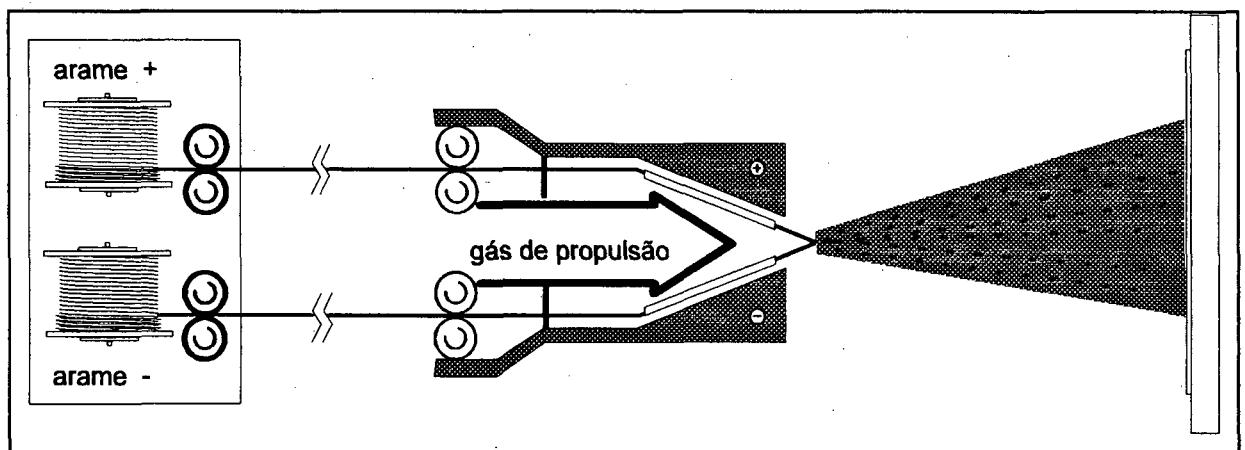


Figura 5 - Esquema da pistola de aspersão a arco elétrico (ASP) [23].

## III ABRASIVOS

### 3.1 Introdução

Um dos parâmetros mais importantes em uma operação de jateamento é, sem dúvida, o abrasivo. Isto porque, dependendo da forma, granulometria e tipo, proporciona diferentes graus de limpeza e níveis de rugosidade. Devido a isso há necessidade de caracterizá-lo eficazmente para se conseguir o objetivo final com sucesso.

Antes de relatar os meios de caracterizar um abrasivo será feito um histórico da evolução dos materiais utilizados em processo de jateamento.

A areia foi o primeiro e, por muito tempo, o único material empregado no processo de jateamento, sendo de grande utilização até os dias atuais. Isto está associado a sua facilidade de obtenção e processamento, o que minimiza o custo inicial do processo. Por outro lado, a necessidade de operações de jateamento em situações mais críticas e controladas tornou a areia inviável, por apresentar grande degradação e impregnação. Com isso procurou-se descobrir outros minerais "in natura" que pudessem evitar esses problemas, e dentre estes materiais pode-se citar o quartzo, ou cristal de rocha [24, 25].

Após um primeiro estágio o incremento na utilização desses abrasivos naturais viabilizou processos industriais de classificação e moagem, fazendo com que hoje se tenha a disposição abrasivos naturais com especificações das mais rigorosas [24, 25].

Posteriormente, na tentativa de aumentar a intensidade de jateamento, conseguir maior durabilidade das partículas e reduzir a formação de pó, foram introduzidas técnicas para obtenção artificial de materiais abrasivos. Entre estes encontram-se a granalha de aço, óxido de alumínio e carboneto de silício [24, 25].

Atualmente existe uma gama muito grande de materiais que são utilizados para jateamento, porém o serviço a ser executado é que ditará a escolha do abrasivo.

### 3.2 Classificação dos Abrasivos

A American Welding Society [26] faz uma classificação dos abrasivos segundo o material que o originou. Conforme esta classificação podem ser metálicos e não-metálicos.

## III ABRASIVOS

### 3.1 Introdução

Um dos parâmetros mais importantes em uma operação de jateamento é, sem dúvida, o abrasivo. Isto porque, dependendo da forma, granulometria e tipo, proporciona diferentes graus de limpeza e níveis de rugosidade. Devido a isso há necessidade de caracterizá-lo eficazmente para se conseguir o objetivo final com sucesso.

Antes de relatar os meios de caracterizar um abrasivo será feito um histórico da evolução dos materiais utilizados em processo de jateamento.

A areia foi o primeiro e, por muito tempo, o único material empregado no processo de jateamento, sendo de grande utilização até os dias atuais. Isto está associado a sua facilidade de obtenção e processamento, o que minimiza o custo inicial do processo. Por outro lado, a necessidade de operações de jateamento em situações mais críticas e controladas tornou a areia inviável, por apresentar grande degradação e impregnação. Com isso procurou-se descobrir outros minerais "in natura" que pudessem evitar esses problemas, e dentre estes materiais pode-se citar o quartzo, ou cristal de rocha [24, 25].

Após um primeiro estágio o incremento na utilização desses abrasivos naturais viabilizou processos industriais de classificação e moagem, fazendo com que hoje se tenha a disposição abrasivos naturais com especificações das mais rigorosas [24, 25].

Posteriormente, na tentativa de aumentar a intensidade de jateamento, conseguir maior durabilidade das partículas e reduzir a formação de pó, foram introduzidas técnicas para obtenção artificial de materiais abrasivos. Entre estes encontram-se a granalha de aço, óxido de alumínio e carboneto de silício [24, 25].

Atualmente existe uma gama muito grande de materiais que são utilizados para jateamento, porém o serviço a ser executado é que ditará a escolha do abrasivo.

### 3.2 Classificação dos Abrasivos

A American Welding Society [26] faz uma classificação dos abrasivos segundo o material que o originou. Conforme esta classificação podem ser metálicos e não-metálicos.

### **a) Abrasivos Metálicos**

São fabricados a partir do aço e ferro fundido, sendo classificados em função da sua forma em angular (grit) e esférica (shot). No Brasil são conhecidas como granalhas.

A forma angular possui uma abrasividade maior sendo indicada para remoção de carepa de tratamento térmico, ferrugem e prover rugosidade controlada na superfície de peças antes da operação de revestimento. Podem ser encontradas em durezas de 45 HRc, 56 HRc e 65 HRc. A forma esférica possui uma ação abrasiva menor e por isso não é utilizada para promover rugosidade, porém pode remover os contaminantes de uma superfície pelo impacto. Também é adequada para operações de "shot peening" [26].

Além da forma estes abrasivos possuem características que os tornam apropriados para operações de jateamento. Entre estas características incluem-se elevadas densidade e dureza. Porém a grande desvantagem que este tipo de abrasivo apresenta é a sua tendência a oxidação, pois quando de sua utilização em operações de jateamento, as partículas retidas no substrato oxidam-se rapidamente, tendendo a ser um ponto de falha na aderência do revestimento. Isto é, há uma contaminação metálica da superfície jateada [26].

### **b) Abrasivos Não-Metálicos**

Os abrasivos não-metálicos são classificados como areias, esferas de vidro e materiais orgânicos mistos.

O termo "areia" (sand) é aplicado para diversos abrasivos não-metálicos além da própria areia, entre estes o quartzo, óxido de alumínio e carboneto de silício [26].

A areia propriamente dita ainda é um dos abrasivos mais utilizados em serviços de menor responsabilidade. No caso de jateamento de superfícies a serem revestidas por aspersão térmica sua utilização deixa a desejar. Isto porque sua degradação é muito grande, ocasionando a impregnação da superfície com finos (resíduo) e também por não se conseguir mais os níveis de rugosidade requeridos já após um ou dois ciclos de jateamento[24].

O quartzo, ou cristal de rocha, é um material granulado e classificado artificialmente, apresentando maior dureza e ausência de sílica livre. Seus efeitos abrasivos são um pouco mais acentuados que os da areia, mas menores que os do óxido de alumínio [24]. Segundo V. Ett [27] o quartzo assim como o óxido de alumínio são os melhores abrasivos disponíveis para se aliar limpeza com rugosidade. A explicação é que ambos possuem planos de cisalhamento extremamente ativos que absorvem grande quantidade de gases, líquidos e até sólidos. O mesmo autor ressalta ainda que o quartzo por ser relativamente econômico pode ser desprezado após



uma única aplicação. Este relato sobre o quartzo se contrapõe a um dos objetivos do trabalho que é determinar um abrasivo capaz de suportar vários ciclos de trabalho sem degradação.

O carboneto de silício foi o primeiro abrasivo fabricado artificialmente. É um abrasivo de elevada dureza, superando 9 na escala Mohs ( 1500 a 2500 na Dureza Knoop ), sendo fabricado economicamente dentro de uma faixa de composição que apresenta algumas impurezas, tais como  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [24].

O óxido de alumínio é um abrasivo artificial obtido a partir da bauxita triturada, calcinada e misturada com pequenas porcentagens de coque, ferro, titânio e óxido de magnésio, que são colocados dentro de um forno elétrico a arco ( tipo Higgins ) devidamente refrigerado por água. A fusão ocorre a uma temperatura entre 1900 °C a 2000 °C durante um tempo de 36 h, enquanto o resfriamento pode ser de até uma semana. O bloco formado é fraturado e triturado. A dureza deste abrasivo é elevada, quase igual a do carboneto de silício. A alta dureza dos grãos, sua forma angular com arestas finas e cortantes, sua densidade próxima de 3 g/cm<sup>3</sup> e a natureza química praticamente inerte, são requisitos essenciais em operações de jateamento onde se deseja obter rugosidade uniforme e não impregnação da superfície. O óxido de alumínio de acordo com a matéria prima e as condições de fabricação recebe uma classificação distinta [28]. A Norton possui 4 classes de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com o nome comercial de Alundum, conforme pode ser verificado na tabela 2. A Metco é outro fornecedor de óxido de alumínio, que neste caso é denominado Metcolite, sendo classificado segundo a granulometria em 3 classes: C, F, VF. Estas classes são idênticas quanto a composição química, ou seja, possuem 99,680 % de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

A bauxita, principal matéria prima do óxido de alumínio, dá origem a outro tipo de abrasivo que é o Sinterball. Este é obtido a partir de minerais (bauxita em maior proporção) sinterizados a altas temperaturas sendo o córindon (  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  ) seu principal constituinte. A tabela 3 apresenta os constituintes do Sinterball.

Estudos realizados por Fragata e Meduna [29] sobre amostras de Sinterball mostraram resultados que devem ser considerados na escolha do abrasivo para jateamento. Um fator relevante detectado neste tipo de abrasivo é que o mesmo não contém sílica livre como foi comprovado pela Fundacentro [30].

Constatamos na revisão deste item que nem sempre um abrasivo atende a todos os requisitos necessários a obtenção de uma superfície ideal para deposição de revestimentos por aspersão térmica. Por exemplo os abrasivos metálicos apresentam uma durabilidade muito maior em comparação aos não-metálicos, porém impregnam a superfície com partículas altamente oxidáveis. Por outro lado alguns abrasivos não-metálicos (areia) podem conter elementos ( mica,

silica livre) que causam danos tanto a saúde do operador como a aderência do revestimento, além de não proporcionarem rugosidade suficiente para aspensão térmica.

Portanto há necessidade de utilizarmos abrasivos que tenham durabilidade, não contaminem a superfície, não sejam nocivos ao operador e proporcionem um adequado perfil de ancoragem. Dos abrasivos citados àqueles a base de óxido de alumínio são os que melhores se enquadram nesses requisitos [26, 27].

**Tabela 2 - Propriedades e Constituintes dos  $Al_2O_3$  e SiC para Jateamento [28]**

Denominação →	38 A $Al_2O_3$ Branco	A $Al_2O_3$ Normal	25 A $Al_2O_3$ Rubi	ZF / ZS $Al_2O_3$ Zircônio	37 C SiC Negro	39 C SiC Verde
Propriedades ↓						
Cor	Branco	Marrom	Rubi	Cinza	Negro	Verde
Características	Duro e Friável	Duro e Muito Tenaz	Duro e Friável	Duro e muito tenaz	Duro e Friável	Duro e muito Friável
Peso Específico [ $g/cm^3$ ]	3,90	3,97	3,95	4,55	3,20	3,20
Ponto de Fusão [°C]	2050	1950	2050	1900	2500	2500
Coef. Dilatação Linear [ $\times 10^6$ °C]	8,6	8,6	8,6	-	4,7	4,7
$Al_2O_3$ [%]	99,680	95,300	95,000	54,350	0,100	-
$SiO_2$ [%]	0,100	1,500	1,000	0,600	-	-
$Fe_2O_3$ [%]	0,020	0,400	0,150	0,250	-	-
$TiO_2$ [%]	0,008	2,800	3,100	2,200	0,200	-
CaO [%]	-	0,200	0,150	0,100	-	-
$Na_2O$ [%]	0,200	0,020	-	-	-	-
$Cr_2O_3$ [%]	-	-	-	-	-	-
$ZrO_2$ [%]	-	-	-	42,500	-	-
SiC [%]	-	-	-	-	98,000	-
Si [%]	-	-	-	-	0,300	-
C [%]	-	-	-	-	0,300	-

**Tabela 3 - Propriedades e Constituintes do óxido de alumínio Sinterball [31]**

Denominação →	SBA 1220 e SBA 2040	
Propriedades ↓		
Cor	Negro	
Características	Duro e Tenaz	
Peso Específico [ $g/cm^3$ ]	3,77	
Ponto de Ebulição [°C]	2.480	
$Al_2O_3$ [%]	78,20	
$Fe_2O_3$ [%]	13,00	
$SiO_2$ [%]	4,21	
$TiO_2$ [%]	1,82	
CaO + MgO [%]	0,22	
$K_2O$ + $Na_2O$ [%]	0,83	

### 3.3 Testes para Caracterização de Pós Abrasivos

Os abrasivos podem variar quanto a forma das partículas, granulometria e composição química. Por isso é necessário efetuar testes que permitam especificar um determinado abrasivo com um mínimo de variação possível, pois isto evitará a não uniformidade de resultados da sua aplicação.

Com base nisso mostraremos na seqüência os parâmetros para classificação e métodos de testes adotados.

#### 3.3.1 Amostragem

Os abrasivos são normalmente produzidos e processados em quantidades desde quilogramas até toneladas. Entretanto as medições de granulometria são feitas com amostras contendo apenas algumas gramas, podendo conduzir a erros de amostragem. Para minimizar este erro é recomendado, no caso de lotes maiores, o método da divisão de amostra ( Sample Splitting Method). Este método consiste na divisão de um grande lote em lotes menores, que são agrupados e novamente separados para a coleta, até que seja extraída uma amostra de tamanho propício ao teste. Para tanto, o lote inicial é amontoado na forma de um cone, o qual é dividido em quatro partes iguais. Duas dessas partes são separadas para formar uma sub-amostra, esta nova sub-amostra passa pelo mesmo processo. Este procedimento continua até a amostra final [32].

Um método automático pode ser adotado para este procedimento. O dispositivo mostrado na figura 6 é utilizado para este método de coleta. O mesmo consiste no derramamento do abrasivo dentro de uma cuba giratória dividida em um determinado número de partes ( $z = 10$ ). Durante cada rotação é criado um número "z" de partes. Após "n" rotações o material é dividido em " $z \cdot n$ " partes que formam "y" sub-amostras. Tais mecanismos podem ser utilizados para subdivisões abaixo de uma grama.

A norma ASTM B 215 [33] fixa um procedimento para a retirada de amostras de pós para testes de caracterização. A mesma consiste de dois procedimentos sendo um deles para análise na linha de produção e o outro para pós armazenados em "containers".

Em nosso caso onde as quantidades são menores o método de Thümmeler [32] é o mais indicado, além disso o princípio básico é o mesmo para ambos os métodos.

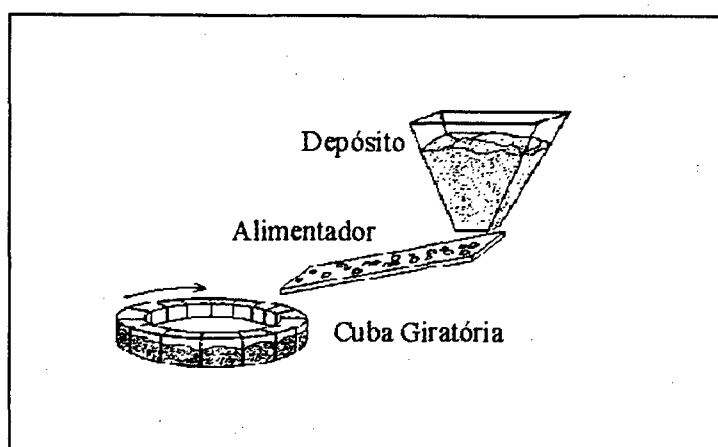


Figura 6 - Separação de amostra por cuba giratória ( spinning riffler ) [32].

### 3.3.2 Granulometria

A granulometria, ou seja a dispersão de tamanho das partículas de abrasivos depende de vários fatores, tais como: técnicas de medição, parâmetros adotados e forma.

Os métodos de análise segundo Thümmler dividem-se em: método de contagem, sedimentação, difração e dispersão de luz e separação.

Entre os métodos citados o mais adequado e utilizado para classificação de abrasivos para jateamento é o método da separação, no qual está incluído o peneiramento. Os outros prestam-se para análise de pós muito finos, que não serão utilizados em nossos experimentos. Portanto faremos uma revisão detalhada apenas do método de separação

No método de separação (classificação) está contido o peneiramento, sendo a técnica mais comum e rápida na classificação e determinação do tamanho de partícula. Este tipo de teste utiliza várias peneiras sobrepostas onde a superior é a mais grosseira e na seqüência são colocadas as de malha mais fina. A operação de peneiramento pode ser manual, por dispositivos vibratórios, por jatos de ar ou sônicos. Após este peneiramento determinadas quantidades do abrasivo são retidas em cada peneira, configurando desta maneira a classificação que se desejava obter para determinada amostra [32, 34].

As peneiras podem ser classificadas pelo tamanho da abertura em  $\mu\text{m}$  ou mm e também pelo número da malha. Este fornece a quantidade de aberturas por polegada linear. A ASTM através da norma E 11 [35] fornece uma tabela onde consta a designação das peneiras tanto em unidades métricas como a classificação alternativa por número da malha ( mesh number ). A tabela 4 também contém outros dados como a abertura nominal em polegadas, o diâmetro

nominal do arame, entre outros.

A peneira tem o início da numeração da maior abertura para a menor. Ou seja, a peneira número 4 tem uma abertura de 4,75 mm e a número 5 uma de 4,00 mm, sendo que a mais fina é a de número 400 que corresponde a uma abertura de 38  $\mu\text{m}$ . Para esta peneira o arame utilizado deve ser de 0,025 mm que, como pode-se notar, é um diâmetro muito fino. Por isso os pós com granulometria inferior não podem ser classificados por peneiramento seco, conforme especificado pela norma ASTM E 11.

R.M. German [34] cita que com peneiras eletroformadas consegue-se classificar pós de até 5  $\mu\text{m}$ , porém este processo não é muito utilizado na prática devido a aglomeração dos pós muito finos dificultando o peneiramento. F. Thümmeler [32] relata que com o peneiramento sônico ou com jatos de ar obtêm-se a classificação de pós abaixo de 10  $\mu\text{m}$ . Para pós muito finos pode-se utilizar o peneiramento molhado, que consiste na adição do pó à peneira dentro de uma solução líquida.

Para o caso de classificação de abrasivos para jateamento, como um processo de preparação de superfície para aspensão térmica, o peneiramento seco é suficiente para alcançar bons resultados porque os pós situam-se em uma faixa maior que 38  $\mu\text{m}$ .

A ASTM através da norma B 214 [36] padroniza o método de teste de peneiramento de pós metálicos granulares. Para o caso de pós cerâmicos como óxido de alumínio, sílica entre outros é recomendado a utilização da norma ASTM C 371 [37].

A quantidade em peso da amostra é de 100g quando a densidade aparente do pó é maior que 1,50  $\text{g}/\text{cm}^3$  e 50 g para pós com densidade menores que 1,50  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Esta amostra deve ser colocada em uma peneira de grande abertura, onde não deve ficar retido nenhuma quantidade do pó. Na sequência diminui-se a abertura das peneiras até atingir uma onde não passe nenhuma porção da amostra. A granulometria do pó está contido entre estas duas peneiras. A distribuição granulométrica é feita através da pesagem das porcentagens retidas nas peneiras intermediárias [36, 37].

A American Welding Society (AWS) [10] reproduz na tabela 5, do Departamento de Comércio da Associação de Grãos Abrasivos, alguns dados sobre a classificação de grãos. Nesta tabela consta os números das malhas e os tamanhos de grãos. No interior encontra-se a distribuição do tamanho. Por exemplo, quando menciona-se um grana 24 sabe-se que a amostra do pó passa toda pela malha 16, 25 % é retida na malha 20, 45 % na malha 25, 25 % na malha 30, 2 % na malha 35 e 3 % na malha 40.

A classificação da AWS enquadra-se na apresentada pela norma ANSI B-74.12 [38], que é

definida pela tabela 6 apresentada na seqüência. Nessa pode-se visualizar as peneiras maiores com 0 % de retenção, as menores com máximo de 5 % de partículas passantes e as intermediárias com suas distribuições específicas.

Uma das simbologias muito utilizadas para definir o tamanho de grão é G18, G25, apresentada pela norma SAE J444. A distribuição correspondente a esses tamanhos esta contida na tabela 7, sendo específica para granalhas angulares.

Como pode-se notar as distribuições granulométricas para um mesmo tamanho variam em função da norma adotada. Por exemplo o grão SAE G16 tem distribuição diferente da grana 16 apresentada pela ANSI B 74-12. Em função desta variação adotaremos em nossas análises a classificação apresentada pela ANSI B 74-12 por ser a específica para pós abrasivos de óxido alumínio para jateamento.

Tabela 4 - Dimensões das Peneiras para Teste de abrasivos [35]

PENEIRAS		Abertura Nominal	Variação permissível da Abertura padrão	Máximo tamanho de abertura p/até 5% do total de aberturas	Abertura Individual Máximal	Diâmetro Nominal do Arame
Padrão	Alternativa	pol.				mm
125 mm	5 pol.	5	± 3,7 mm	130,0 mm	130,9 mm	8,0
106 mm	4,24 pol.	4,24	± 3,2 mm	110,2 mm	111,1 mm	6,40
100 mm	4 pol.	4	± 3,0 mm	104,0 mm	104,8 mm	6,30
90 mm	3 ½ pol.	3,5	± 2,7 mm	93,6 mm	94,4 mm	6,08
75 mm	3 pol.	3	± 2,2 mm	78,1 mm	78,7 mm	5,80
63 mm	2 ½ pol.	2,5	± 1,9 mm	65,6 mm	66,2 mm	5,50
53 mm	2,12 pol.	2,12	± 1,6 mm	55,2 mm	55,7 mm	5,15
50 mm	2 pol.	2	± 1,5 mm	52,1 mm	52,6 mm	5,05
45 mm	1 ¾ pol.	1,75	± 1,4 mm	46,9 mm	47,4 mm	4,85
37,5 mm	1 ½ pol.	1,5	± 1,1 mm	39,1 mm	39,5 mm	4,59
31,5 mm	1 ¼ pol.	1,25	± 1,0 mm	32,9 mm	33,2 mm	4,23
26,5 mm	1,06 pol.	1,06	± 0,8 mm	27,7 mm	28,0 mm	3,90
25,0 mm	1 pol.	1	± 0,8 mm	26,1 mm	26,4 mm	3,80
22,4 mm	7/8 pol.	0,875	± 0,7 mm	23,4 mm	23,7 mm	3,50
19,0 mm	¾ pol.	0,750	± 0,6 mm	19,9 mm	20,1 mm	3,30
16,0 mm	5/8 pol.	0,625	± 0,5 mm	16,7 mm	17,0 mm	3,00
13,2 mm	0,530 pol.	0,530	± 0,41 mm	13,83 mm	14,05 mm	2,75
12,5 mm	½ pol.	0,500	± 0,39 mm	13,10 mm	13,31 mm	2,67
11,2 mm	7/16 pol.	0,438	± 0,35 mm	11,75 mm	11,94 mm	2,45
9,5 mm	3/8 pol.	0,375	± 0,30 mm	9,97 mm	10,16 mm	2,27
8,0 mm	5/16 pol.	0,312	± 0,25 mm	8,41 mm	8,58 mm	2,07
6,7 mm	0,265 pol.	0,265	± 0,21 mm	7,05 mm	7,20 mm	1,87
6,3 mm	¼ pol.	0,250	± 0,20 mm	6,64 mm	6,78 mm	1,82
5,6 mm	Nº 3 ½	0,223	± 0,18 mm	5,90 mm	6,04 mm	1,68
4,75 mm	Nº 4	0,187	± 0,15 mm	5,02 mm	5,14 mm	1,54
4,00 mm	Nº 5	0,157	± 0,13 mm	4,23 mm	4,35 mm	1,37
3,35 mm	Nº 6	0,132	± 0,11 mm	3,55 mm	3,66 mm	1,23
2,80 mm	Nº 7	0,111	± 0,095 mm	2,975 mm	3,070 mm	1,10
2,36 mm	Nº 8	0,0937	± 0,080 mm	2,515 mm	2,600 mm	1,00
2,00 mm	Nº 10	0,0787	± 0,070 mm	2,135 mm	2,215 mm	0,900
1,70 mm	Nº 12	0,0661	± 0,060 mm	1,820 mm	1,890 mm	0,810
1,40 mm	Nº 14	0,0555	± 0,050 mm	1,505 mm	1,565 mm	0,725
1,18 mm	Nº 16	0,0469	± 0,045 mm	1,270 mm	1,330 mm	0,650
1,00 mm	Nº 18	0,0394	± 0,040 mm	1,080 mm	1,135 mm	0,580
850 µm	Nº 20	0,0331	± 35 µm	925 µm	970 µm	0,510
710 µm	Nº 25	0,0278	± 30 µm	775 µm	815 µm	0,450
600 µm	Nº 30	0,0234	± 25 µm	660 µm	695 µm	0,390
500 µm	Nº 35	0,0197	± 20 µm	550 µm	585 µm	0,340
425 µm	Nº 40	0,0165	± 19 µm	471 µm	502 µm	0,290
355 µm	Nº 45	0,0139	± 16 µm	396 µm	425 µm	0,247
300 µm	Nº 50	0,0117	± 14 µm	337 µm	363 µm	0,215
250 µm	Nº 60	0,0098	± 12 µm	283 µm	306 µm	0,180
212 µm	Nº 70	0,0083	± 10 µm	242 µm	263 µm	0,152
180 µm	Nº 80	0,0070	± 9 µm	207 µm	227 µm	0,131
150 µm	Nº 100	0,0059	± 8 µm	174 µm	192 µm	0,110
125 µm	Nº 120	0,0049	± 7 µm	147 µm	163 µm	0,091
106 µm	Nº 140	0,0041	± 6 µm	126 µm	141 µm	0,076
90 µm	Nº 170	0,0035	± 5 µm	108 µm	122 µm	0,064
75 µm	Nº 200	0,0029	± 5 µm	91 µm	103 µm	0,053
63 µm	Nº 230	0,0025	± 4 µm	77 µm	89 µm	0,044
53 µm	Nº 270	0,0021	± 4 µm	66 µm	76 µm	0,037
45 µm	Nº 325	0,0017	± 3 µm	57 µm	66 µm	0,030
38 µm	Nº 400	0,0015	± 3 µm	48 µm	57 µm	0,025

**Tabela 5 - Distribuição do Tamanho das Partículas [10]**

PE-NEI-RA	GRANA																							
	6	8	10	12	14	16	20	22	24	30	36	40	46	54	60	70	80	90	100	120	150	180	220	240
4	0																							
5	15																							
6	45	0																						
7	25	15	0																					
8	12	45	15	0																				
10	3	30	45	15	0																			
12		7	30	45	15	0																		
14		3	7	30	45	15	0	0																
16			3	7	30	45	15		0															
18				3	7	30	45	20		0														
20					3	7	30	45	25		0													
25						3	7	25	45	25		0												
30							3	7	25	45	25		0											
35								3	2	25	45	25		0										
40									3	2	25	45	30		0									
45										3	2	25	40	30		0								
50											3	2	25	40	30		0							
60												3	2	25	40	15		0						
70													3	2	25	45	25		0					
80														3	2	25	40	15		0				
100															3	12	25	40	15		0			
120																3	7	30	45	15		0		
140																	3	12	20	30	15		0	
170																		3	10	30	20	15		0
200																			7	15	20	20	15	5
230																			3	7	35	20	20	
270																				3	7	25	20	8
325																					3	17	20	30
-325																						3	25	57

**Tabela 6 - Distribuição Granulométrica de Abrasivos Cerâmicos para Jateamento [38]**

Grana	Retenção de 0% nas Peneiras	Retenção Máxima		Retenção Mínima		Retenção Mínima Acumulada		Passagem < 5% nas peneiras
		Peneiras	%	Peneiras	%	Peneiras	%	
16	8	14	25	16	35	16 e 18	70	25
20	10	16	25	18	35	18 e 20	70	30
24	14	18	25	20	35	20 e 25	60	40
30	16	20	30	30	45	30 e 35	60	45
36	18	25	15	35	50	35 e 40	80	50
46	25	40	30	45	30	45 e 50	55	70
54	30	45	35	50	25	50 e 60	60	80
60	35	50	35	60	35	60 e 70	60	100
70	40	60	25	70	35	70 e 80	65	120
80	45	70	35	80	30	80 e 100	60	140
90	50	80	25	100	35	100 e 120	60	170
100	60	100	25	120	30	120 e 140	55	230
120	70	120	25	140	20	140 e 170	50	270
150	80	140	25	170 e 200	30	170,200,280	60	325
180	80	170	20	200 e 230	30	200,230,270	60	
220	100	200	15	230 e 270	30	230,270,325	50	
240	120	200	10	230 e 270	5	230,270,325	30	

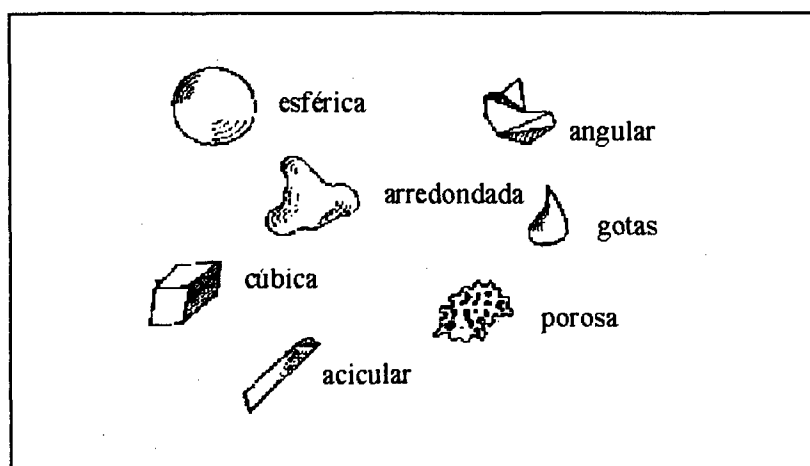


**Tabela 7 - Distribuição Granulométrica de Granalhas conforme SAE J444 [26]**

Grana	Retenção Mínima Acumulada					
	Peneira	%	Peneira	%	Peneira	%
G10	7	0	10	80	12	90
G12	8	0	12	80	14	90
G14	10	0	14	80	16	90
G16	12	0	16	75	18	85
G18	14	0	18	75	25	85
G25	16	0	25	70	40	80
G40	18	0	40	70	50	80
G50	25	0	50	65	80	75
G80	40	0	80	65	120	75
G120	50	0	120	60	200	70
G200	80	0	200	55	325	65
G325	120	0	325	20		

### 3.3.3 Forma das Partículas

A forma das partículas é um dos parâmetros mais importantes em uma operação de jateamento que tem a finalidade de conferir determinada limpeza e rugosidade. O processo de fabricação é fator que influi na forma do abrasivo. No caso do óxido de alumínio, que é fundido e depois triturado, as partículas apresentam-se variando da forma cúbica a angular, assim como a areia. As granalhas de aço ou ferro podem apresentar-se na forma esférica ou angular. A figura 7 mostra as formas possíveis de se classificar as partículas de abrasivos. No caso de jateamento onde deseja-se obter limpeza aliada a rugosidade são interessantes apenas alguns tipos de formas para partículas, aquelas que possuem arestas cortantes.

**Figura 7 - Formas de partículas [34].**

A análise da forma de partículas pode ser efetuada por microscopia direta como pela medida da área superficial [32, 34].

Quando se utiliza a microscopia vários modelos podem ser utilizados para indicar a forma. Além da visualização direta da forma, que é a mais apropriada, temos os modelos da "razão de forma" e a "razão Do/Da". A primeira é definida como a dimensão máxima dividida pela dimensão mínima da partícula. Para partículas esféricas a razão é 1, partículas alongadas variam de 3 a 5 e para as que apresentam formas de lamelas (flake) pode chegar a 200. A "razão Do/Da" resume-se na divisão do diâmetro de um círculo externo a partícula pelo diâmetro de uma esfera equivalente a área projetada da partícula [34].

A área superficial obtida por adsorção e permeabilidade de gás também é um índice de forma da partícula. Considerando a área e o volume de um corpo e tendo o peso em função da densidade, determina-se a área superficial específica como:

$$S = \frac{k}{\rho D} \quad (1)$$

onde:

S = área superficial específica

k = fator de forma

$\rho$  = densidade

D = diâmetro esférico equivalente

Através dessa fórmula pode-se obter o fator de forma e compará-lo a valores tabulados, como os relacionados na tabela 8.

A preocupação no jateamento proposto em nossos estudos é quanto a forma angular do abrasivo, pois é esta a forma que dará condições de obtermos a rugosidade necessária para boa aderência do revestimento. Portanto a verificação da forma da partícula poderá ser feita por microscopia.

**Tabela 8 - Fatores de forma das partículas [34]**

FORMA	RAZÃO AXIAL	FATOR "k"
Esférica	1:1:1	6,00
Elipsoide	1:2:4	7,57
Cilíndrica	1:1:1	6,86
Cúbica	1:1:1	7,44
Lamelar	1:10:10	24,00

### 3.3.4 Análise Química

Os abrasivos metálicos apresentam normalmente certo nível de impurezas. A alta superfície específica expõe esses materiais a fácil contaminação durante os processos de fabricação [29, 32]. No caso de abrasivos metálicos para jateamento, como granalhas de aço ou ferro, a oxidação é facilmente verificável. Por outro lado os abrasivos cerâmicos, como óxido de alumínio, apresentam contaminação de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  oriundos do processo de fabricação [28].

A análise química de pós pode ocorrer por: espectroscopia de absorção atômica, gravimetria, fluorescência de raios-X, espectroscopia de massa, e técnicas de microscopia óptica e eletrônica [34].

As técnicas de microscopia são utilizadas para microanálises, pois os abrasivos podem apresentar variação de composição no próprio processo de fabricação.

Para análises de rotina a fluorescência de raios-X é mais indicada e tem uma sensibilidade de aproximadamente 10 ppm, contudo pode chegar a 0,01 ppm utilizando técnicas avançadas [34].

O teste de absorção atômica e gravimetria também pode facilmente ser utilizado para a verificação do conteúdo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{SiO}_2$ , tanto no abrasivo não utilizado como após cada etapa de jateamento do ensaio.

A Norton propõe dois testes para o exame do teor de ferro nos abrasivos a base de óxido de alumínio. O primeiro é o "Teste Agar-Agar", que consiste na deposição de 50 g do abrasivo em um recipiente contendo um meio gelatinoso de "agar". A presença do ferro é indicada pela presença de manchas azuis, que variam em tamanho dependendo da granulometria utilizada. O outro teste consiste na deposição de 100 g de abrasivo sobre uma superfície plana. Posteriormente esta amostra é espalhada através de uma placa imantada sendo que o ferro existente é retido na mesma. A quantidade retida é pesada e comparada com o peso total para fornecer a porcentagem de ferro. Para os grãos serem aprovados a relação desses pesos deverá estar entre 0,0 % e 0,1 % [28].

Os métodos de absorção atômica e gravimetria serão adotados em nossas análises de laboratório, pois os mesmos fornecem resultados mais precisos que aqueles recomendados pela Norton. Por outro lado os testes da Norton podem ser usados para verificação, em campo, da qualidade do abrasivo quando do jateamento. Ou seja, a qualquer momento da operação retira-se uma amostra do abrasivo para análise e verifica-se a existência de contaminação, interrompendo ou não a sua utilização.

## **IV PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE**

### **4.1 Introdução**

As superfícies a serem revestidas necessitam estar limpas e com um grau bem definido de rugosidade, pois só assim haverá boa aderência do revestimento. Portanto a preparação da superfície tem dupla finalidade: a limpeza e a asperização.

O trabalho de limpeza consiste em retirar do substrato impurezas sólidas, líquidas e pastosas como carepa de laminação, óxidos resultantes de tratamentos térmicos, ferrugens entre outras[39].

Por outro lado é fundamental prover a superfície de determinada rugosidade, pois a aderência do revestimento no processo de aspensão por chama é obtida primeiramente por ancoramento mecânico. Esta rugosidade pode ser obtida por jateamento abrasivo, usinagem, entre outros métodos.

No presente capítulo serão apresentados os métodos de limpeza e asperização. Porém atenção maior será dado ao jateamento abrasivo, pois o mesmo concentra os dois métodos em um único processo, tornando-se do ponto de vista econômico o mais atraente para o caso de trabalhos em peças estruturais e/ou de grande porte.

### **4.2 Limpeza da Superfície**

É uma etapa do processo de grande importância, pois é através dela que se consegue eliminar produtos que impedem o contato pleno entre revestimento e substrato, essencial para a melhor aderência.

Os métodos e especificações de limpeza da superfície são dados por várias normas conforme apresentado na tabela 9. Porém a mais utilizada é a norma sueca SIS 055900/1967 [40], sendo também a precursora das normas ABNT e Petrobrás utilizadas no Brasil. Esta mesma norma prevê a inspeção das superfícies através de padrões que podem ser comparados visualmente.

**Tabela 9 - Relação das Normas de Preparação da Superfície e Graus de Limpeza[41]**

Métodos de Preparo da Superfície	Graus de Limpeza da Superfície				
	Norma SIS 0559900	Norma SSPC VIS 1	Norma Petrobrás	Norma NACE RM 01-70	Norma BS 4232
<b>C/Ferramenta Mecânica</b>					
Limpeza Mecânica	St2	SP2	N-6		
Limp.Mec.Rigorosa	St3	SP3	N-7		
<b>C/ Jato Abrasivo</b>			N-9a		
Ligeiro ( brush-off )	Sa1	SP7	Sa1	Nace-4	
Comercial	Sa2	SP6	Sa2	Nace-3	3ª Classe
Metal Quase Branco	Sa2 ½	SP10	Sa2 ½	Nace-2	2ª Classe
Metal Branco	Sa3	SP5	Sa3	Nace-1	1ª Classe
<b>Outros Métodos</b>					
Limpeza com Solvente		SP1	N-5		
Limpeza a Fogo		SP4			
Decapagem Química		SP8	N-10		
Enferrujamento e Jato Abrasivo		SP9	N-11		

Os métodos apresentados na tabela 9 são aplicados em vários tipos de superfície, que segundo a norma SIS 055900/67 podem apresentar 4 graus de intemperismo, conforme descritos abaixo e mostrados na tabela 10:

- *Grau A* - a superfície apresenta-se completamente coberta pela carepa de laminação, não apresentando sinais de corrosão.

- *Grau B* - a carepa começa a se desagregar e a superfície apresenta-se com princípio de corrosão.

- *Grau C* - superfície onde a carepa de laminação tenha sido removida pela corrosão atmosférica ou possa ser retirada por meio de raspagem, e que apresenta pequenos alvéolos.

- *Grau D* - superfície onde a carepa de laminação tenha sido removida pela corrosão atmosférica e que apresenta corrosão alvéolar de severa intensidade.

Para a limpeza das superfícies definidas acima existem os processos mencionados na tabela 9 que são classificados em 3 categorias principais descritos nos itens subsequentes [39].

## 4.2.1 Processos Químicos

### a) Desengraxamento

O desengraxamento alcalino utiliza soluções quentes de sais e bases com composições variadas em função do substrato e nível de sujidade. A limpeza é obtida pela imersão das peças a serem limpas em um recipiente contendo as soluções alcalinas formadas por hidróxidos, carbonatos, fosfatos, silicatos e boratos de sódio, que se encontram aquecidas a temperaturas de ebulição, por um período de 5 a 10 minutos [39].

A combinação do processo alcalino com corrente elétrica consiste no desengraxamento eletrolítico. O efeito de limpeza é conseguido pela grande liberação de gases nos eletrodos, que proporciona o desprendimento da sujeira. Os eletrodos são a peça e uma barra de ferro, e a denominação de desengraxamento eletrolítico catódico ou anódico varia em função da peça ser o catodo ou ânodo. Nos processos catódicos pode ocorrer adsorção de hidrogênio e no anódico oxidação da peça. Por outro lado, nesta última combinação, o tempo gasto para a limpeza é menor [39, 42].

A utilização de solventes orgânicos, como tricloroetileno, percloroetileno, puros ou emulsionados, à temperatura ambiente ou aquecidos, é denominada desengraxamento por solventes. Entre as vantagens oferecidas pelos solventes estão a não produção de manchas no metal e o fato de serem recuperados por destilação. Contra seu uso pode-se citar sua toxidez ou inflamabilidade [39, 42].

### b) Decapagem Ácida

Este é um processo químico utilizado para remover camadas de óxidos da superfície dos metais. É baseado em reações químicas de ácidos fortes, como o sulfúrico e clorídrico (muriático) entre outros, com os óxidos e/ou substrato, com metodologia semelhante ao desengraxamento.

As principais objeções encontradas na decapagem ácida podem ser resumidas em [10]:

- => acentuada tendência a corrosão após a decapagem;
- => não atuar sobre certas ligas de níquel e de cromo;
- => requerem equipamentos caros a prova de ácidos;
- => desgastes das peças, muitas vezes não tolerado;
- => ocasionam a fragilidade pelo hidrogênio.

## 4.2.2 Processos Térmicos

### a) Queima (Cozimento em Forno)

Consiste na remoção de óleos e graxas pela queima em fornos a temperaturas que permitam a evaporação desses contaminantes. A AWS [10] recomenda uma temperatura de 315 °C, no mínimo, durante 4 horas para a evaporação completa dos resíduos. Este tratamento é efetuado em materiais porosos, sujeitos a infiltração de óleos. Um exemplo deste tipo de material são as peças fundidas em moldes de areia.

### b) Chama Direta

Baseia-se no aquecimento da carepa sem contudo aquecer o substrato. Isto ocasiona, pela diferença dos coeficientes de dilatação, a quebra da casca de óxidos em pequenos pedaços. A própria força dos gases de combustão propicia a remoção destes fragmentos. A velocidade, de movimento sobre a peça, da chama oxi-acetilênica situa-se em torno de 3 a 6 m/min [39].

### c) Atmosfera Redutora

Utiliza um forno com atmosfera redutora para eliminar os óxidos presentes na superfície. É um processo pouco utilizado em função do alto custo e dificuldade de controle. Por exemplo uma mistura de 70 % de CO e 30 % de CO<sub>2</sub> a 800 °C reduzem os óxidos de ferro, porém a mesma mistura de gases a 1100 °C tem ação oxidante [39].

## 4.2.3 Processos Mecânicos

Os processos mecânicos utilizam-se do efeito de abrasão de certos materiais e ferramentas para a remoção de óxidos e outras impurezas existentes na superfície dos metais. A utilização de ferramentas como lixas, escovas, marteletes manuais ou mecanizados para a remoção de impurezas não é recomendada, pois o rendimento e a qualidade obtidos são inferiores aos de outros processos.

A usinagem é um método utilizado para retirar a camada óxida, sendo o processo efetuado em conjunto com a própria fabricação da peça ou durante serviços de reparação.

Outro método é o tamboreamento, que consiste na limpeza pela abrasamento das peças entre si. As mesmas são colocadas em um tambor rotativo com ou sem agentes abrasivos secos ou úmidos. Atuando através do esmerilhamento, esmagamento e rebarbação este processo é

muito eficaz na retirada de impurezas em peças de tamanho pequeno. Neste caso há um grande rendimento.

Porém entre todos os processos o mais utilizado na limpeza de superfícies, a serem revestidas com alumínio por aspersão térmica, destaca-se o *jateamento abrasivo seco e/ou úmido*. Isto ocorre não só quando a forma e tamanho das peças não permitirem a utilização de outros métodos, mas porque através do jateamento abrasivo consegue-se níveis de rugosidade Ry para a maioria das aplicações. Nas operações onde se necessita de maior rugosidade, não atingidos por jateamento abrasivo, utilizam-se os processos de usinagem.

#### 4.2.4 Limpeza obtida por Jateamento Abrasivo

O uso de partículas de materiais duros como areia, gralha de aço, gralha de ferro, óxido de alumínio, entre outros, em um equipamento que as impelem de encontro ao substrato é um dos métodos mais eficientes de limpeza de superfícies. Em função do tipo de abrasivo e condições de jateamento consegue-se, além da limpeza, alcançar rugosidades requeridas para a deposição do revestimento.

A seguir serão descritas as definições e conceitos estabelecidos para o acabamento final de limpeza por jateamento abrasivo, com os padrões visuais recomendado pela norma SIS 055900/1967 inseridos na tabela 10.

=> *jateamento ligeiro - grau Sa1* - remoção da carepa de laminação solta, ferrugem e material estranho. O aspecto da superfície guarda a cor dos produtos da corrosão em quase toda sua extensão. Esta aparência deve corresponder as gravuras com designação Sa1. Esta limpeza não se aplica a superfícies que apresentam grau A de intemperismo original.

=> *jateamento comercial - grau Sa2* - remoção de quase toda a carepa de laminação, ferrugem e material estranho. A superfície apresenta coloração acinzentada não uniforme, correspondendo as gravuras com designação Sa2. Este jateamento também não se aplica a superfícies que apresentem grau A de intemperismo original.

=> *jateamento ao metal quase branco - grau Sa2 1/2* - as carepas de laminação, a ferrugem e material estranho devem ser removidas de maneira tão perfeita que seus vestígios apareçam somente como manchas tênues ou estrias. O metal apresenta coloração cinza claro.

=> *jateamento ao metal branco - grau Sa3* - as carepas de laminação, a ferrugem e material estranho são totalmente removidos. A superfície deve apresentar coloração cinza



uniforme, correspondendo em aparência às gravuras com designação Sa3. É o padrão de limpeza completa e rigorosa.






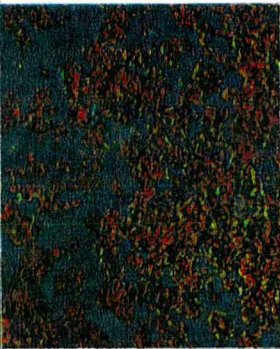


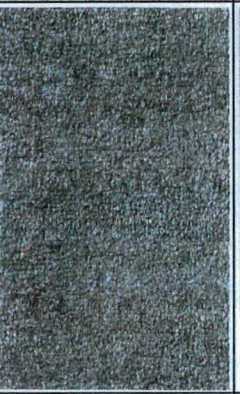





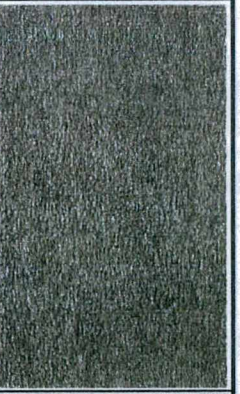





Em todos os padrões de limpeza anteriores deve-se na seqüência limpar a superfície com aspirador, ar comprimido ou escova.

O jateamento abrasivo, descrito anteriormente, não remove impurezas viscosas ou resilientes, tais como graxas, óleos, alcatrões. Nestes casos acontece contaminação tanto do abrasivo como do substrato, diminuindo a vida útil do primeiro e prejudicando a aderência do revestimento depositado no segundo. Para estas situações deve-se prever limpeza prévia por desengraxamento alcalino, quando o tamanho da peça permitir sua imersão em recipientes próprios. Para estruturas ou serviços de recuperação onde não existe esta possibilidade, e também por questões de segurança quanto ao emprego de soluções, utiliza-se o jateamento úmido.

O jateamento úmido consiste na utilização de abrasivos da malha 200 a 1200 [10] que são misturados a água para formar uma suspensão. Esta suspensão, que deve ser constantemente agitada para evitar decantação, é impulsionada por ar comprimido de encontro ao substrato. Os abrasivos utilizados são orgânicos e óxidos. Na água podem ser adicionados inibidores de ferrugem, aditivo fluidificante e compostos antientupimento e antisedimentação. A proporção de abrasivo deve ser na faixa de 20 % a 30 % do volume de água para a maioria das aplicações. Menores proporções não produzem limpeza desejada e para maiores há um empastamento que dificulta a circulação [26].

Deve-se ressaltar que para este tipo de jateamento também ocorre a contaminação do abrasivo e a rugosidade  $R_y$  alcançada nem sempre atende as especificações para certos revestimentos depositados. Porém em função do custo da areia ser menor em comparação com abrasivos manufaturados é preferível admitir contaminá-la e deixar a superfície limpa de impurezas viscosas e resilientes.

Tabela 10 - Graus de Corrosão e Limpeza por jateamento abrasivo [40]

Graus de Corrosão	Graus de Limpeza			
	Sa1	Sa2	Sa2 1/2	Sa3
<b>A</b> 				
<b>B</b> 				
<b>C</b> 				
<b>D</b> 				

## 4.3 Rugosidade

### 4.3.1 Definição

As superfícies reais diferem das geométricas através de suas diferenças de forma que são classificadas como [43]:

- *1ª ordem* - são as diferenças conhecidas como, por exemplo, ovalização, cilindricidade.
- *2ª ordem* - são aquelas que se repetem regular ou irregularmente, e cujas distâncias são um múltiplo considerável de sua profundidade. Ocorrem, por exemplo, devido a fixação excêntrica da peça, deflexões, tratamento térmico.
- *3ª ordem* - são diferenças que se repetem regular ou irregularmente, cujas distâncias são um múltiplo reduzido de sua profundidade, como as ranhuras ou sulcos provenientes dos processos de usinagem.
- *4ª ordem* - são as estrias ou escamas que ocorrem durante a formação de cavaco, deformação do material com jateamento abrasivo, formação de crateras em processos galvânicos.
- *5ª ordem* - estas diferenças não podem ser representadas graficamente. Correspondem a processos de cristalização, modificações da superfície por ação química (decapagem) e por processos de corrosão.
- *6ª ordem* - também não podem ser representadas graficamente. Correspondem a processos físicos e químicos da estrutura da matéria, tensões e deslizamentos na estrutura reticular do material.

A partir do esclarecimento das diferenças de forma podemos definir rugosidade superficial como: a soma das diferenças de forma de 3ª a 5ª ordem. A figura 8 esquematiza essas grandezas no conjunto.

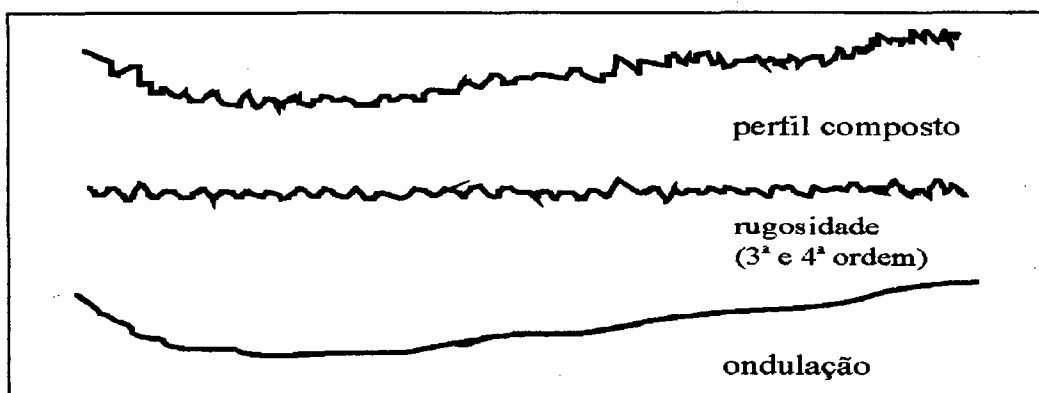


Figura 8 - Grandezas principais de um gráfico de rugosidade superficial [43]

### 4.3.2 Sistemas e Parâmetros de Medição de Rugosidade

Todos os parâmetros de rugosidade se enquadram em 2 sistemas: sistema da envolvente e o sistema da linha média. No Brasil é adotado o sistema da linha média através da norma P-NB-13 da ABNT.

Agrupadas no sistema da linha média encontram-se 3 classes, que se distinguem por tomar como base: medidas verticais; medidas horizontais; medidas proporcionais.

Na sequência serão descritos 3 parâmetros que se baseiam na medida da profundidade da rugosidade: desvio médio aritmético ( $R_a$ ), altura das irregularidades dos 10 pontos ( $R_z$ ) e altura máxima das irregularidades ( $R_y$ ). Também será definido o espaçamento médio das irregularidades ( $S_m$ ) que é um parâmetro incluído na classe de medidas horizontais.

#### a) Desvio Médio Aritmético - $R_a$ (CLA, AA)

É definido como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo em relação a linha média em um comprimento de amostragem.  $R_a$  é equivalente a altura de um retângulo de comprimento igual ao comprimento de medição ( $L$ ) e de área igual a soma das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e a linha média (figura 9), sendo sua expressão matemática representada pela formula (2) dada na sequência. Este parâmetro é o mais conhecido, aceito e aplicado mundialmente, sendo utilizado em praticamente todos os processos de fabricação e todos os equipamentos convencionais de medição de rugosidade o tem como opção. Para a maioria das superfícies a distribuição das amplitudes esta de acordo com a curva de gauss e é observado que  $R_a$  caracteriza relativamente bem a distribuição média de amplitudes. Sua desvantagem reside no fato de apresentar uma média da rugosidade, podendo seus valores serem alterados pela presença de grandes picos ou vales. Por isso é aconselhável que se faça várias medições para que a análise forneça um valor o mais confiável possível [43, 44].

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |Y| dx \quad (2)$$

#### b) Altura das Irregularidades dos 10 pontos - $R_z$ (iso)

Definida como a diferença entre o valor médio das ordenadas dos cinco pontos mais salientes e o valor médio das ordenadas dos cinco pontos mais reentrantes medidos a partir de uma linha paralela a linha média, não interceptando o perfil, e no comprimento de amostragem

(figura 9). Pela definição deste parâmetro verifica-se que é mais sensível a picos ou vales locais do que  $R_a$ , sendo útil na comparação entre duas superfícies oriundas de uma mesmo processo de preparação da superfície.  $R_z$  e  $R_y$ , são muito usados nos países europeus pela facilidade de comparação dos resultados obtidos entre equipamentos ópticos e mecânicos [43, 44]. A expressão matemática é representada pela fórmula (3) abaixo.

$$R_z = \left( \frac{R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9}{5} \right) - \left( \frac{R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10}}{5} \right) \quad (3)$$

### c) Altura Máxima das Irregularidades - $R_y$ ( $R_t$ )

Distância entre duas linhas paralelas a linha média e que tangenciam a saliência mais pronunciada e a reentrância mais profunda, medida no comprimento de amostragem (figura 9). Com este parâmetro é possível determinar as condições de pré-acabamento necessárias para operações de acabamento subsequentes tais como brunimento ou lapidação, pois indica que quantidade de material pode ser removida antes que a dimensão da peça atinja um limite em particular. Além disso é útil para determinar quando um processamento contínuo (jateamento abrasivo) de uma peça produz pouco ou nenhum efeito, ou seja, qual o desgaste que a superfície da peça sofre com o uso contínuo do processo [43, 44].

### d) Espaçamento Médio das Irregularidades - ( $S_m$ )

É definido pela norma BS 6741/1987 part 1 [45] (ISO 4287/1) como o valor médio do espaçamento das irregularidades dentro de um comprimento de amostragem, isto é a repetibilidade dos perfis de rugosidade (figura 9). Este parâmetro fornece informações sobre os períodos com os quais os desvios geométricos na evolução do perfil podem aparecer. Por ser um valor médio pode estar sujeito a variações locais, mas podem ser utilizados na diferenciação de perfis com parâmetros verticais semelhantes [44]. A expressão matemática que o define é apresentada pela fórmula (4) abaixo.

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi} \quad (4)$$

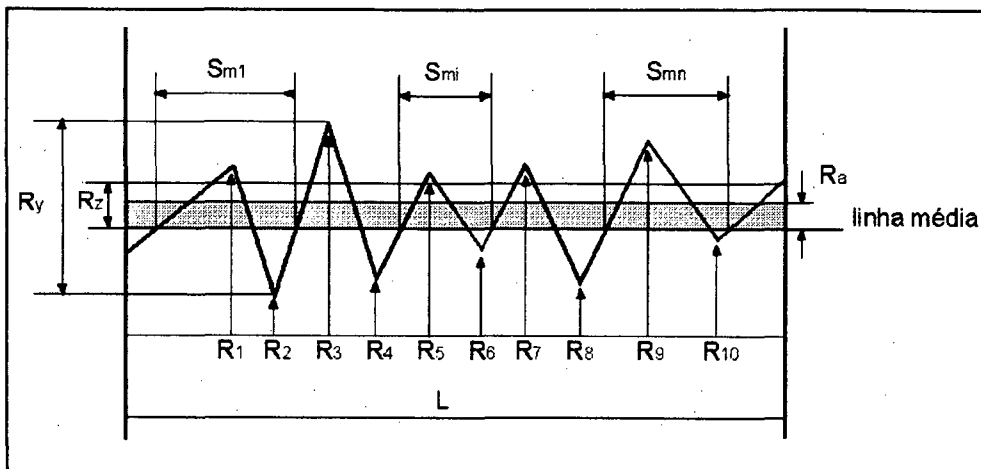


Figura 9 - Parâmetros de rugosidade [43 a 45]

Os parâmetros  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_y$  fornecem uma avaliação da altura das irregularidades e são indicados para a comparação de superfícies preparadas por um mesmo processo, que em nosso caso é o jateamento abrasivo. Porém os mesmos nada dizem a respeito do espaçamento horizontal da rugosidade, o qual é obtido pelos valores de  $S_m$ . Da junção das medições verticais com horizontais tem-se a noção do perfil quanto a sua altura e repetibilidade em um comprimento de amostragem.

Existem diversos aparelhos para medição de rugosidade, desde os portáteis para uso também no campo, até os mais sofisticados para uso exclusivo em laboratório. Os primeiros são adequados a leitura individual dos parâmetros anteriormente citados, ao contrário, os mais complexos podem reproduzir o perfil composto de uma superfície pela superposição dos sistemas e parâmetros medidos, o que é facilitado pelo acoplamento de um microcomputador.

#### 4.3.3 Rugosidade obtida por Jateamento Abrasivo

Os níveis de rugosidade medidos por um dos parâmetros anteriormente citados dependem primeiramente do processo de preparo de superfície utilizado. No caso do jateamento abrasivo vários são os parâmetros que devem ser considerados, os quais são agrupados nas características do abrasivo e procedimento de jateamento.

##### a) Importância das Características do Abrasivo

A forma, densidade e granulometria do abrasivo são características que devem ser levadas em consideração para obtenção de determinada rugosidade [10].

Abrasivos que possuem forma angular podem aderir em substratos macios, como alumínio, porém são os mais recomendados pelo seu alto poder de limpeza e asperização. Após o jateamento o substrato deve ser limpo com jato de ar para remover as partículas de abrasivo aderidas [10]. Abrasivos de formato esféricos não são recomendados para se obter rugosidade, pois tendem a alisar a superfície por "peening" prejudicando a aderência do revestimento [46].

A densidade do abrasivo deve ser considerada no jateamento de peças finas ( $< 4$  mm), e eixos longos de pequeno diâmetro, pois abrasivos como granalha de aço, que são mais densos, introduzem maiores tensões em comparação com óxido de alumínio. Ocasionalmente desta maneira deformação nas peças jateadas. Devido a manutenção do gume cortante das partículas e assim propiciar maior rendimento, a norma BS 2569 recomenda a utilização de abrasivos cerâmicos como óxido de alumínio para jateamento de substratos com dureza maior que 360 HV [10, 47].

Partículas de menor tamanho proporcionam maior rendimento, ou seja mais área jateada por hora, porém com partículas maiores se obtém maior rugosidade. De maneira geral utiliza-se grãos variando da malha 16 a 60 (1,18 mm a 0,250 mm) para jateamento de substratos de metal. Dentro desta faixa existem as granas 16, 20, 30, SAE 18 e SAE 25, que possuem distribuições granulométricas específicas como mostrado nas tabelas 6 e 7, as quais são usadas comercialmente para definir o "tamanho" do abrasivo. A literatura recomenda o uso de abrasivos a base de óxido de alumínio de grana 18 a 25 para obtenção de  $13 \mu\text{m}$  de rugosidade  $R_a$  na deposição de camadas de alumínio com espessura superior a  $200 \mu\text{m}$  [10]. Outras fontes citam a faixa da malha 16 a 30 para obtenção de 50 a  $70 \mu\text{m}$  de rugosidade  $R_y$  [48] e malha 10 a 30 para  $50/100 \mu\text{m}$  [49] quando preparada a superfície para deposição de camadas de alumínio entre 250 a  $375 \mu\text{m}$ . Verifica-se que as referências recomendam, de maneira geral, faixas de granulometria e rugosidade, ou seja não fornecem uma correlação direta entre ambas.

### **b) Importância dos Procedimentos de Jateamento**

Os procedimentos de jateamento influem enormemente na rugosidade alcançada. O tipo de jato, as pressões de ar utilizadas, as distâncias e ângulo de incidência com o substrato são variáveis que devem ser consideradas.

Existem 3 métodos básicos para impelir o abrasivo de encontro a superfície, ou seja para se efetuar o jateamento: sistema de jateamento por pressão, por sucção e por força centrífuga (jateamento sem ar) [26, 47]. Quando se utiliza jato por pressão tendo como abrasivo óxido de alumínio a pressão mínima recomendada é 345 kPa (50 psi) e a máxima é 414 kPa (60 psi). Para

jateamento por sucção com o mesmo abrasivo a máxima pressão deve ser 517 kPa (75 psi). De um modo geral as pressões para jateamento situam-se na faixa de 30 a 100 psi, sendo esta pressão maior a recomendada pelo fabricante do abrasivo Alundum. Pressões baixas são usadas para jateamento com abrasivos finos, macios, menos densos e em substratos de menor resistência. Por outro lado pressões maiores são utilizadas quando o abrasivo possuir maior densidade [10, 50]. A tabela 11 fornece as condições de jateamento com óxido de alumínio e os valores de Ra alcançados. Nota-se que com menor tamanho de grão Ra é menor, e também a dureza do substrato e tipo de jato influenciaram na rugosidade Ra.

**Tabela 11 - Condições de Jateamento e Rugosidade Obtida [10]**

Grana (mesh)	Abrasivo	Pressão		Diâmetro do Bocal		Equipamento	Substrato	Rugosidade Ra
		psi	kPa	pol	mm			$\mu\text{m}$
24	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	414	5/16	7,9	Pressão	Aço	13
60	SiC ou Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	414	5/16	7,9	Sucção	Aço Inox	6
80	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	60	414	5/16	7,9	Pressão	Plástico	6

A influência da distância bocal-substrato pode ser visualizada na figura 10 que mostra o jateamento da liga inconel 718 com óxido de alumínio de grana 60. Nota-se que a melhor distância situa-se aproximadamente entre 100 a 250mm com as pressões utilizadas. Isto significa que a perda de energia cinética ou de impulso é menor nesta faixa de distância [51]. Dependendo da granulometria e tipo do abrasivo utilizado, da abertura do bocal e capacidade da máquina de jato, as distâncias entre bocal-substrato variam de 100 mm a 300 mm [10].

O ângulo de incidência interfere tanto na rugosidade como no desgaste do abrasivo, que é mensurável pela porcentagem de finos (resíduo) encontrado na amostra. A figura 11 compara o jateamento com ângulos de 45° e 90° com a superfície utilizando óxido de alumínio de grana 60. O ângulo de 90° produz Ra um pouco maior, porém o desgaste do abrasivo também é maior. A literatura recomenda um ângulo na faixa de 45° a 90° com a superfície jateada [10, 52, 49, 53]. A figura 12 correlaciona Ra com o desgaste do abrasivo em função da pressão, ângulo de incidência e tempo de jateamento. Nota-se que valores altos de Ra e menor desgaste se obtém com alta pressão e tempo mais curto.



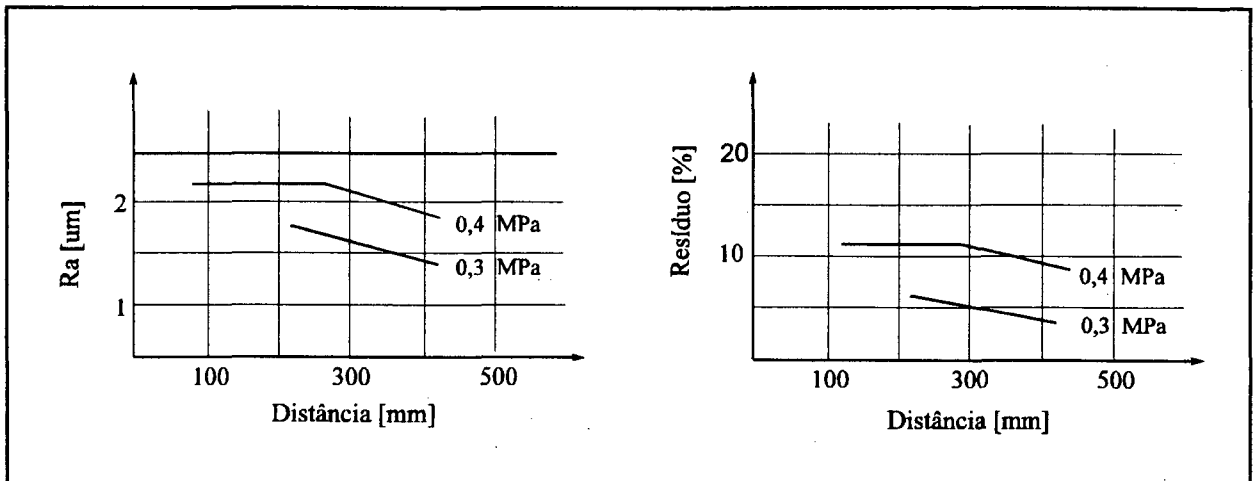


Figura 10 - Ra e resíduo versus distância de jateamento [51].

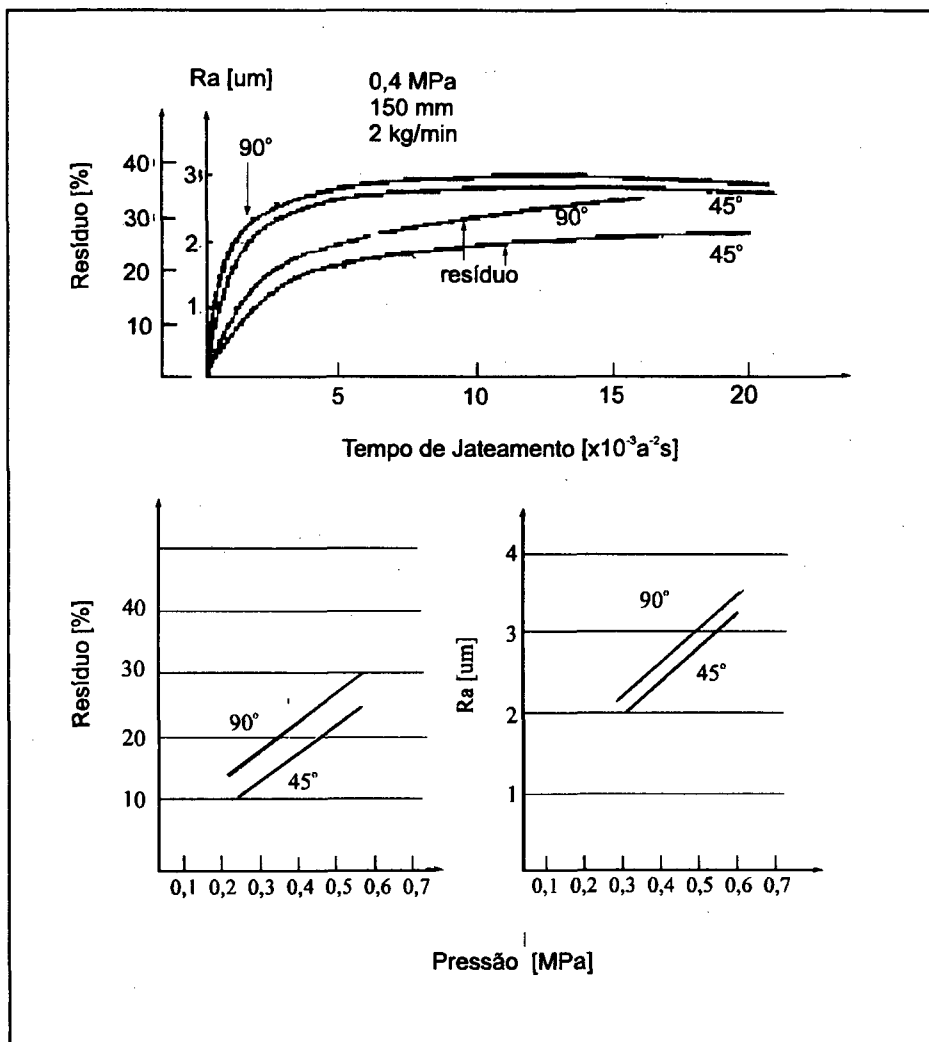


Figura 11 - A influência do ângulo de jateamento sobre Ra e resíduo para diferentes pressões e tempo de jateamento [51]

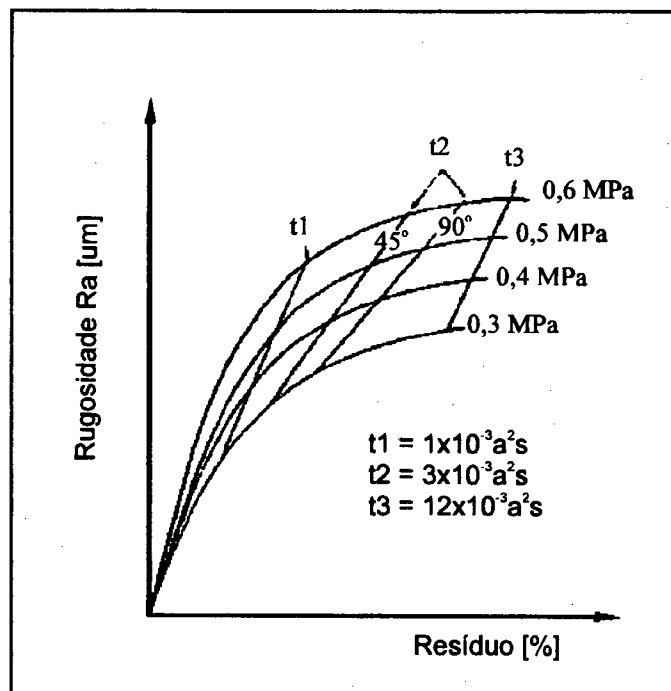


Figura 12 - Relação entre Ra e resíduo em função da pressão, ângulo e tempo de jateamento [51]

#### 4.4 Preaquecimento.

Sob o ponto de vista da limpeza, o preaquecimento do substrato tem como objetivo proporcionar a queima e volatilização de graxas, óleos e umidade retidos junto à superfície do metal a ser revestido. Este preaquecimento pode ser feito por uma chama redutora da própria pistola de aspersão térmica, por um equipamento independente, ou ainda por indução quando o tamanho da peça seja apropriado. As temperaturas recomendadas, especificamente para melhorar a limpeza do substrato, estão na faixa de 90 °C até 150 °C [54, 55].

As temperaturas de preaquecimento dependem ainda, quanto às tensões térmicas residuais no revestimento, da natureza dos materiais da camada e do substrato e de suas propriedades físicas (condutividade térmica, dilatação). Através do preaquecimento é favorecida a redução das tensões internas, que por sua vez influencia na aderência e coesão do revestimento. Quando as partículas aquecidas chocam-se com o substrato o seu resfriamento é muito rápido, acompanhado da contração do material depositado. O substrato por sua vez dilata-se (por estar frio) ao absorver a energia térmica cedida pelas partículas, além daquela transferida pela chama ou plasma da pistola de aspersão. Em função disso ocorrem tensões contrárias na interface substrato-revestimento, que podem ser reduzidas e melhor distribuídas quando o substrato é preaquecido.

As faixas de temperaturas que fornecem as referências técnicas são diversas, por um lado temos a faixa de 260 °C a 370 °C recomendada para o processo de aspersão térmica do alumínio a chama convencional [54]; por outro lado em publicação recente a AWS [49] fornece através do guia para aluminização a utilização de 120 °C para eliminar as tensões residuais e reduzir o diferencial de temperatura entre o revestimento depositado e o substrato. Segundo H. Kreye a utilização de 250 °C é uma temperatura de preaquecimento recomendável para substratos a serem aluminizados, para reduzir tensões e o gradiente térmico [56].

## V ADERÊNCIA

### 5.1 Introdução

A resistência mecânica de um revestimento efetuado por aspersão térmica compreende a aderência entre o mesmo e o substrato, bem como a coesão entre as partículas depositadas. A aderência é um requisito essencial para o bom desempenho do revestimento, pois de nada adiante o mesmo ter uma espessura adequada e livre de poros para proteção contra corrosão se não possuir aderência suficiente.

A análise da aderência do revestimento normalmente considera três mecanismos fundamentais, de acordo com a natureza das forças atuantes: mecânico, químico-metalúrgico e físico. Quando do impacto das partículas aquecidas e aceleradas contra o substrato, essas se achatam numa forma lenticular, resfriam-se rapidamente e ancoram-se mecanicamente nas irregularidades da superfície. Por outro lado, em função da natureza do material e do calor transferido pela partícula para o substrato pode ocorrer um maior ou menor grau de microsoldagem, podendo haver fusão localizada, difusão atômica com formação de soluções sólidas e inclusive compostos intermetálicos, caracterizando o que se denomina mecanismo químico-metalúrgico. Os mecanismos físicos acontecem a nível interatômico e/ou intermolecular, devido aos dipolos induzidos e polaridade das moléculas, sendo entretanto classificados como forças fracas e denominadas de “forças de Van der Walls” [8, 13 a 20].

Como os mecanismos acima pressupõem um contato íntimo entre camada e substrato é de se esperar que as superfícies a serem revestidas estejam metálicamente limpas, isto é, livres de qualquer produto estranho que dificulte os mecanismos de ligação. Para a aderência mecânica exerce também papel essencial a presença de um nível adequado de rugosidade. Por sua vez, a aderência metalúrgica é bastante dependente tanto do processo de aspersão, que determina a temperatura, energia cinética e grau de oxidação das partículas, como da natureza do material aspergido, se metálico ou cerâmico. Em alguns materiais metálicos, em particular naqueles denominados autoligantes (como Mo, Nb, Ta, ligas de Ni-Al) é forte a aderência metalúrgica, tanto é que os mesmos são empregados como camada intermediária para aumentar a aderência global do revestimento [8, 13 a 20].

No caso específico do alumínio a aderência é considerada relativamente inferior, sobretudo no processo de aspersão por chama. Isto é explicado pela forte tendência a oxidação

das gotículas de alumínio durante seu tempo de vôo desde a pistola até o substrato. Além disso, o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  devido seu alto ponto de fusão envolve com um casca sólida as gotículas do metal líquido, rompe-se no impacto com o substrato, mas como fase sólida não reage mais com esse, dificultando o contato entre o metal alumínio e o substrato. Melhores propriedades do revestimento de alumínio (menor porosidade e, em particular, mais aderência) são atingidas com processos que favorecem o mecanismo da aderência metalúrgica, seja pela maior temperatura (arco elétrico) ou pela maior energia cinética imposta às partículas (HVOF) [8, 13 a 20]

Os valores de aderência de revestimentos com alumínio reportados na literatura técnica (tabela 1) variam dentro de faixas bastante amplas, por isso os comentários nos itens a seguir visam contribuir para o esclarecimento dessa atual situação.

## **5.2 Fatores Influentes na Aderência**

### **5.2.1 Efeito do Jateamento Abrasivo**

A limpeza da superfície é o primeiro requisito considerado quando da deposição de revestimento. Os padrões de limpeza ( Sa2, Sa2,5 e Sa3 ) são alcançados com a maioria dos abrasivos, porém a aderência varia com o tipo utilizado. A figura 13 mostra a variação da aderência em função do abrasivo para se conseguir o mesmo padrão de limpeza. Neste caso os melhores resultados foram obtidos com granalha de ferro em comparação a escória de cobre e areia. A variação da aderência, para igual padrão de limpeza, é devido a impregnação da superfície e a ausência de rugosidade apropriada. Ou seja, a superfície limpa conforme padrão Sa3 contém contaminantes ( mica ) e nível inferior de rugosidade  $R_y$ , que prejudicam a aderência, quando areia é usada para jateamento[24, 26].

Superior aderência é atingida com abrasivos que, sem impregnar a superfície, proporcionam rugosidade adequada. Aqueles que melhor se enquadram são os abrasivos a base de óxido de alumínio. Isto fica evidente quando se observa a figura 14, que compara a aderência de revestimentos de várias espessuras jateados ao padrão Sa3, com óxido de alumínio, escória de cobre e granalha de ferro. Os melhores resultados correspondem ao óxido de alumínio, superiores aos obtidos com granalha de ferro (figura 13).

A forma das partículas do abrasivo também tem influência primordial na aderência do revestimento, isto é, o impacto de partículas com formas angulares acarreta no arrancamento de material da superfície jateada, originando mais irregularidades e pontos de ancoramento

favoráveis à aderência do revestimento. Ao contrário, partículas esféricas tendem a alisar a superfície. Os resultados de Havrda [57], reunidos na tabela 12 e figura 15, permitem comparar a variação da aderência para o caso de aplicação de Zn e Al por aspersão com chama e por arco-elétrico, quando se utiliza abrasivos angulares e esféricos.

Ainda quanto aos efeitos do método de jateamento e das características do abrasivo sobre resultados de aderência, a tabela 13 traz 11 amostras preparadas por Bardall [58] sob diferentes condições. A tabela 14 mostra a resistência a tração dessas amostras, agrupadas em faixas de valores, em função da rugosidade e do processo utilizado. Os piores resultados obtidos no grupo I são provenientes da condição do abrasivo, que foi reutilizado, nos casos A e B e da baixa dureza no caso C. Estes parâmetros influenciaram negativamente a rugosidade e consequentemente a aderência.

Nos parágrafos anteriores foram relatados resultados de rugosidade tomando como base parâmetros de medições verticais ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ), porém outro parâmetro importante é o espaçamento médio das irregularidades ( $S_m$ ) que se enquadra no sistema de medições horizontais. Estudos realizados por Feist e Schulz [59] consideraram  $S_m$  como um fator influente na aderência de camadas metalizadas. Nesse trabalho os autores utilizaram 7 tipos de abrasivos e obtiveram valores muito próximos para  $R_a$  e  $R_y$ , por outro lado o espaçamento médio das irregularidades apresentou variação significativa para alguns abrasivos. Nas avaliações da aderência dos revestimentos depositados constataram que os corpos de prova com rugosidade  $S_m$  de 380  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$  e 700  $\mu\text{m}$  apresentaram valores de 4,0 MPa, enquanto para  $S_m$  entre 200 e 250  $\mu\text{m}$  estes valores foram de aproximadamente 9 MPa. Concluíram que a rugosidade vertical ( $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ) é uma condição necessária, mas não suficiente, para a boa aderência do revestimento. O aumento da aderência estaria relacionado com uma menor distância entre as irregularidades, portanto exigindo  $S_m$  menor que 300  $\mu\text{m}$ .

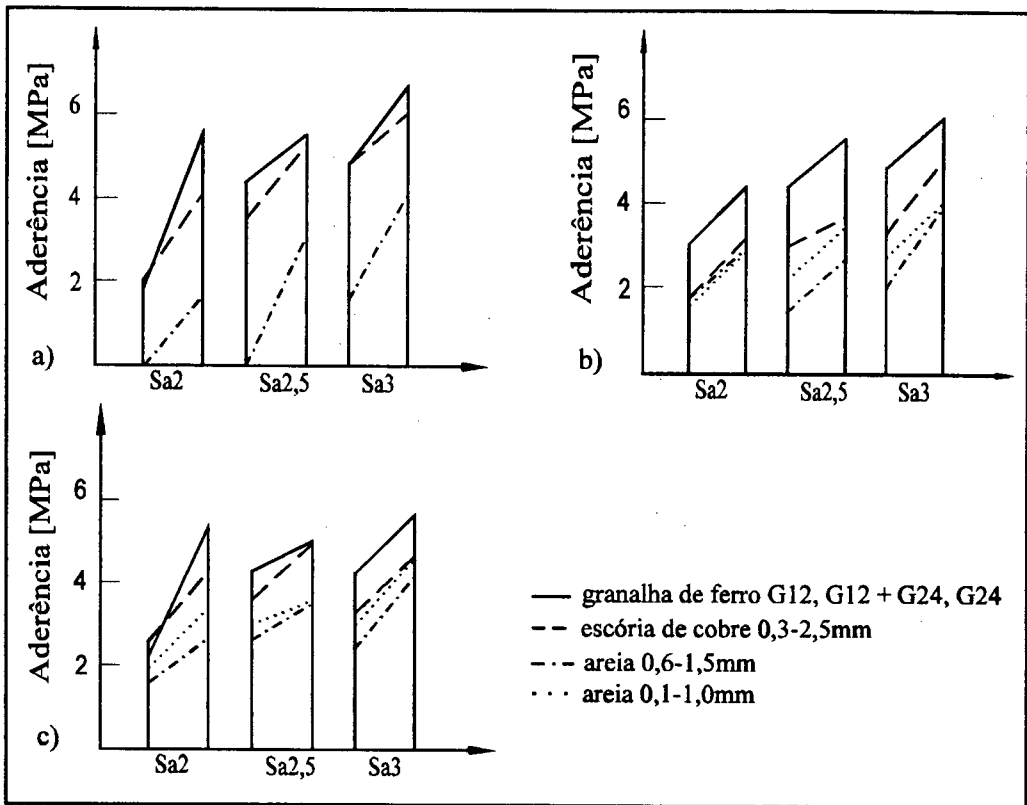


Figura 13-Relação entre padrões de limpeza ( SIS 055900 ) e aderência [58].  
 a) FS com Al. b) FS com Zn. c) ASP c/ Zn

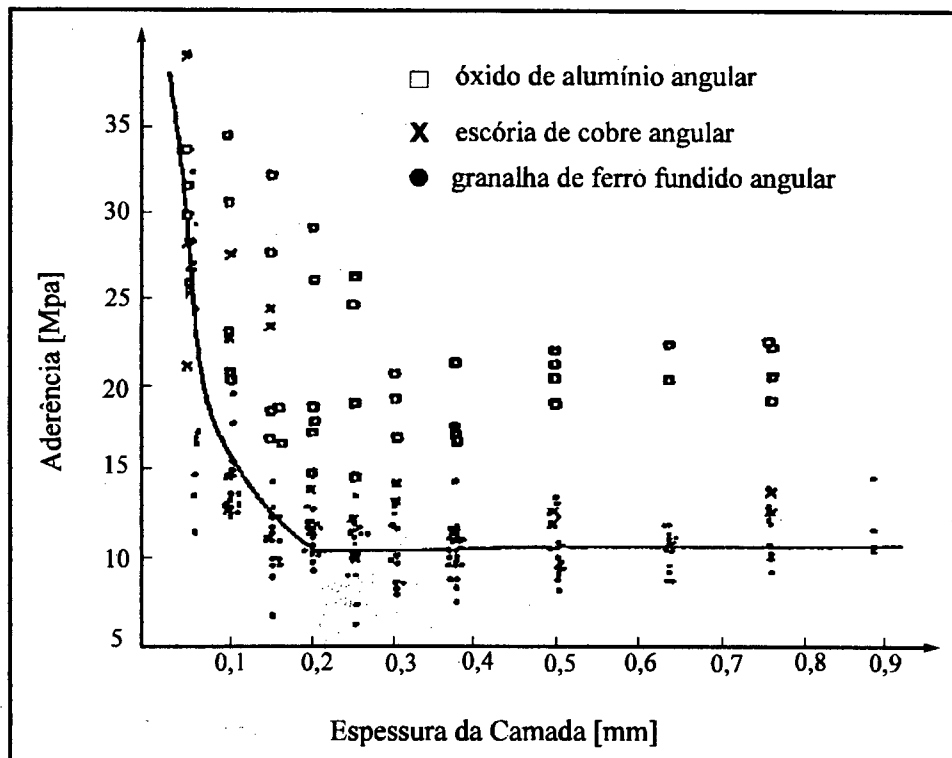


Figura 14 - Aderência do Al versus espessura do revestimento p/ diferentes abrasivos [60]

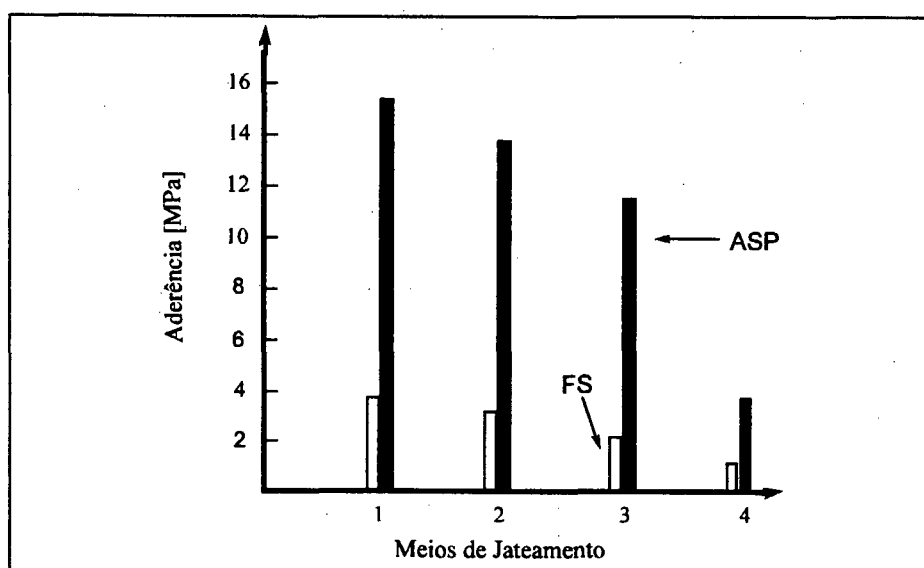


Figura 15 - Relação entre os meios de jateamento (1 a 4 na tabela 12) e aderência para revestimentos com espessura de 100 $\mu$ m [57].

Tabela 12- Métodos de jateamento [57]

Meios de Jateamento	Abrasivo	Tamanho de Grão [mm]
1	Granalha de Ferro Angular 100%	0,71 - 1,1
2	Granalha de Ferro Angular 75% Granalha de Aço Esférica 25	0,71 - 1,1 0,63 - 0,8
3	Granalha de Ferro Angular 50% Granalha de Aço Esférica 50%	0,71 - 1,1 0,63 - 0,8
4	Granalha de Aço Esférica 100%	0,63 - 0,8

Tabela 13 - Condições de Jateamento [58]

Grupo ↓	Método de Jateamento	Abrasivo			
		Tipo	Granulometria	Condição	
A	I	Centrifugo	Arame cortado	$\varnothing$ 0,9 mm	Usado - 478 HV
B	I	Ar Comp.	“	$\varnothing$ 0,9 mm	Usado - 478 HV
C	I	“	“	$\varnothing$ 0,6 mm	Novo - 423 HV
D	II	“	“	$\varnothing$ 0,9 mm	Novo - 488 HV
E	II	“	“	$\varnothing$ 1,2 mm	Novo - 475 HV
F	II	“	“	$\varnothing$ 0,6mm 50%; $\varnothing$ 0,9mm 50%	“
G	II	“	“	$\varnothing$ 0,9mm 50%; $\varnothing$ 1,2mm 50%	“
H	III	“	Granalha ferro angular	G12	“
I	III	“	“	G24	“
J	III	“	“	G34	“
K	III	“	“	G12 50%; G24 50%	“

Tabela 14 - Aderência em função de rugosidade [58]

Grupo	Aderência [MPa]			Ra [mm]	No de picos p/7mm, "n"	Ra . n	SRF
	Zn p/FS	Al p/FS	Al p/ASP				
I	0 - 1,2	0 - 1,2	7,1	0,010 - 0,011	22 - 29	2,7	4,6
II	2,4	2,0	10,4	0,011 - 0,018	20 - 30	3,5	5,7
III	5,3	4,9	-	0,007 - 0,015	27 - 47	3,8	9,8



## 5.2.2 Efeitos da Espessura e Porosidade do Revestimento sobre a Aderência

Com relação ao efeito da espessura do revestimento na aderência é de se esperar que os mais espessos possuam maiores tensões internas, o que por sua vez diminuiria a aderência. Porém o que se notou é que nos testes de aderência por tração em revestimentos finos, com uso de adesivo, conduzem a valores mais elevados. Isto é explicado pela penetração do adesivo pelos poros passantes até o substrato[52]. Estes fatos levaram a norma ASTM C 633-79 a especificar o teste de aderência para revestimentos acima de 0,38mm, pois isso evitaria o efeito dos poros passantes. Já Bardall et all. [61] adotaram critério menos conservador, classificando como finos apenas os revestimentos menores de 0,2mm, observando que na prática a maior parte dos revestimentos de alumínio situam-se na faixa de 0,25mm a 0,30mm, pois a análise metalográfica não detectou penetração do adesivo maiores espessuras. Eles propuseram a utilização de selantes com o intuito de evitar a interferência da porosidade em revestimentos de 0,2mm de alumínio. Investigação por microscópio revelou a eficiência do selante em evitar a penetração do adesivo, o que concorda com os resultados dos testes da figura 16: as medidas de aderência em função da espessura mostram que não há variação significativa na aderência de revestimentos de alumínio, depositadas por chama convencional, maiores que 0,2mm.

Por outro lado, mais recentemente, Y. Shimizu et all. [62] concluíram que a aderência aumenta quanto menor for a espessura relativa “K”, definida como a razão entre a espessura do revestimento e o diâmetro do corpo de prova. Pode-se dizer que quanto maior o diâmetro do corpo de prova maior o valor de aderência. Este efeito segundo os autores deve-se a uma concentração de tensões na interface revestimento/substrato, ocasionada pela diferença de propriedades mecânicas dos materiais. Essas tensões aumentam, causando menor aderência, para maiores valores de “K”, ou seja menores diâmetros dos corpos de prova e maiores espessuras, conforme pode ser verificado nas figuras 17 e 18 [62].

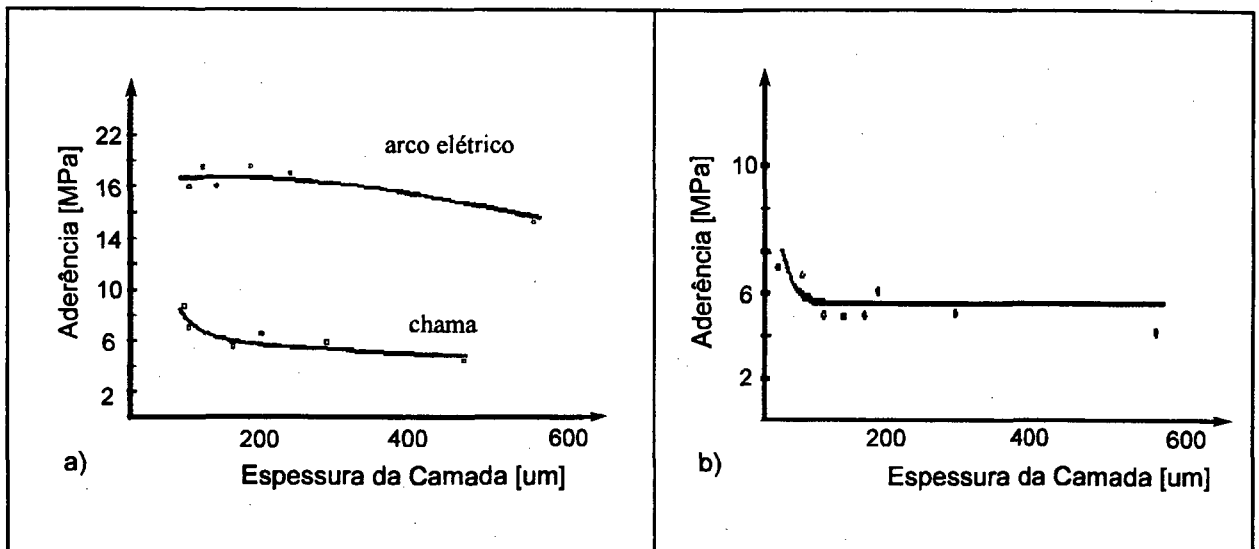


Figura 16 - Aderência em função da espessura do revestimento[61]. a) Aspersão de alumínio com chama e arco elétrico ; b) Aspersão de Zinco com arco elétrico.

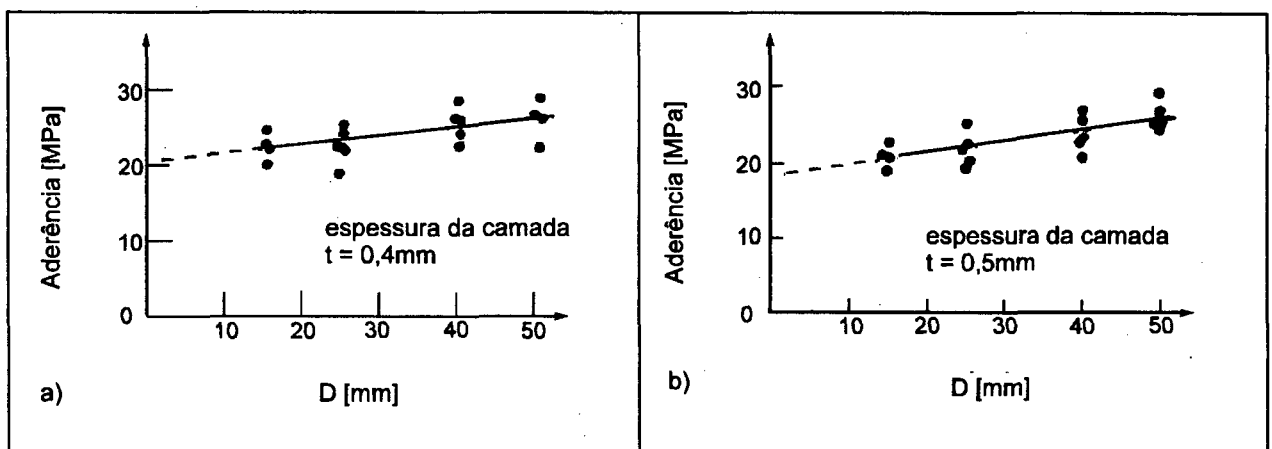


Figura 17 - Aderência em função do diâmetro para duas espessuras de revestimento [62].

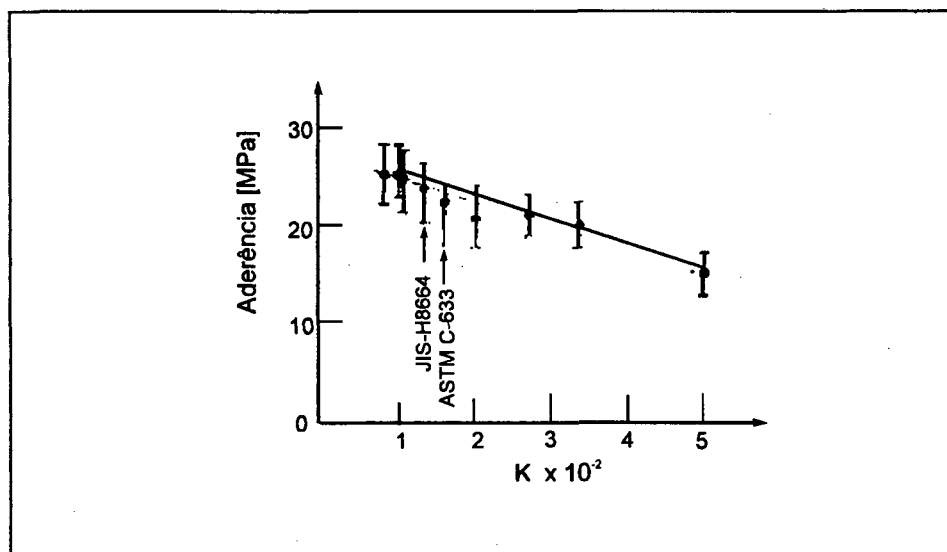


Figura 18 - Aderência em função da espessura relativa de revestimento [62].

A definição exata da espessura a ser usada depende da otimização de outras propriedades para determinada finalidade de um revestimento. Em função do custo e ciclo de vida a espessura mínima deve ser tal que possibilite o desempenho adequado e a espessura máxima não deve ser tão alta a ponto de inviabilizar sua aplicação devido ao alto custo.

A espessura mínima do revestimento é controlada pelo tamanho do pó ou espessura do arame considerando constantes a velocidade de avanço da pistola e fluxo de material. Por outro lado a espessura total é obtida pelo número de demãos. Considerando a variação da velocidade de avanço e o fluxo de material os revestimentos apresentam diferentes valores de porosidade e dureza. Round [47] cita que para obter camadas mais densas é preferível o uso de poucas demãos, isto é, velocidades menores e fluxos maiores. Bernard e Fauchais [63] colocam que velocidades altas (maior número de demãos para obter a espessura desejada) proporcionam maior microdureza e aliam este fato a maior dissipação de calor, pois as espessuras das camadas de cada passe seriam menores.

Com relação aos revestimentos de alumínio depositados por AT, como proteção por barreira contra corrosão, o principal objetivo é viabilizar uma espessura que garanta a menor porosidade e/ou elimine os poros passantes. Conforme [54] na deposição de alumínio por FS com espessura de aproximadamente 230  $\mu\text{m}$  não há poros passantes. Recomenda também a faixa de 130  $\mu\text{m}$  a 300  $\mu\text{m}$  para revestimentos resistentes a corrosão atmosférica em ambiente rural e industrial e a faixa de 230  $\mu\text{m}$  a 380  $\mu\text{m}$  para corrosão em ambiente marinho ou imersas em água do mar. V. Ett [27] reforça os dados anteriores mencionando que revestimentos de 350  $\mu\text{m}$  a 400  $\mu\text{m}$  evitariam os poros passantes e em camadas de 200 $\mu\text{m}$  os mesmos seriam mínimos.

A marinha americana após longos anos de pesquisa elaborou a norma MIL-STD-2138A (SH) [48] que versa sobre os procedimentos de aspensão em embarcações navais. Segundo esta norma as espessuras dos revestimentos variam com as temperaturas de trabalho maiores e menores que 80 °C. Nos locais onde as temperaturas são maiores que 80 °C são recomendadas espessuras de 250  $\mu\text{m}$  a 375  $\mu\text{m}$ , sendo necessária a aplicação separadamente de duas camadas de 38  $\mu\text{m}$  de selante com tinta a base de alumínio. Para os casos de temperaturas de trabalho menores que 80 °C a espessura do revestimento situa-se entre 175  $\mu\text{m}$  a 250  $\mu\text{m}$ , tendo como selante tinta epoxi diluída com espessura entre 13  $\mu\text{m}$  e 19  $\mu\text{m}$ . Onde for requerida a aplicação de alguma camada adicional a espessura do revestimento de alumínio pode ser reduzida para 75  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$ .

Como pode-se notar as faixas de valores são muito próximas, sendo que muitas

espessuras enquadram-se na faixa estipulada pela marinha americana. Além disso nessa pesquisa as aplicações são semelhantes às aquelas da norma MIL-STD-2138A (SH), então nada mais coerente que assumir valores recomendados.

### **5.3 Testes de Aderência**

Atualmente existe uma grande diversidade de testes destrutivos e não destrutivos para a pesquisa da aderência de revestimentos. A maioria desses testes traz pequenas ou grandes deficiências, que de algum modo mascaram os resultados alcançados. Além disso, encontra-se ainda freqüentemente na literatura técnica resultados de testes de tração sem especificação do método empregado, o que torna praticamente impossível uma comparação criteriosa da qualidade dos materiais ou dos processos utilizados. Essa constatação tem conduzido nos últimos anos a um esforço a nível internacional e mesmo nacional pela unificação da metodologia empregada [64, 65].

Existe grande interesse em dispor de ensaios, que forneçam resultados quantitativos confiáveis e sejam suficientemente práticos para permitir sua aplicação em campo. A seguir serão descritos e comentados detalhes relativos à aplicação dos ensaios mais consolidados e portanto mais freqüentemente utilizados, com ênfase para o ensaio de tração.

#### **5.3.1 Testes de Tração em Laboratório**

Todas variações desse método baseiam-se na geração de tensões normais na zona revestimento-substrato. Na verdade os métodos podem ser subdivididos em dois grupos principais, ilustrados esquematicamente na figura 19.

- Arrancamento do revestimento do substrato com o auxílio de diferentes corpos de extração, que são fixados por colagem ou brasagem na camada aspergida ( figuras 19.1 - 19.5).

- Arrancamento do revestimento (suficientemente resistente) do substrato, sem o uso de adesivo, com o recurso de componentes de forma adequada (figuras 19.6 -19.14).

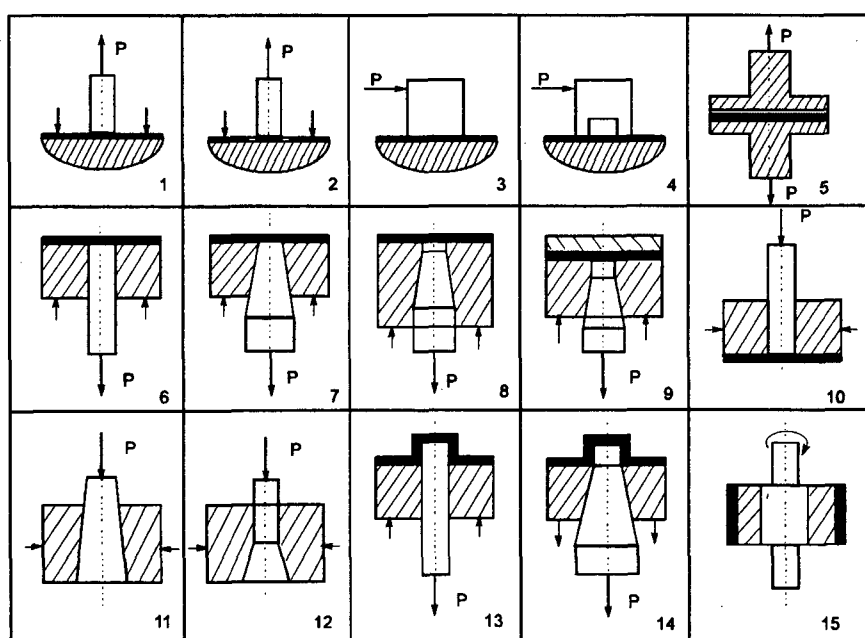
Dentre os métodos do segundo grupo os mais aplicados em laboratório são os da figura 19.6 e suas variantes 19.7 - 19.9. Entre as vantagens de não usar adesivo são citadas as possibilidades de medir a aderência logo após a deposição do revestimento, bem como em temperaturas elevadas. Porém, entre as principais desvantagens incluem-se problemas com a adequada fixação da amostra e contra-amostra durante a preparação da superfície do substrato e

aspersão, bem com a freqüente falsificação dos resultados dos testes devido ao atrito entre as duas superfícies cilíndricas. Além disso, nos testes ilustrados nos quadros 19.6, 19.7 e 19.8 o revestimento deve ser suficientemente forte para evitar sua ruptura. Entretanto o aumento demasiado da espessura, além dos valores práticos comuns, gera tensões residuais excessivas que mascaram os resultados da aderência.

Com relação aos testes com uso de adesivo existem 4 principais que foram normalizados: ASTM C633-79, DIN 50160, AFNOR NF A91-202-79 e JIS H8666-80. A configuração básica dos ensaios é aquela da figura 19.5, baseada no revestimento da superfície plana de um corpo de prova cilíndrico, na qual é colado através de adesivo um “corpo de extração”, que após secagem é tracionado por uma máquina de ensaio de tração. A tensão requerida e o local de ruptura fornecem o valor e o tipo de falha, ou seja se houve falta de aderência, de coesão ou falha no adesivo.

As causas das dispersões de resultados de diferentes instituições são associadas ao uso de corpos de prova de diâmetros diferentes - a maioria 25 e 40 mm -, revestimentos de espessura variável, bem como em diferentes procedimentos para preparação do substrato e de aspersão.

Nesse trabalho será adotado o teste de tração da ASTM C-633 com corpos de prova preparados em laboratório, porém nada impede que os mesmos sejam retirados da superfície que está sendo metalizada em campo para manter-se os mesmos parâmetros. Um esquema deste teste é mostrado na figura 20.



**Figura 19:** Variantes de teste de aderência por tração com e sem uso de adesivo [66].

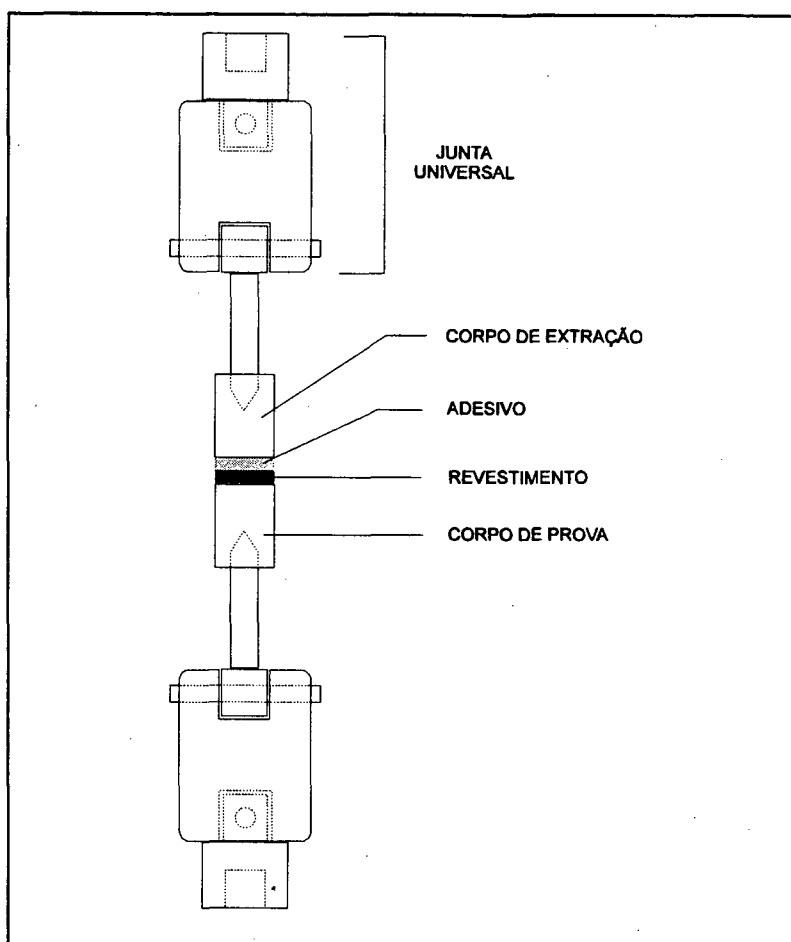


Figura 20 - Dispositivo de tração com amostra [67 a 69]

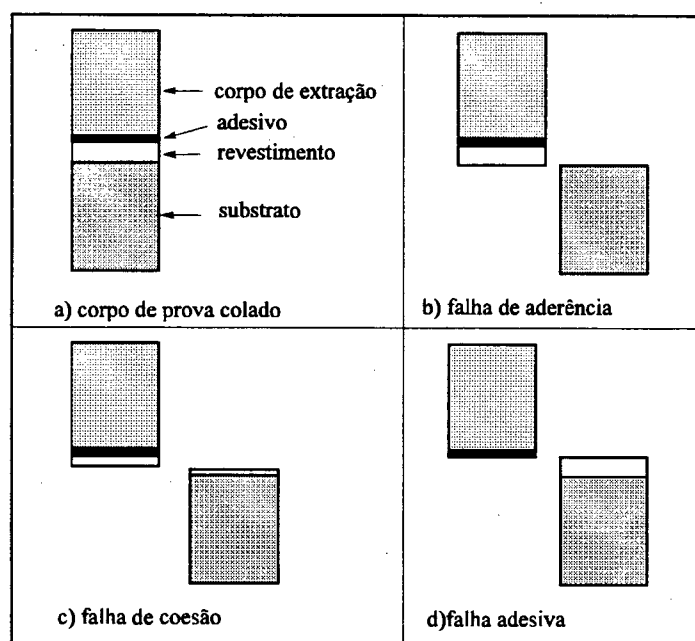
### a) Tipos de Falhas

Nos testes de aderência por tração com o uso de adesivos podem ocorrer três tipos de falhas, que são classificadas em função do local predominante de ruptura como: aderência (interface revestimento/substrato), coesão (interiormente ao revestimento), adesiva (interface adesivo/revestimento, adesivo/corpo de extração e no adesivo). Estes tipos de falhas são mostrados esquematicamente na figura 21.

Como os corpos de prova estão propensos a apresentarem diferentes modos de ruptura é necessário verificar detalhadamente o tipo de falha para cada tipo de análise. Por exemplo, a qualidade do revestimento quando solicitada por tração pode ser comprovada quando ocorrerem as falhas por aderência ou coesão, pois em ambos os casos o revestimento poderá ser rejeitado, dependendo do valor mínimo estipulado, não importando onde houve a falha. Caso seja necessária uma análise mais profunda para detectar se o problema está na preparação da superfície ou nos parâmetros de aspersão é importante a diferenciação entre as falhas de aderência e coesão.

Os testes que apresentam falha de aderência permitem verificar a influência da

preparação da superfície (nível de rugosidade e limpeza), pois a ruptura na interface substrato/revestimento fornece o valor máximo de tração. No caso da falha por coesão a ruptura apresenta-se dentro do revestimento, sendo o valor obtido o máximo e o mínimo que o revestimento e a interface substrato/revestimento suporta, respectivamente. A mesma análise pode ser feita quando ocorre falha adesiva, ou seja o valor obtido nos testes é considerado como o mínimo suportado pelo revestimento e interface substrato/revestimento.



**Figura 21** - Esquema dos tipos de falha nos testes de tração [10]

### 5.3.2 Testes de Cizalhamento e de Dobramento em Laboratório

Existem vários testes destrutivos não normalizados para avaliar a aderência do revestimento por sua resistência ao cizalhamento. Estes testes diferenciam-se quanto às múltiplas maneiras de gerar tensões tangencialmente à superfície de ligação revestimento-substrato. Do mesmo modo que nos métodos de determinação da aderência por tração, poder-se-ia nesse caso também considerar dois grupos, ou seja, aqueles que exigem a fixação por colagem na superfície do revestimento e os métodos que permitem o ensaio sem necessidade de adesivo (figura 22).

Até então a pesquisa da aderência por testes de cizalhamento é menos difundida e raramente realizada. Especialmente difícil é conseguir o cizalhamento exatamente na superfície de contato revestimento-substrato. Entre os mais difundidos nas pesquisas de laboratório é citado o

método da figura 22.9, aparecendo também em publicações recentes os métodos representados em 22.11 e 22.3. Na opinião de Milewski [66] uma comparação dos resultados desses testes seria impossível.

O teste de dobramento se enquadra nos destrutivos realizados em laboratório. A principal restrição é que permite apenas uma avaliação qualitativa e comparativa da aderência e coesão. Consiste no dobramento do corpo de prova apoiado em cutelos ou livre. O ângulo no qual ocorrem trincas ou desprendimento do revestimento fornece um valor relativo da ductilidade, permitindo a comparação de materiais e processos de deposição. O momento da trinca/ruptura do revestimento é assinalado a olho nu, sob um microscópio ou por ultra-som. Tornou-se cada vez mais difundida a técnica de micro-dobramento em dispositivos especiais colocados sob microscópio metalográfico. Exigem amostras de pequenas dimensões 10 x 40 x 0,8 mm, que podem se deformar e dificultar tanto o correto procedimento de preparo da superfície (jateamento) e mesmo a aspersão térmica [66].

As normas MIL 2138A, AWS C2.18 e Petrobras N-2568 trazem as condições e corpos de prova para o ensaio de dobramento em revestimento de alumínio com  $\sim 250 \mu\text{m}$ . Por estas normas é estipulada a espessura de 1,25 mm da chapa para teste com um cutelo de 13 mm, podendo utilizar diâmetros maiores se revestimento mais espessos forem testados. Diâmetros de cutelos maiores são menos restritivos para testes de revestimentos com mesma espessura.

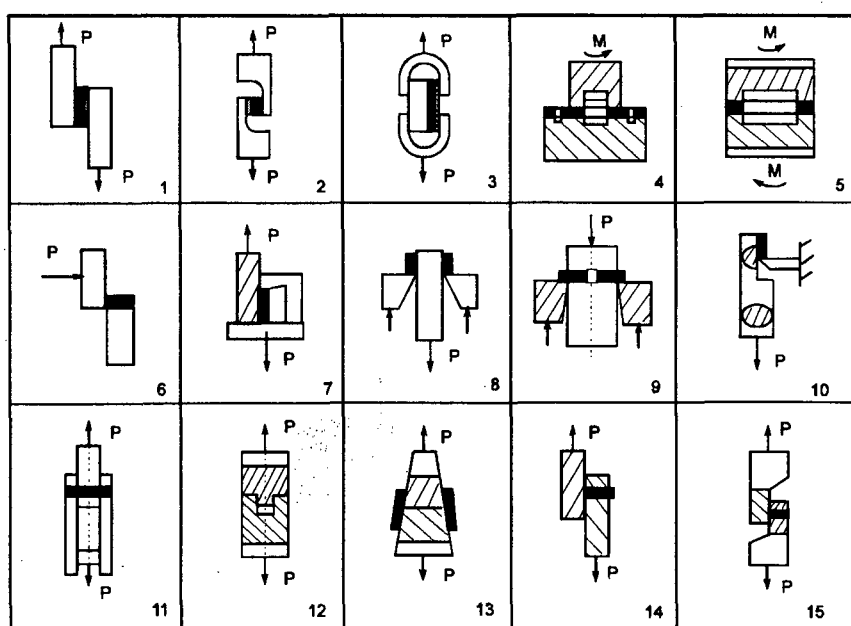


Figura 22: Variantes de testes de aderência por cisalhamento [66]



### 5.3.3 Testes para Avaliação da Aderência em Campo

#### a) Testes Qualitativos / Destrutivos

No controle do processo de aspersão em campo podem ser feitos alguns testes simples, porém, apenas qualitativos, baseados em diferentes possibilidades de gerar, por deformação plástica, tensões cizalhantes entre o revestimento e o substrato.

Por exemplo pode ser usada uma ferramenta de gume cortante conduzida manualmente (estilete, canivete, lâmina de barbear) ou uma ferramenta pontiaguda (raio de 40  $\mu\text{m}$ ) pressionada contra o revestimento com carga controlada. Também pode ser usada uma lima aplicada em um canto /extremidade da superfície revestida e no sentido substrato-superfície do revestimento, ou seja, buscando destacar o revestimento [64]

No teste de impacto, considerado mais rigoroso, bate-se com um cinzel (p.ex. com 10 mm de largura) deformando um quadrado da superfície. Caso o revestimento fora do quadrado não se destaque a adesão é considerada boa!

Reconhece-se o caráter empírico desse grupo de testes, ou seja, sua natureza muito subjetiva, portanto com a desvantagem de ficarem muito sujeitos à habilidade pessoal do técnico aplicador.

A norma ASTM D 3359 descreve os requisitos para o “teste de aderência em campo através de fita adesiva”. Nesse caso faz-se, sobre o revestimento, sulcos de formato retangular e sobre os mesmos aplica-se uma fita adesiva. Ao se destacar a fita parte do revestimento se desprende fornecendo a porcentagem que não aderiu ao substrato, na área do teste. Este teste além de ser destrutivo também tem a desvantagem de não quantificar o valor da aderência.

#### b) Testes Mecânicos Quantitativos

Foram desenvolvidos outros equipamentos para medições de aderência em campo que utilizam princípios semelhantes ao teste de tração mecânica de laboratório. Estes equipamentos podem efetuar testes destrutivos e não destrutivos. Para a realização de testes não destrutivos é necessário conhecer um valor ótimo de aderência para determinado revestimento e usar o equipamento até um valor próximo. Com isso não se destaca o revestimento e assegura-se um valor mínimo requerido. Estes testes são normalizados pela ASTM sob a designação D 4541 - “Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings using Portable Adhesion Testers” [70]. Os equipamentos utilizados nestes testes podem ser mecânicos, hidráulicos ou pneumáticos.

### **c) Testes não destrutivos**

De acordo com os princípios físicos em que se baseiam são propostos para a medida da adesão, por exemplo, métodos térmicos, acústicos, de resistência de contato elétrico e ultra-som, todos eles de caráter apenas qualitativo e comparativo [64]. Entretanto a literatura técnica disponível limita-se a comentar o uso dessas técnicas a nível experimental em laboratórios, não se dispondo de informações mais detalhadas sobre seu aprimoramento e confiabilidade.

Destaque-se como promissor o teste devido a Bucklow [71], que utiliza um equipamento de ultra-som gerador de ondas superficiais de "Rayleigh". O princípio de funcionamento baseia-se na introdução de pulsos no substrato, que o percorrem imediatamente sob o revestimento. Dependendo da extensão e qualidade da ligação os pulsos podem atravessar a interface e penetrar no revestimento sofrendo uma atenuação. O sinal atenuado é detectado por uma sonda localizada no outro lado do revestimento.

## VI METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 6.1 Materiais e Tipos de Corpos de Prova

Os substratos jateados e posteriormente revestidos com alumínio por aspersão térmica constituíram-se de chapas e tarugos de aço carbono ASTM 1020.

Foram usadas chapas com dois graus de corrosão: "A" e "C" segundo a norma SIS 0559900. Para os tarugos não houve esta distinção, pois os mesmos apresentavam uma superfície usinada.

Os abrasivos utilizados foram os óxidos de alumínio Alundum 38A (fornecido pela Norton) com granulometrias 16 e 30, e Sinterbal SBA (da Mineração Curimbaba) nas granas 1220 e 2040.

Com os materiais citados anteriormente efetuou-se a preparação da superfície de distintos corpos de prova, que são mostrados na figura 23.

Para facilitar a identificação das amostras e corpos de prova utilizou-se a codificação apresentada abaixo:

### **X Y Z - W K**

onde:

**X** = grau de corrosão da superfície jateada: "A" ou "C"

**Y** = tipo de abrasivo: "A" para Alundum 38A e "S" para Sinterball SBA

**Z** = granulometria do abrasivo: "1" para as granas 16, 1220 e "2" para as granas 30, 2040

**W** = séries de jateamento: 1, 2, 3, 4.

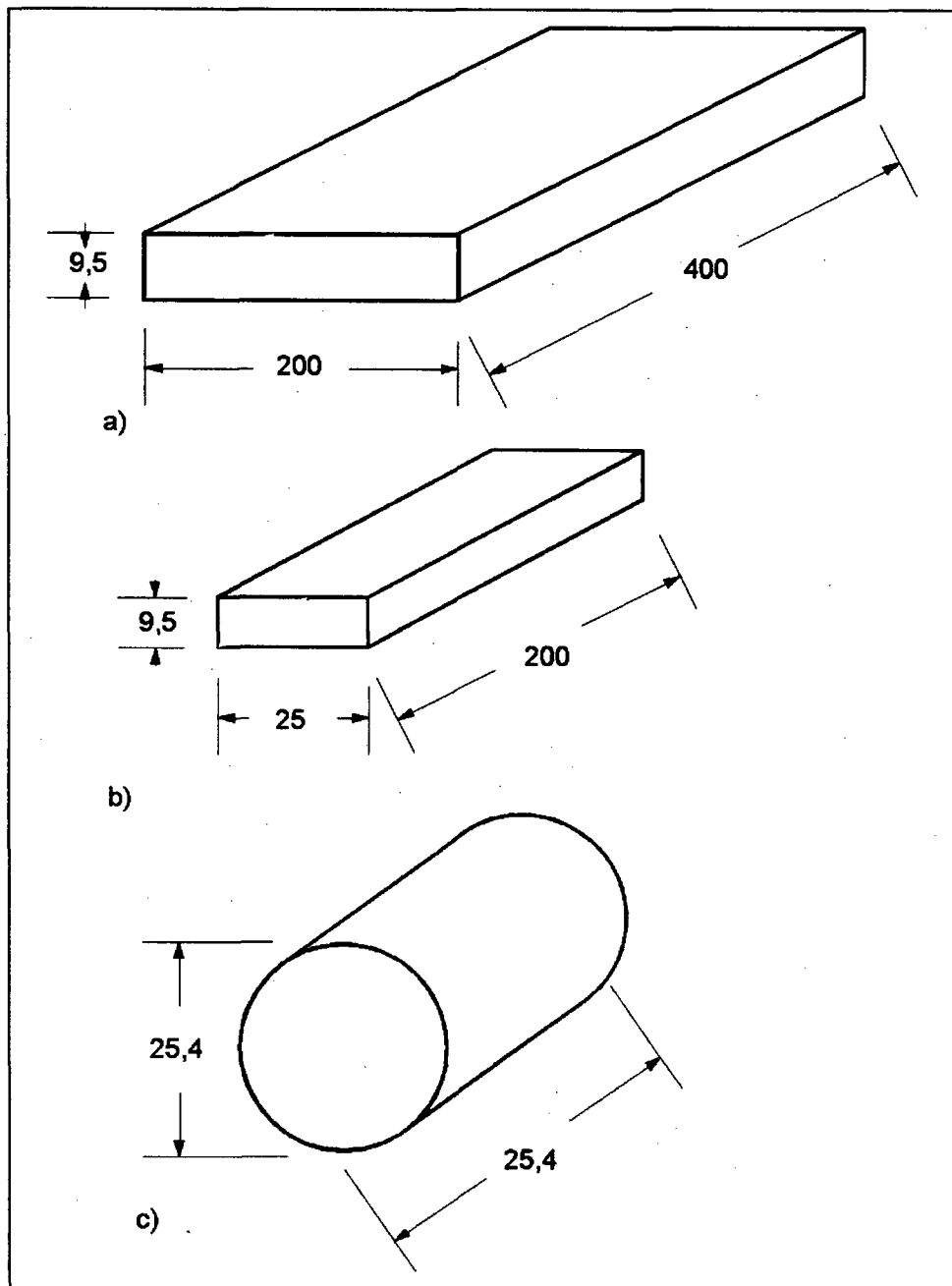
**K** = tipo de preaquecimento do substrato e tratamento térmico posterior da camada.

S = sem preaquecimento

P = preaquecimento a 120 °C

Q = preaquecimento a 120 °C e tratamento térmico a 400 °C

R = preaquecimento a 250 °C.



**Figura 23 -** Corpos de Prova para ensaios.

a) Chapa para medição de  $R_a$ ,  $R_y$  e  $R_z$ .

b) Chapa para ensaio de dobramento.

c) Tarugo para ensaio de tração e análise da superfície.

## 6.2 Jateamento Abrasivo

### 6.2.1 Etapas de Jateamento

O jateamento foi efetuado em corpos de prova para análise da rugosidade, impregnação superficial, aderência por tração e dobramento. As etapas de jateamento foram definidas em função do grau de corrosão das superfícies, tipo e granulometria dos abrasivos e da rugosidade  $R_y$  pretendida. Os parâmetros inerentes a operação de jateamento (ângulo, distância, pressão) foram definidos de acordo com o abrasivo Alundum 38A ou Sinterball. A tabela 15 relaciona as condições utilizadas nas etapas de jateamento.

**Tabela 15 - Condições de Jateamento das etapas de trabalho**

Condições de Jateamento	Etapas de Jateamento							
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª
Código	AS1-	CS1-	AS2-	CS2-	AA1-	CA1-	AA2-	CA2-
Grau de Corrosão	A	C	A	C	A	C	A	C
Abrasivo	Sinterball				Alundum 38A			
Granulometria	1220	1220	2040	2040	16	16	30	30
Rugosidade $R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	90/110	90/110	50/70	50/70	90/110	90/110	90/110	50/70
Dist. bocal-peça [mm]	450	450	450	450	100	100	100	100
Ang. Jateam, [°]	45	45	45	45	90	90	90	90
P. Jateam. [kPa/psi]	413/60	413/60	413/60	413/60	689/100	689/100	689/100	689/100

Cada etapa descrita acima foi dividida em quatro séries em função do decréscimo da rugosidade  $R_y$ , pois na quarta série já se verificava níveis menores que os predeterminados, no caso do jateamento com Sinterball. Para efeito de comparação adotou-se o mesmo número para o Alundum 38A. Os procedimentos adotados nas 8 etapas são descritas a seguir:

a) no início de cada série era verificado:

⇒ a temperatura ambiente com termômetro digital marca Iope, modelo Iophigro 51 com faixa de temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $+60^{\circ}\text{C}$ ;

⇒ a umidade relativa através de um sensor tipo capacitivo que acoplado ao termômetro digital Iophigro 51 fornece os valores medidos em uma faixa de 5 a 95%. A operação de jateamento era postergada até se obter umidade relativa menor que 75% [72].

⇒ a umidade do ar comprimido colocando-se um pedaço de papel absorvente distante ~200mm do bocal de jateamento. Este controle também era exercido visualmente na chapa jateada, pois caso houvesse alguma umidade no ar comprimido apareceriam manchas na superfície. Como prevenção foram utilizados três filtros na linha de alimentação.

b) limpeza da cabine de jateamento e equipamento de jato com ar comprimido para remoção de abrasivos oriundos de outras séries;

c) quarteamento do abrasivo contido na embalagem original (25kg) para retirada de amostra com ~200g e colocação no equipamento de jateamento;

d) colocação do dispositivo para controle do ângulo e distância de jateamento dentro da cabine de jateamento;

e) jateamento dos corpos de prova da figura 23a controlando o grau de limpeza. Neste caso como o processo era semi-automático, portanto dependente do operador, procurou-se padronizar o avanço do bocal de jateamento. Isto é a medida que se conseguia o grau de limpeza Sa3 na área atingida o bocal era deslocado para uma área adjacente, no mesmo sentido e direção;

f) pesagem para determinação da quantidade de abrasivo utilizada e quarteamento para retirar uma amostra de ~200g. A mesma quantidade de abrasivo era reutilizada, por quatro vezes, no jateamento das chapas;

g) medição da rugosidade das chapas (figura 23a) para verificação do nível atingido;

h) jateamento dos corpos de prova das figuras 23b e 23c nas etapas 1, 3, 5 e 7 com o abrasivo novo (1ª série) restante no equipamento de jato, e dos corpos de prova da figura 23c na 4ª série das etapas mencionadas;

i) aspersão térmica dos corpos de prova da figura 23b na 1ª série e da figura 23c na 1ª e 4ª série de cada etapa;

j) interrupção do jateamento na quarta série por não ser atingido, com o abrasivo Sinterball, o nível de rugosidade Ry pretendida.

## 6.2.2 Equipamentos e Dispositivos

### a) Equipamentos

Neste trabalho foi utilizado um equipamento de jato por pressão (JM90) (figura 24) com as características abaixo:

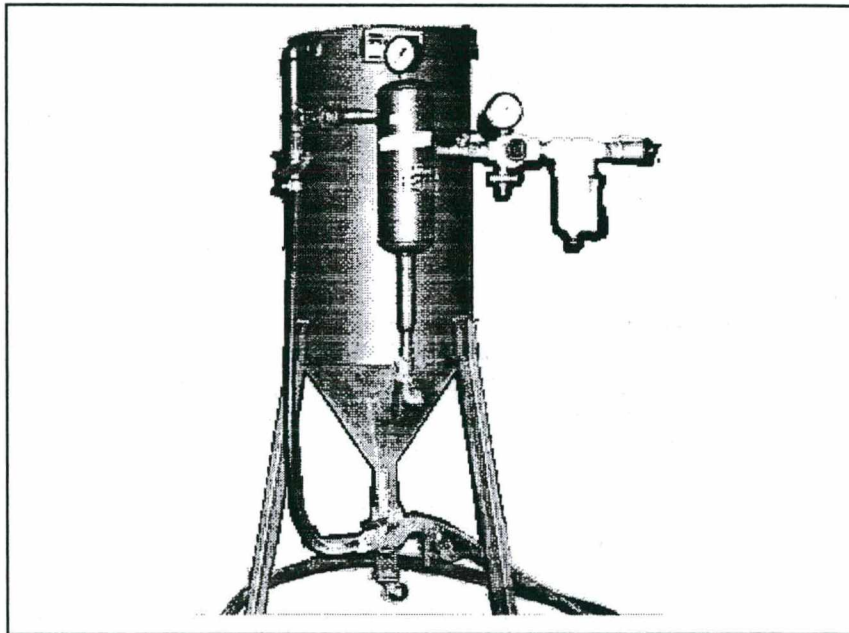
⇒ dimensões do recipiente de abrasivo: altura = 600 mm; Diâmetro = 350 mm

⇒ pressão máxima = 1400 kPa (200psi)

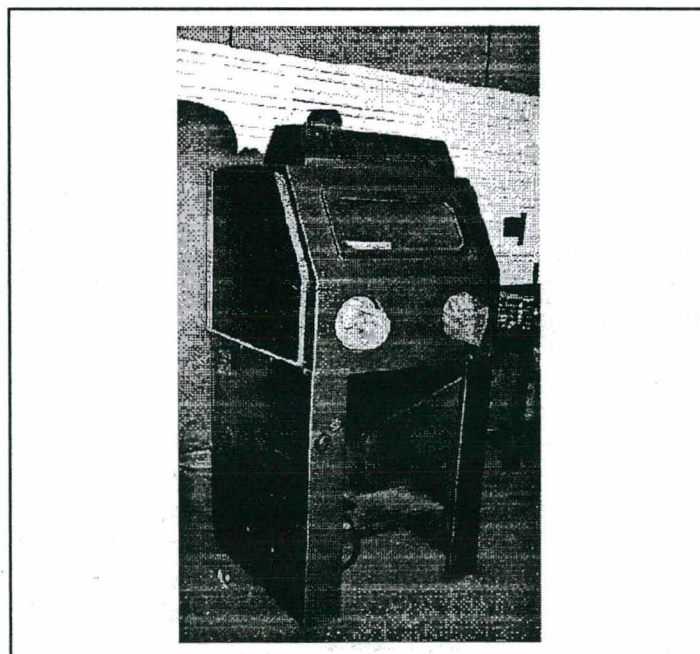
⇒ diâmetro do bocal = 6,4 mm

⇒ diâmetro da mangueira de alimentação = 12,7 mm

O jateamento foi efetuado dentro de uma cabine hermeticamente fechada para evitar perdas e contaminação do abrasivo. Para isso foi usada uma cabine com: largura e profundidade de 800 mm, altura de 700 mm, que é mostrada na figura 25.



**Figura 24** - Equipamento de jato por pressão



**Figura 25** - Cabine de jateamento

## b) Dispositivos

Foram construídos alguns dispositivos para facilitar e controlar as operações de jateamento. Para fixar a distância e ângulo entre bocal-peça foi utilizado o dispositivo mostrado na figura 26.

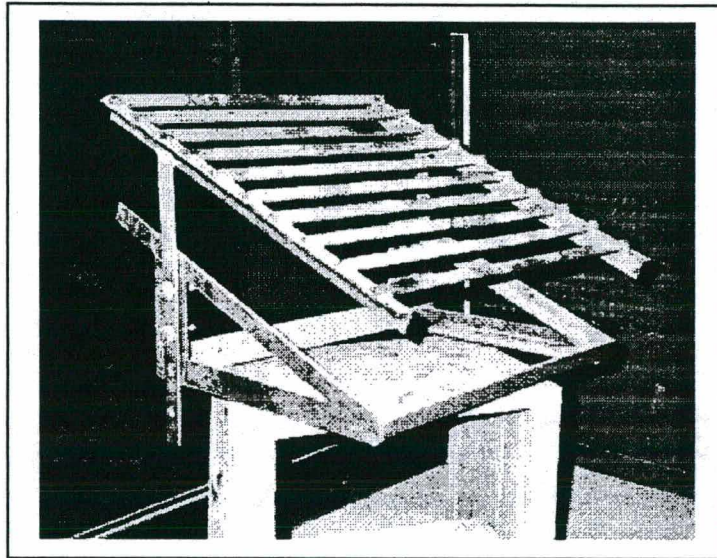


Figura 26 - Dispositivo de fixação do ângulo e distância de jateamento

## 6.3 Análise dos Abrasivos

### 6.3.1 Coleta das Amostras

Amostras foram coletadas para verificação do desgaste, contaminação e forma dos abrasivos.

As coletas foram feitas no abrasivo novo e após cada série de jateamento e consistiram no quarteamento de amostras com 25 kg (inicial) e ~14 kg no final das outras séries. Este quarteamento foi efetuado manualmente para retirada de ~200 g de abrasivo para posterior análise granulométrica, química e macro/microscópica, e consistiu nos seguintes procedimentos:

- a) colocação em forma de cone do conteúdo coletado sobre uma lona de vinil;
- b) achatamento do cone e divisão em quatro partes iguais;
- c) separação de duas partes retiradas de quadrantes opostos, limpando a lona com um pincel para evitar perdas de partículas finas.



d) colocação do conteúdo dessas duas partes em um recipiente para facilitar a formação do cone quando do despejamento;

e) repetir as operações anteriores até a obtenção de amostra com ~200 g

As amostras de pó eram guardadas em recipientes plásticos e classificadas conforme metodologia definida na introdução deste capítulo. A codificação dada as amostras de abrasivos segue as convenções definidas no item 6.1, com um dígito adicional: “0” para abrasivo virgem e “1 a 4” para a correspondente série de jateamento. A figura 27 mostra uma seqüência de quarteamento.

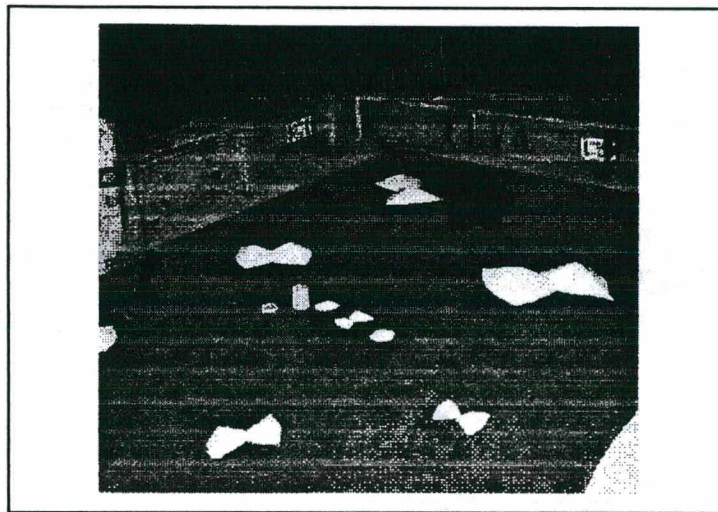


Figura 27 - Seqüência da operação de quarteamento.

### 6.3.2 Análise Granulométrica

Esta análise foi efetuada para verificação da distribuição de tamanho do abrasivo como fornecido e após cada série de jateamento. Com isso pode-se determinar a grana dos abrasivos novos conforme distribuição contida na norma ANSI B-74.12 [38] e, principalmente, detectar-se o desgaste sofrido pelo abrasivo por sucessivos jateamentos, bem como a maior ou menor susceptibilidade ao desgaste de determinada granulometria.

As análises foram feitas conforme as normas ASTM B-214 [36], C-371 [37] e MPIF 05 [73] pelos procedimento descrito a seguir:

a) foram definidas séries de nove peneiras para cada granulometria, sendo: peneiras da malha 10 a 35 (2,00 a 0,50 mm) para abrasivos com granulometria 16 e 1220, e peneiras da malha 18 a 60 (1,00 a 0,25 mm) para abrasivos com granulometria 30 e 2040. Estas séries de peneiras

foram selecionadas tendo como base a distribuição fornecida pelos fabricantes (dada em função de 5 peneiras) acrescidas de outras 4 peneiras mais finas que permitissem detectar melhor a distribuição de finos (resíduo) gerados pelo desgaste do abrasivo.

b) montagem das torres de peneiras selecionadas sobre um vibrador;

c) colocação de uma amostra de 100g na parte superior da “torre” de peneiras, e acionamento do vibrador com movimento de rotação de 285 rpm e oscilação de 2,5Hz por 15 minutos.

d) retirada e pesagem do abrasivo retido em cada peneira e no fundo. Caso a soma dos valores parciais de peso obtidos fosse 1% menor que o peso inicial da amostra, o ensaio era repetido, conforme as normas ASTM [36, 37].

### 6.3.3 Análise Química

Essa análise foi adotada para verificar a pureza do abrasivo e sua contaminação por elementos contidos nas superfícies das chapas jateadas, que continham dois graus de corrosão (A e C). Foram realizadas análises químicas:

a) do abrasivo novo, para comprovar os dados de composição dos elementos Fe e Si que constam nos boletins técnicos dos fornecedores.

b) do abrasivo após a 4ª utilização, de todas as etapas de jateamento, para verificar a contaminação do abrasivo pelos elementos ferro e silício.

Os elementos Ferro e Silício foram os escolhidos por predominarem nas superfícies jateadas (aço carbono com graus A e C de corrosão), portanto os mais prováveis de serem removidos pela operação de jateamento e encontrados nos abrasivos. Além disso as referências [24, 26] citam que abrasivos com grandes teores desses elementos são prejudiciais a aderência dos revestimentos. O Ferro, contido em maiores proporções nas granalhas, contaminam as superfícies com partículas altamente oxidáveis. No caso do Silício por ser o elemento principal da areia, a qual impregna a superfície com sílica hidratada (mica).

As análises químicas foram feitas, na Central de Análises do Departamento de Química da UFSC, por absorção atômica e gravimetria, conforme os seguintes procedimentos:

a) preparo das amostras através de moagem, em moinho de ágata, por um período de 3 horas;

b) abertura das amostras com soluções adequadas para cada tipo de elemento;

c) análise gravimétrica do elemento Silício;

d) análise por absorção atômica (Ferro) usando um espectômetro marca Hitachi modelo Z8230 (com corretor Zerman).

### **6.3.4 Análises dos Constituintes e da Forma**

#### **a) Análise dos Constituintes**

Foram efetuadas nos abrasivos para complementar os dados obtidos na análise química. Como esta análise não é quantitativa a comparação entre as várias séries de jateamento não foi necessária, portanto foram analisadas somente as amostras dos dois abrasivos como fornecido.

Neste caso foi utilizada a técnica de difratometria de raios-X, que tem seus procedimentos definidos a seguir:

- a) moagem e peneiramento até malha 325 mesh (45  $\mu\text{m}$ );
- b) compactação do abrasivo em amostras adequadas para se obter o plano de difração;
- c) leitura da difração de raios-x em equipamento marca Philips modelo X-pert, utilizando radiação de cobre  $K\alpha$  com filtro de níquel.

#### **b) Análise da forma**

Para verificar a forma inicial das partículas e sua possível variação após 4 utilizações, foram feitas fotos com aumento de 20 vezes no Microscópio Eletrônico de Varredura. As amostras analisadas foram retiradas do abrasivo como fornecido e após a 4ª série de jateamento de peças com grau de corrosão "A" (o que equivale a dizer, retiradas das etapas de jateamento 1, 3, 5 e 7).

## **6.4 Análise da Superfície do Substrato**

### **6.4.1 Medição da Rugosidade e Caracterização da Textura**

Esta medição foi feita objetivando correlacionar as variações ocorridas no perfil da superfície jateada com a mudança da granulometria do abrasivo, pois nesse sentido não foi encontrado nenhum estudo na literatura. Sabe-se que para idênticas condições de jateamento dois abrasivos (areia e óxido de alumínio) com a mesma granulometria ou o mesmo abrasivo com granulometrias desiguais proporcionarão diferentes valores de rugosidade.

Para esta análise foi usada uma chapa (figura 23a) com dimensões apropriadas a medições representativas da rugosidade, que resumiram-se em 18 posições (sendo 9 no sentido de deslocamento do bocal de jateamento e 9 sobre o eixo perpendicular), após cada série de jateamento.

Em cada posição foram avaliados os parâmetros Ra, Ry(Rt), Rz e Sm. Destes o parâmetro Ry foi o considerado na definição da rugosidade pretendida, pois se assemelha muito ao utilizado na prática, onde é usado um relógio comparador ou avaliada por comparação visual com padrões físicos.

As medições foram efetuadas em campo através de um rugosímetro portátil, com apalpador de contato mecânico, marca Mitutoyo, modelo SurfTest 211 com capacidade de medição 0,05-40  $\mu\text{m}$  para Ra e 0,3-160  $\mu\text{m}$  para Ry,Rz. Para medições do parâmetro Sm foi utilizado um equipamento de bancada marca Perthen, modelo S8P, com apalpador mecânico RHT 6-50.

Além disso verificou-se o relevo da superfície jateada por microscopia eletrônica de varredura através da técnica de elétrons secundários (SE), que mostra a profundidade de foco (relevo). Estas análises foram efetuadas em uma área de 2,5  $\text{mm}^2$  (1,4x1,8 mm) nos corpos de prova conforme figura 23c com aumento de 50x para a 1ª e 4ª série de cada etapa de jateamento.

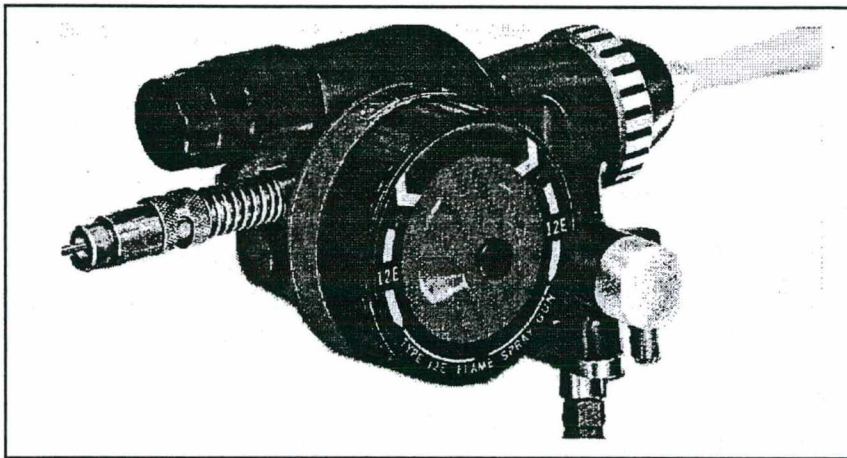
#### **6.4.2 Impregnação por Partículas de Abrasivo**

Microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para a verificação visual da impregnação por partículas abrasivas das superfícies jateadas, pela técnica de elétrons retroespalhados (BSE - Backscattered), e determinação da porcentagem dos elementos contidos na área avaliada através de microanálise por energia dispersiva com sonda EDX. A metodologia resumiu-se na análise de uma área de 7 $\text{mm}^2$  (2,3x3mm) do centro de um corpo de prova redondo (figura 23c) com aumento de trinta vezes. Nas fotos os elementos com menor peso atômico (Al) aparecem escuros e os de maior (Fe) claros. Após esta etapa foi possível por contagem direta determinar o número de partículas de abrasivo aderidas na superfície. Além disso foi levantado o espectro e quantificados os elementos contidos nessa área. Com isto tentou-se comparar a impregnação na superfície após a 1ª e 4ª séries das etapas de jateamento 1, 3, 5 e 7.

## 6.5 Aspersão Térmica

### 6.5.1 Procedimento de Aspersão

Foi utilizada para deposição dos revestimentos de alumínio uma pistola de aspersão a chama (FS) da marca METCO, modelo 12E (figura 28) de propriedade da empresa Revesteel Ltda de Curitiba-Pr, onde foram confeccionados todos os corpos de prova.



**Figura 28** - Pistola de aspersão a chama com arame

Os parâmetros de processo são relacionados a seguir:

- ⇒ ar comprimido: pressão = 0,55 MPa (80 psi); vazão = 45 m<sup>3</sup>/s
- ⇒ oxigênio: pressão = 0,24 MPa (35 psi); vazão = 40 m<sup>3</sup>/s
- ⇒ acetileno: pressão = 0,11 MPa (16 psi); vazão = 35 m<sup>3</sup>/s
- ⇒ distância entre pistola-peça = 200 mm
- ⇒ diâmetro do arame = 3,2mm (1/8")

A aspersão foi efetuada antes de transcorrer 2 horas após a operação de jateamento, para evitar a oxidação da superfície, segundo a seqüência descrita a seguir:

a) nos corpos de prova. com preaquecimento foi utilizado um maçarico de oxi-acetileno com chama redutora a 120 °C. A temperatura foi medida em 3 pontos nos corpos de prova da figura 23b, usando termômetro digital marca SKF, modelo TMDT 900 com ponteira de termopar tipo K(NiCr/NiAl);

b) deposição de um revestimento de alumínio (metco MAL 12, 99,0%) com espessura de 250 µm, que era conferida durante o serviço com um medidor de espessuras de camadas não

magnéticas marca SKF modelo 179.701;

d) resfriamento dos corpos de prova ao ar até a temperatura ambiente e medições finais da espessura.

## 6.5.2 Preparação e Classificação dos Corpos de prova

Com esta seqüência foram revestidos 5 corpos de prova conforme figura 23c, para ensaio de aderência por tração, após a 1ª e 4ª série de jateamento na etapas 1, 3, 5 e 7. Além disso foram metalizados 5 corpos de prova após a 1ª série das etapas 1 e 5 com preaquecimento do substrato a 120 °C.

Os corpos de prova, conforme figura 23b, para ensaio de aderência por dobramento foram preaquecidos e tratados térmicamente após as 1ªs séries e são definidos a seguir:

⇒ 1 corpo de prova. sem preaquecimento;

⇒ 1 corpo de prova. com preaquecimento de 120 °C;

⇒ 1 corpo de prova. com preaquecimento de 120 °C e tratamento térmico de 400 °C por 1 hora com resfriamento ao forno;

⇒ 1 corpo de prova. com preaquecimento de 250 °C

Todos os corpos de prova. para ensaio de dobramento foram identificados conforme metodologia descrita na introdução deste capítulo, sendo que a ultima letra representa:

S = sem preaquecimento;

P = preaquecimento de 120 °C;

Q = preaquecimento de 120 °C e tratamento térmico posterior;

R = preaquecimento de 250 °C.

## 6.6 Ensaio de Aderência por Tração

### 6.6.1 Procedimentos de Colagem e Tração

Foram ensaiados 5 corpos de prova para cada situação conforme a norma ASTM C-633. A seqüência de preparação dos cps foi a seguinte:

a) limpeza das superfícies a serem aderidas com um desengraxante (tricloroetileno);

b) colocação do adesivo epóxi Epon 907 em ambas as superfícies (do corpo de prova e

do corpo de extração);

c) colocação dos corpos de prova no dispositivo de fixação (figura 29). O controle da pressão de aperto das duas peças era feito pela deformação da mola até um valor pré-definido, de modo a dar uma força de  $\sim 130$  N que dividida pela área dos cps. fornecia uma tensão da ordem de 0,2 MPa.

d) o conjunto (dispositivo e corpo de prova) era mantido a temperatura ambiente por 24 h com o adesivo Epon 907.

e) efetuada a tração com velocidade de deslocamento das garras de  $1,66 \times 10^{-5}$  m/s. A força era registrada num ploter acoplado a uma célula de carga. Como resultado tinha-se a carga necessária para romper o revestimento;

f) após rompido os corpos de prova, as duas metades eram inspecionadas visualmente para determinar o tipo de falha.

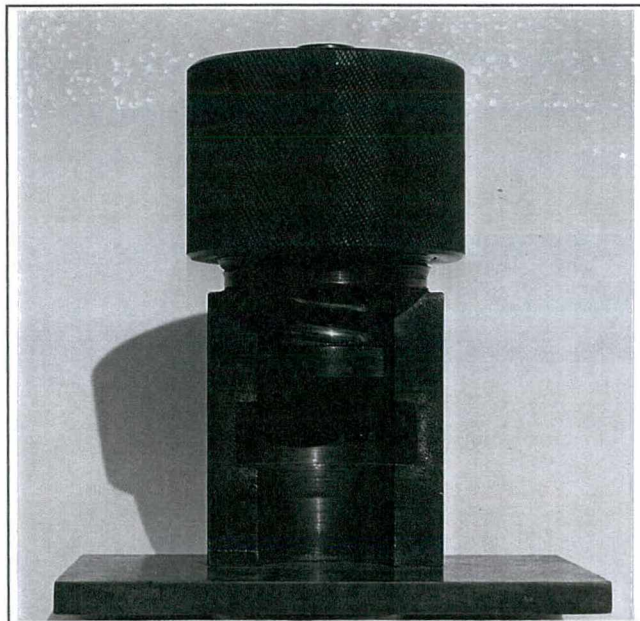


Figura 29 - Dispositivo de colagem dos corpos de prova.

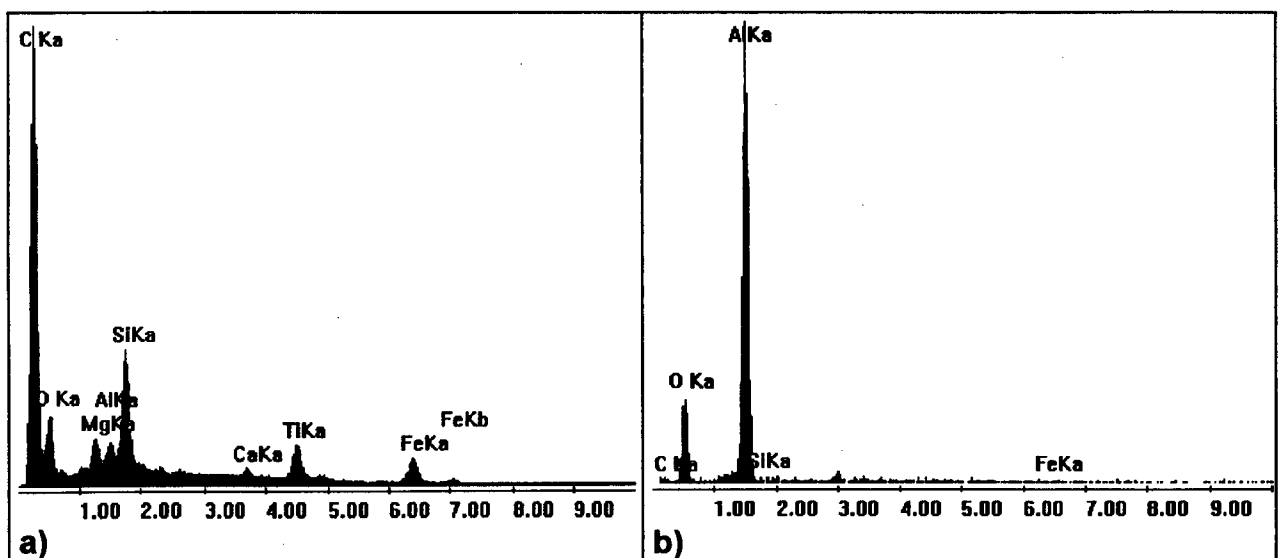
### 6.6.2 Controle da Espessura dos Revestimentos

Esta foi uma característica resultante do processo que procurou-se manter constante. Entretanto pela deposição ser realizada manualmente ocorreu alguma variação nas espessuras dos revestimentos depositados, mas sempre mantendo valores acima de  $250 \mu\text{m}$ . Este limite mínimo foi o escolhido por ser na prática economicamente viável e suficientemente eficaz como barreira

de proteção contra corrosão [27, 48, 54]. Além disso essa espessura elimina a possibilidade de passagem do adesivo (Epon 907) até o substrato como foi comprovado pelo MEV, que não detectou a presença de carbono na interface revestimento/substrato após o ensaio de tração, nos corpos de prova que apresentaram mínima e máxima aderência. A figura 30 mostra o espectro do revestimento de alumínio retirada pelo corpo de extração após o ensaio de tração. A tabela 16 traz os valores médios de 5 medições de espessura efetuadas nos corpos de prova ensaiados por tração, sendo as medições individuais apresentadas no anexo 1. Observa-se que os valores médios situaram-se entre 250 a 300  $\mu\text{m}$ .

**Tabela 16 - Espessura média [ $\mu\text{m}$ ] dos corpos de prova ensaiados por tração**

Etapas	Corpos de Prova				
	1	2	3	4	5
AA1-1S	275	278	283	291	288
AA1-1P	305	325	312	292	275
AA1-4S	290	274	288	276	273
AA2-1S	286	277	278	271	290
AA2-4S	296	294	302	272	278
AS1-1S	275	258	271	275	269
AS1-1P	302	292	292	310	305
AS1-4S	284	271	278	285	279
AS2-1S	284	275	275	300	285
AS2-4S	296	297	299	291	301



**Figura 30 - Espectro para constatação da passagem de adesivo: a) adesivo; b) revestimento de alumínio retirado pelo corpo de extração.**



## 6.7 Ensaio de Aderência por Dobramento

Estes ensaios foram efetuados em corpos de prova representados na figura 23b buscando-se uma alternativa mais simples ao ensaio de tração e sem uso de adesivos para avaliação da aderência do revestimento de alumínio.

Como relatado na revisão bibliográfica (item 5.3.2) as normas específicas para ensaio de dobramento em revestimentos depositados por aspersão térmica restringem a espessura da chapa em 1,25 mm. Entretanto esta espessura é crítica quando se trabalha com preaquecimento na faixa de 250 °C, pois podem ocorrer empenamentos, sendo inclusive recomendado pela norma Petrobras N-2568 não preaquecer substratos com espessuras inferiores a 4 mm. Nesses ensaios adotou-se chapas com espessuras de 9,5 mm para evitar problemas de empenamento e também por terem espessuras mais próximas daquelas utilizadas em equipamentos e instalações sujeitas a revestimentos por aspersão térmica.

Por outro lado, como as normas citadas não apresentam a correlação entre o aumento do diâmetro do cutelo e a espessura do revestimento seguiu-se os parâmetros adotados pela norma ABNT NBR-6153, que é para ensaios de dobramento em geral de materiais metálicos. Assim sendo as condições de ensaio adotadas foram:

- ⇒ velocidade de avanço do cutelo =  $3,3 \times 10^{-5}$  m/s;
- ⇒ diâmetro do cutelo = 30 mm;
- ⇒ diâmetro dos apoios = 50 mm;
- ⇒ distância entre apoios = 130 mm;
- ⇒ dimensões dos corpos de prova.: espessura = 9,5 mm ( $3/8''$ ); largura = 25 mm;  
comprimento = 200 mm
- ⇒ espessura dos revestimentos de alumínio = inseridas nas tabelas do anexo 1.

Os ensaios foram feitos na sequência definida abaixo:

- a) colocação dos corpos de prova com a superfície metalizada em contato com os apoios;
- b) aproximação do cutelo com a velocidade determinada no centro dos apoios;
- c) os corpos de prova eram retirados assim que surgiam trincas, monitoradas visualmente com a ajuda de um espelho, e os ângulos medidos com um goniômetro;
- d) Se o revestimento não se destacasse antes o ensaio era efetuado até o dobramento a 180°.

## VII RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1 Análise do Abrasivo

#### 7.1.1 Análise Granulométrica

Para avaliar o desgaste do abrasivo durante o uso, foram realizadas análises granulométricas utilizando a metodologia apresentada no item 6.3.2 deste trabalho. Primeiramente foi feito o peneiramento do abrasivo como fornecido, e comparados os resultados com a classificação apresentada pela norma ANSI B74-12, sendo que os dados da tabela 17 representam valores obtidos no peneiramento das amostras retiradas no início da 1ª série de todas as etapas de jateamento.

Pela tabela 17 verifica-se que a granulometria indicada pelo fabricante do abrasivo Alundum 38A enquadra-se dentro da norma, sendo mínima a discrepância entre os dados de peneiramento das amostras utilizadas para jateamento nas chapas com graus "A" e "C" de corrosão.

Quanto ao Sinterball verifica-se que há grande variação nos resultados de peneiramento de óxidos da mesma granulometria. Por exemplo os óxidos de grana 1220 usados para jateamento dos corpos de prova com grau de corrosão "A" (etapa AS1) e "C" (etapa CS1) apresentam diferentes distribuições granulométricas, onde a primeira poderia ser classificada como grana 14 e a segunda como grana 20. No caso dos abrasivos de grana 2040 houve menor dispersão dos resultados e sua distribuição enquadra-se na especificada pela norma ANSI B 74-12. Considerando a metodologia de classificação do fabricante, que diz estar a granulometria contida entre as peneiras 1220 para o Sinterball 1220 e 2040 para o Sinterball 2040, as amostras apresentam-se dentro do especificado.

Os resultados de peneiramento das amostras de abrasivos estão reunidos nas tabelas do anexo 2, onde constam os resultados para cada superfície jateada nas séries de jateamento com Alundum e Sinterball.

Para facilidade de análise as figuras 31 a 33 mostram um resumo dos dados de peneiramento. Na figura 31 é feita a comparação entre o abrasivo Alundum 38A novo e após a 4ª série de jateamento nas chapas com graus A e C de corrosão, e na figura 32 vê-se a mesma comparação para o abrasivo Sinterball. Finalmente na figura 33 é feita a comparação do desgaste

sofrido pelos abrasivos Alundum 38A e Sinterball após 4 séries de jateamento.

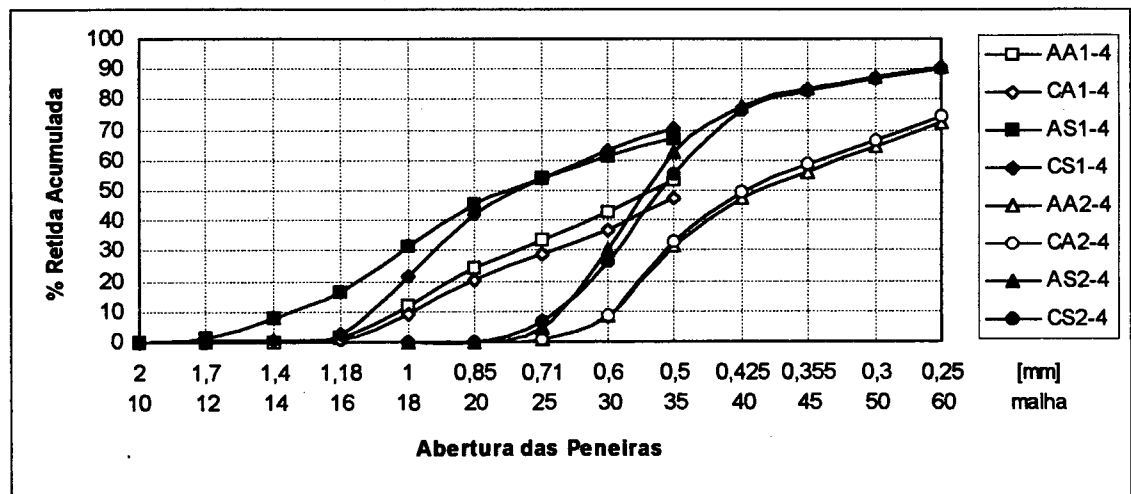
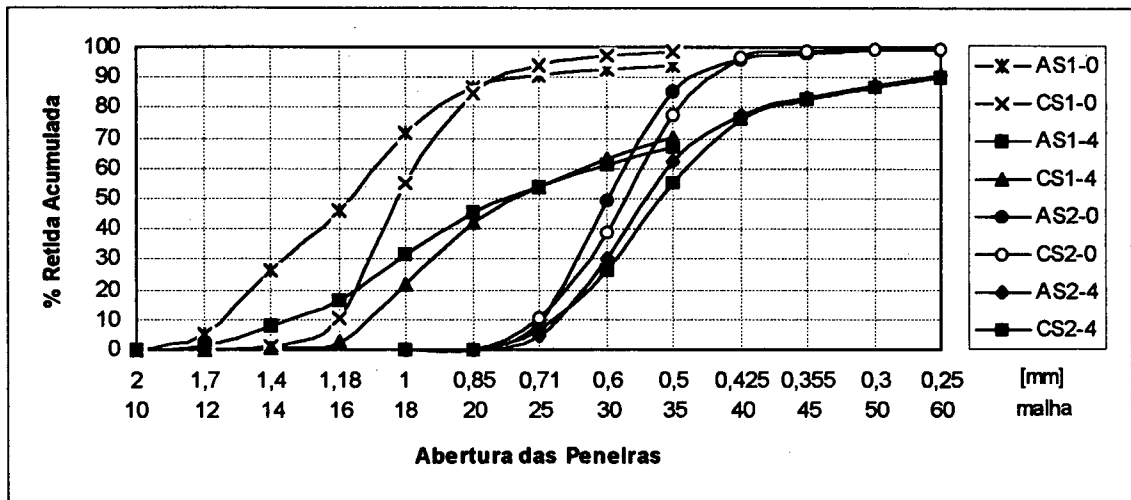
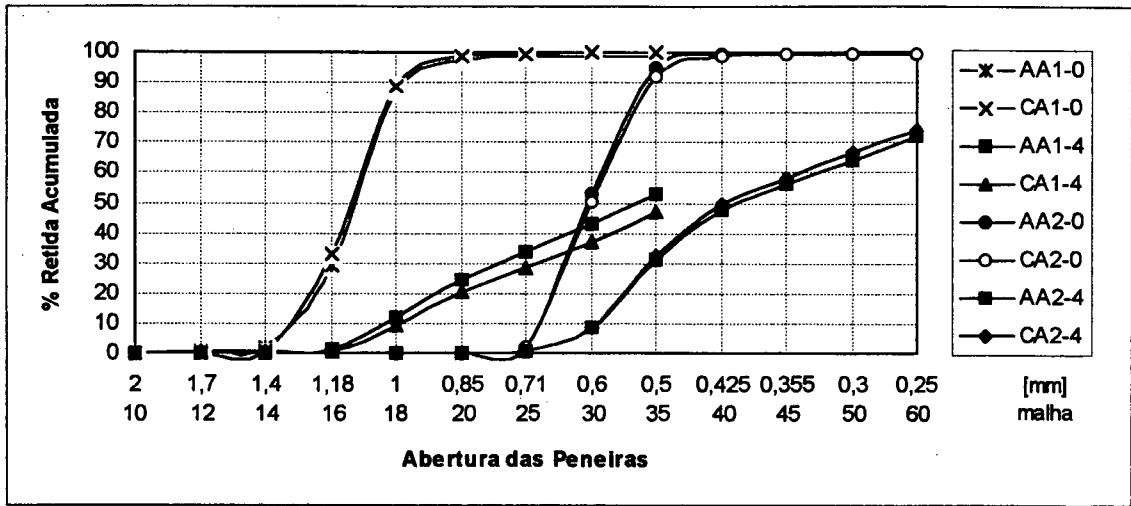
Nota-se para o Alundum (figura 31) que após a 4ª série houve uma retenção acumulada até a peneira de malha 35 (0,5 mm) de 50 % do abrasivo, portanto a quantidade de finos (resíduo) é de ~50 %. A quantidade de finos gerados é praticamente a mesma quando jateadas, com grana 16, as superfícies de graus A e C de corrosão, o que indica que não há influência do grau de corrosão da superfície no desgaste do abrasivo. Quanto aos abrasivos de grana 30 a mesma figura mostra que houve após a 4ª série uma geração de finos da ordem de ~30 %, isto é, existem ~70 % da amostra com partículas de tamanho superiores a 0,25 mm. Também aqui não se verificou variação do desgaste com a modificação do grau inicial de corrosão da superfície. Para o Sinterball 1220 a quantidade de finos gerados no jateamento de chapas com graus de corrosão “A” e “C” é de ~30 %, e para a grana 2040 este valor é de ~10 % (figura 32).

Pela figura 33 pode-se analisar a influência do tamanho das partículas no desgaste sofrido pelo abrasivo. Verifica-se que os abrasivos Alundum 38A e Sinterball de grana 30 após a 4ª série de jateamento apresentaram uma quantidade de finos ~20 % menor que os abrasivos de grana 16. A explicação para este fato está na maior energia cinética adquirida pelas partículas maiores, que ao chocarem-se com o substrato fragmentam-se mais facilmente.

Ainda na figura 33 o maior desgaste sofrido pelo abrasivo Alundum 38A em relação ao Sinterball é de ~20 % nas duas granulometrias analisadas. Isto foi devido a utilização de diferentes parâmetros de jateamento, ou seja, para o Sinterball a pressão e ângulo foram menores, e a distância bocal/substrato maior que aqueles para o Alundum 38A.

**Tabela 17 - Comparação da distribuição granulométrica dos abrasivos novos com a classificação da norma ANSI B 74-12.**

Grana	Retenção 0%		Retenção Máxima		Retenção Mínima		Retenção Mín. Acumulada		% passante	
	Peneiras		Peneiras	%	Peneiras	%	Peneiras	%	pen.	%
<b>Classificação da norma ANSI</b>										
16	8		14	25	16	35	16 e 18	70	25	< 5
30	16		20	30	30	45	30 e 35	60	45	< 5
<b>Amostras de Alundum 38A usadas em chapas com grau de corrosão “A”</b>										
16	8		14	2,22	16	27,06	16 e 18	85,02	25	0,59
30	16		20	0,32	30	52,38	30 e 35	94,48	45	0,1
<b>Amostras de Alundum 38A usadas em chapas com grau de corrosão “C”</b>										
16	8		14	0,52	16	32,55	16 e 18	88,55	25	0,51
30	16		20	0,13	30	50,13	30 e 35	91,98	45	0,27
<b>Amostras de Sinterball SBA usadas em chapas com grau de corrosão “A”</b>										
1220	8		14	26,01	16	20,00	16 e 18	45,62	25	8,79
2040	16		20	0,10	30	49,17	30 e 35	85,27	45	1,70
<b>Amostras de Sinterball SBA usadas em chapas com grau de corrosão “C”</b>										
1220	8		14	1,06	16	9,32	16 e 18	54,41	25	5,2
2040	16		20	0,32	30	38,37	30 e 35	77,47	45	1,15



### 7.1.2 Contaminação por Ferro e Silício nos Abrasivos

Esta análise permitiu comprovar os níveis de contaminação de ferro e silício dos abrasivos novos e verificar a variação após quatro utilizações.

Na tabela 18 estão inseridos os percentuais de ferro e silício dos boletins técnicos dos fabricantes e os obtidos pela Central de Análises do Departamento de Química da UFSC [74] em quatro amostras. Verifica-se que para o Alundum os percentuais de ferro estão muito próximos, e os do silício apresentam-se maiores nas análises das amostras fornecidas. Para o Sinterball o percentual de ferro detectado no laboratório foi inferior ao do boletim técnico e o do silício superior.

Para melhor comparação dos resultados de contaminação as quantidades absolutas dos elementos Ferro e Silício foram agrupadas nas tabelas 19 e 20 em gramas por 10 kg de abrasivos. Ainda nessas tabelas estão assinaladas as diferenças não significativas devido a margem de erro da ordem de 5 %.

O Alundum (tabela 19) apresenta maiores diferenças entre as amostras iniciais e finais dos abrasivos de menor granulometria, utilizados em chapas com graus A e C de corrosão (etapas AA2 e CA2). Essas variações se verificam tanto para o elemento ferro como para o silício.

No caso do Sinterball (tabela 20), apesar dos resultados fornecerem diferenças não significativas para o silício, também percebe-se uma tendência a maior remoção de ferro com as granulometrias menores (etapas AS2 e CS2).

Como visto as granulometrias menores, para os dois abrasivos, removem maior quantidade de ferro da superfície. Além disso o Sinterball de grana 2040 apresenta maiores teores de ferro que o Alundum de grana 30. Estas comparações reforçam a idéia do maior poder de remoção de material quando utilizadas granulometrias pequenas, em função do maior número de partículas que atingem o substrato por unidade de tempo. Com relação as diferenças entre os dois abrasivos a explicação para a maior remoção de ferro com Sinterball estaria associado ao menor ângulo de jateamento que favorece o "lascamento" de material da superfície, mesmo utilizando menores pressões. Por outro lado os abrasivos que removem mais material também se contaminam em maior proporção com as reutilizações.

**Tabela 18 - Níveis de contaminação de Ferro e Silício dos abrasivos novos Alundum e Sinterball.**

Elemento	Alundum		Sinterball	
	Boletim Técnico	Central Análises*	Boletim Técnico	Central Análises*
% Ferro	0,02 ± 0,001	0,027 ± 0,001	13,0 ± 0,65	9,66 ± 0,48
% Silício	0,1 ± 0,005	0,80 ± 0,04	4,21 ± 0,21	6,32 ± 0,32

\* Média de quatro análises efetuadas em amostra coletadas das etapas de jateamento.

**Tabela 19 - Contaminação de Ferro e Silício em 10 kg do abrasivo Alundum 38A[74]**

Amostras	Etapas			
	AA1	CA1	AA2	CA2
	<b>Ferro</b>			
Inicial	2,9 ± 0,14	2,3 ± 0,11	3,5 ± 0,17	2,4 ± 0,12
Final	15 ± 0,7	20 ± 1,0	34 ± 1,7	23 ± 1,15
Final - Inicial	12,1	17,7	30,5	20,6
	<b>Silício</b>			
Inicial	115 ± 5,7	33 ± 1,6	105 ± 5,2	70 ± 3,5
Final	120 ± 6,0	95 ± 4,7	171 ± 8,5	106 ± 5,3
Final - Inicial	5*	62	66	36

\* Valores não significativos.

**Tabela 20 - Contaminação de Ferro e Silício em 10 kg do abrasivo Sinterball[74]**

Amostras	Etapas			
	AS1	CS1	AS2	CS2
	<b>Ferro</b>			
Inicial	779 ± 39	1030 ± 51	965 ± 48	1091 ± 55
Final	759 ± 38	1047 ± 52	1117 ± 56	1163 ± 58
Final - Inicial	-20*	17*	152	72
	<b>Silício</b>			
Inicial	993 ± 50	505 ± 25	493 ± 24	540 ± 27
Final	1044 ± 52	521 ± 26	504 ± 25	537 ± 26
Final - Inicial	51*	16*	11*	-3*

\* Valores não significativos.

### 7.1.3 Análise dos Constituintes e da Forma

#### a) Análise dos Constituintes

Através da difração de raios-X constatou-se que o maior componente dos abrasivos Alundum 38A e Sinterball está na forma de córindon ( $\alpha$   $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e o silício na forma de quartzo ( $\alpha$   $\text{SiO}_2$ ), de modo que não existe o Si na forma hidratada (mica).

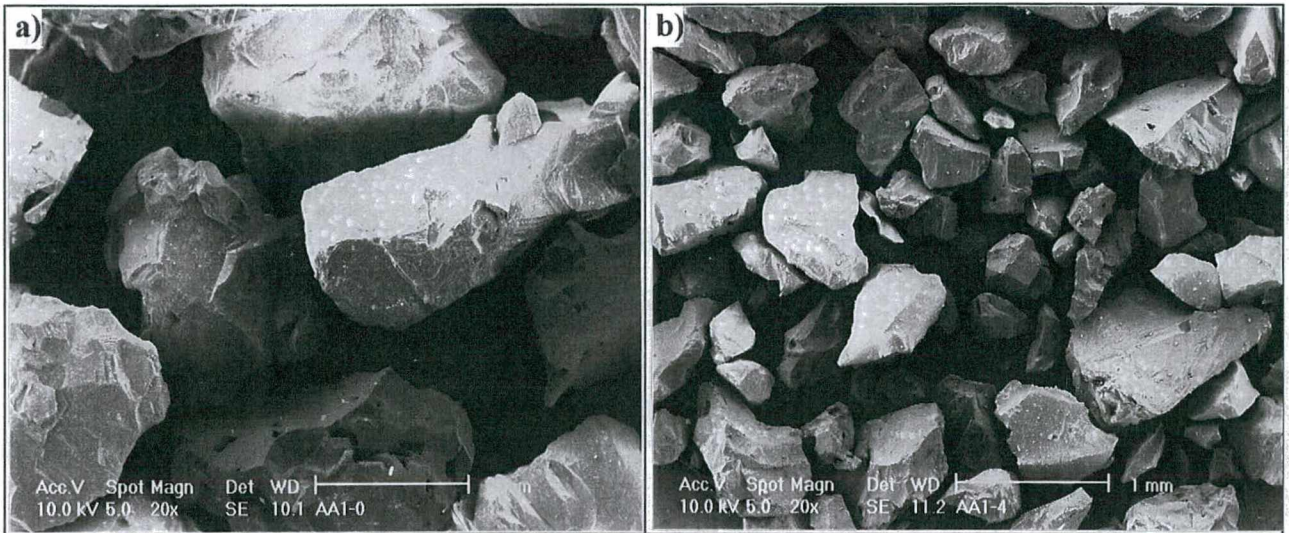
#### b) Análise da Forma

Através dos procedimentos descritos no item 6.4.4.b foram fotografadas as amostras das duas granulometrias dos abrasivos para avaliar sua morfologia inicial e possível variação após a 4ª série de jateamento.

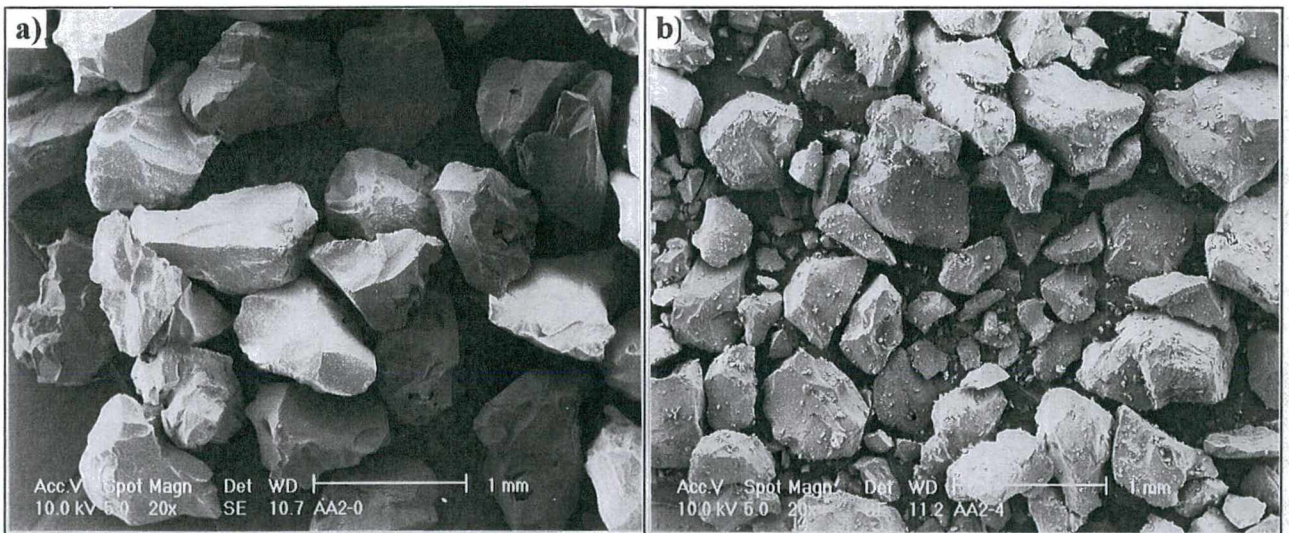
Nas figuras 34 e 35 verifica-se que a forma das partículas do abrasivo Alundum é angular, e que não há variação apreciável da mesma até a 4ª série de jateamento, apesar de se perceber um arredondamento de suas arestas.

No caso do Sinterball 1220 novo verifica-se (figura 36) a forma angular tendendo para a arredondada. Para a granulometria menor (grana 2040) tem-se a impressão que as partículas foram obtidas pela trituração de abrasivos esféricos (figura 37). Não foram perceptíveis variações com as séries de jateamento para as duas granulometrias.

Verifica-se também maior quantidade de finos no abrasivo Alundum (figuras 34 e 35), após quatro utilizações, em comparação ao Sinterball (figuras 36 e 37). Esta constatação ratifica os dados de peneiramento onde o abrasivo Alundum apresenta maior desgaste.

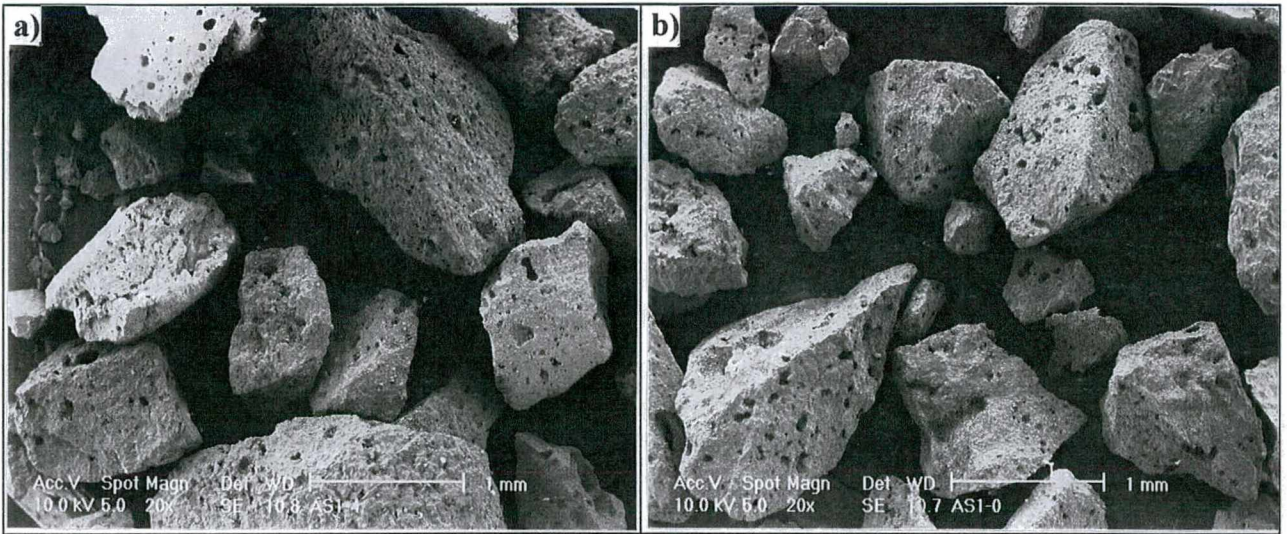


**Figura 34** - Forma das partículas do abrasivo Alundum 38A, grana 16: a) abrasivo novo; b)abrasivo após 4 utilizações.

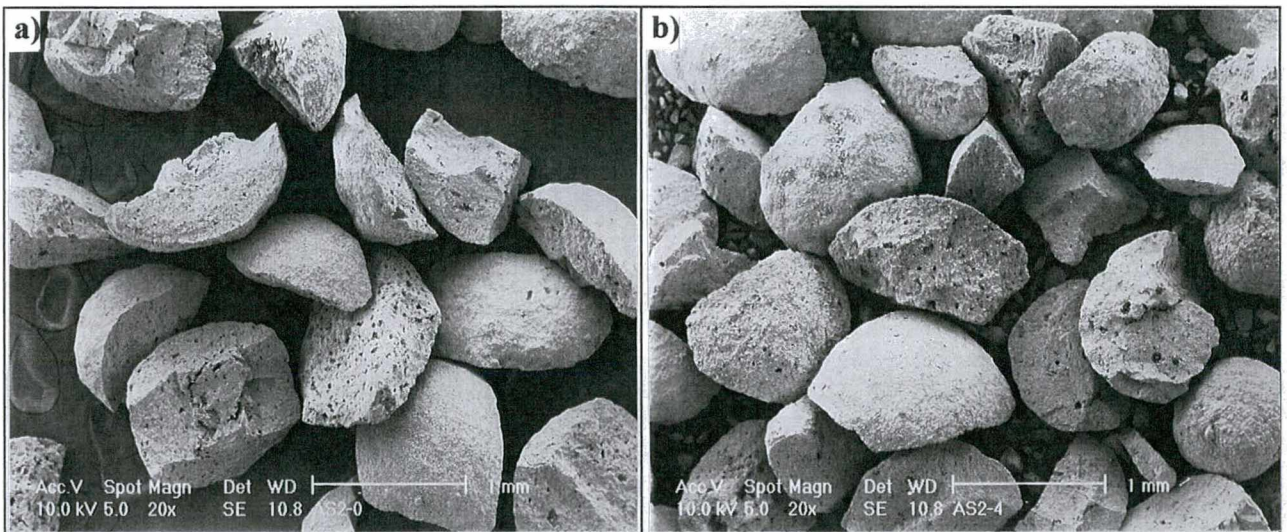


**Figura 35** - Forma das partículas do abrasivo Alundum 38A, grana 30: a) abrasivo novo; b)abrasivo após 4 utilizações.





**Figura 36** - Forma das partículas do abrasivo Sinterbal, grana 1220: a) abrasivo novo; b) abrasivo após a 4 utilizações.



**Figura 37** - Forma das partículas do abrasivo Sinterbal, grana 2040: a) abrasivo novo; b) abrasivo após a 4 utilizações.

## 7.2 Análise da Superfície Jateada

### 7.2.1 Rugosidade

Procurou-se detectar a variação ocorrida na rugosidade com o uso repetido dos abrasivos Alundum 38A e Sinterball. No anexo 3 estão registrados os valores de rugosidade medidos após cada série de jateamento de todas as etapas. Para facilitar a análise foram inseridos na tabela 21 e figuras 38 a 40 os valores médios e desvios padrões de  $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  e  $S_m$ .

Verifica-se pela tabela 21 e figura 39 a menor variação da rugosidade  $R_y$  com abrasivos Alundum de grana 30 em relação a grana 16, sendo a variação depois da 4ª série em relação a 1ª de 23 % para a grana 30 e 30 % para a grana 16. Estes valores são similares tanto para superfícies com grau A como C de corrosão. Por outro lado a mesma análise para o Sinterball demonstrou variação de ~20 % em todas as etapas, com exceção da etapa 4 (chapas com grau de corrosão “C” jateadas com grana 2040) que apresentou decréscimo de ~9 % (tabela 21 e figura 39).

Os valores do parâmetro  $S_m$  (tabela 21) apresentaram variação semelhante da 1ª a 4ª série em quase todas as etapas de jateamento, com exceção das etapas AA1 e AS1. Apesar desta variação os valores medidos estão dentro de uma faixa menor que 300  $\mu\text{m}$ , satisfazendo a recomendação da literatura.

As superfícies jateadas com abrasivos de menor granulometria tendem a apresentar níveis de rugosidade mais próximos, com estabilização após a 2ª série de jateamento, para os dois abrasivos nas chapas com graus A e C de corrosão. Além disso a utilização de condições de jateamento mais brandas (Sinterball em relação ao Alundum) diminui a diferença entre as rugosidades obtidas pela alteração do tamanho de grão das partículas. A tendência a estabilização e níveis de rugosidade mais próximos apresentado pelas superfícies jateadas com abrasivos menores é explicada pelo menor desgaste e variação da curva de distribuição granulométrica (figura 33).

Vale ressaltar que os três parâmetros verticais ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_y$ ) mantiveram a mesma tendência, indicando que as superfícies jateadas com abrasivos de mesma granulometria apresentam uma rugosidade média ( $R_a$ ) uniforme sem a presença de grandes picos ou vales ( $R_z$ ,  $R_y$ ). Quanto ( $S_m$ ) verifica-se que os valores médios são diferentes para superfícies jateadas com abrasivos Alundum e Sinterball de mesma granulometria, porém os desvios padrões são tais que as faixas se sobrepõem. Com isso pode-se dizer que o espaçamento horizontal não se altera com os parâmetros de jateamento utilizados, mas sim com a granulometria do abrasivo.

Portanto para manter-se uma textura mais uniforme com as séries consecutivas de jateamento é preferível a utilização da granulometria menor (grana 30 em relação a grana 16) e/ou parâmetros mais brandos de jateamento (menores ângulo e pressão e maior distância de jateamento). Menores tamanhos de partículas também favorecem a obtenção de valores de Sm mais baixos, o que por um lado seria favorável a ancoragem mecânica por aumentar a área efetiva do substrato. Porém deve-se tomar cuidados com o decréscimo deste parâmetro que fatalmente acarretaria em patamares indesejáveis para Ra, Rz, Ry.

**Tabela 21** - Média e Desvio Padrão de Ra, Ry, Rz e Sm das séries de jateamento.

Etapas	Séries	Ra [ $\mu\text{m}$ ]		Ry [ $\mu\text{m}$ ]		Rz [ $\mu\text{m}$ ]		Sm [ $\mu\text{m}$ ]	
		X	S	X	S	X	S	X	S
AA1	1	8,61	1,82	102,4	15,3	63,1	7,6	184,5	15,9
	2	7,73	1,46	85,0	11,2	58,0	7,1	-	-
	3	6,50	1,28	73,5	10,2	48,2	5,0	-	-
	4	6,71	0,97	71,8	7,5	52,3	6,5	126,2	7,9
AA2	1	7,22	1,07	78,9	17,8	51,4	7,2	136,4	13,9-
	2	5,86	0,88	64,4	9,3	42,8	5,0	-	-
	3	5,79	1,32	62,3	12,5	41,7	4,3	-	-
	4	5,89	0,95	61,4	6,9	44,5	6,5	123,3	9,1
CA1	1	9,20	1,84	101,4	14,5	59,8	8,1	161,2	23,8
	2	7,81	1,09	89,4	14,4	57,5	8,1		
	3	7,18	1,45	82,0	14,9	51,9	7,8		
	4	6,55	1,28	71,7	15,2	46,3	6,8	148,3	14,8
CA2	1	6,96	1,06	74,3	12,9	52,8	9,4	143,5	18,3
	2	6,09	1,28	69,2	11,6	47,1	5,9		
	3	5,93	1,00	63,3	10,4	42,6	4,7		
	4	5,82	0,86	59,0	7,9	42,4	6,4	134,6	7,6
AS1	1	6,17	1,24	81,3	10,6	50,8	6,1	153,1	8,9
	2	6,33	0,92	70,9	10,3	45,7	5,7	-	-
	3	6,92	1,42	71,9	14,4	44,4	7,8	-	-
	4	5,56	1,08	68,2	9,4	42,6	5,1	145,6	11,1
AS2	1	5,46	0,73	59,1	9,3	41,0	3,2	122,1	4,9
	2	5,43	0,83	58,5	10,7	38,8	4,2	-	-
	3	4,96	1,08	53,6	7,9	37,2	2,9	-	-
	4	4,88	0,68	47,7	4,9	36,5	5,3	111,7	9,1
CS1	1	7,06	1,64	76,8	16,0	49,9	8,7	130,3	20,4
	2	5,75	1,16	67,5	15,1	43,5	8,9		
	3	5,08	1,35	64,0	12,9	39,6	7,1		
	4	6,38	1,41	62,3	11,6	45,1	7,0	120,9	8,2
CS2	1	5,26	0,99	62,4	11,5	38,7	4,4	113,6	5,8
	2	5,40	1,14	60,7	13,4	38,7	4,8		
	3	5,43	1,27	57,4	10,8	37,4	6,0		
	4	5,18	0,80	56,6	8,1	37,1	5,4	120,0	12,9

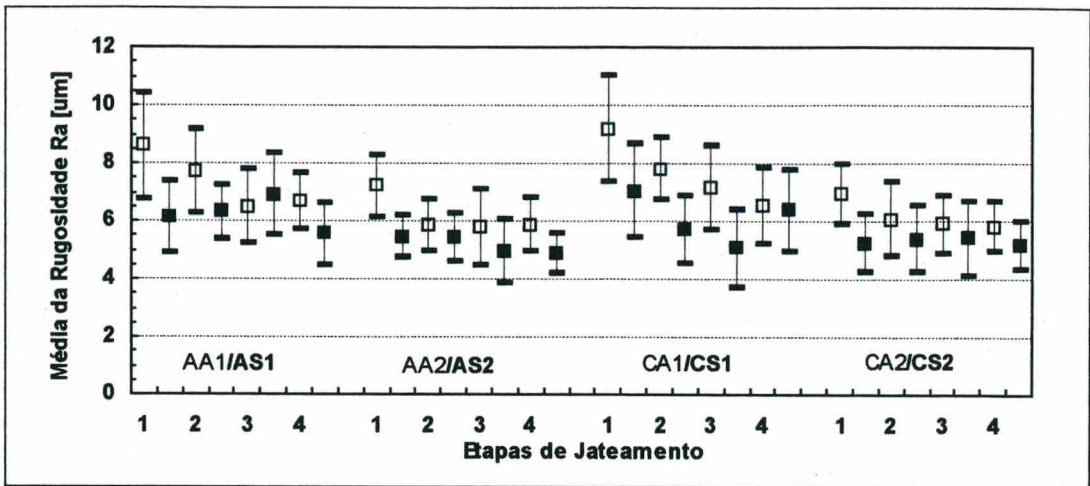


Figura 38 - Médias das Rugosidades (Ra) obtida nas séries de jateamento com óxido de alumínio Alundum 38A (pontos brancos) e Sinterball (pontos pretos).

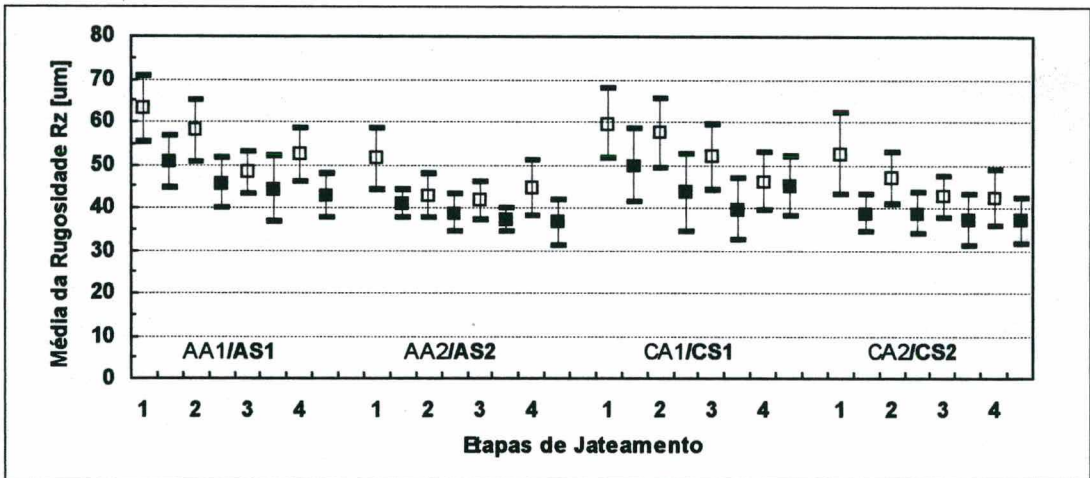


Figura 39 - Média das Rugosidades (Rz) obtidas nas séries de jateamento com óxido de alumínio Alundum 38A (pontos brancos) e Sinterball (pontos pretos).

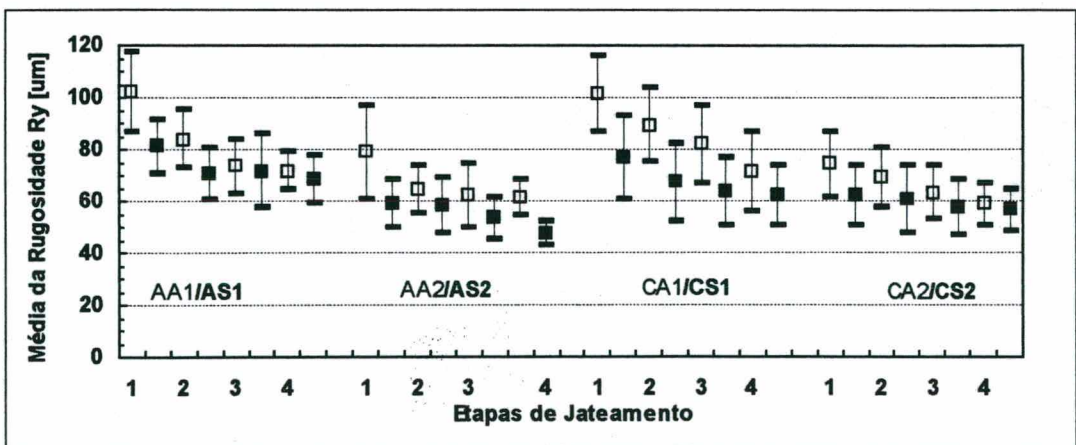


Figura 40 - Média das rugosidades (Ry) obtidas nas séries de jateamento com óxido de alumínio Alundum 38A (pontos brancos) e Sinterball (pontos pretos).

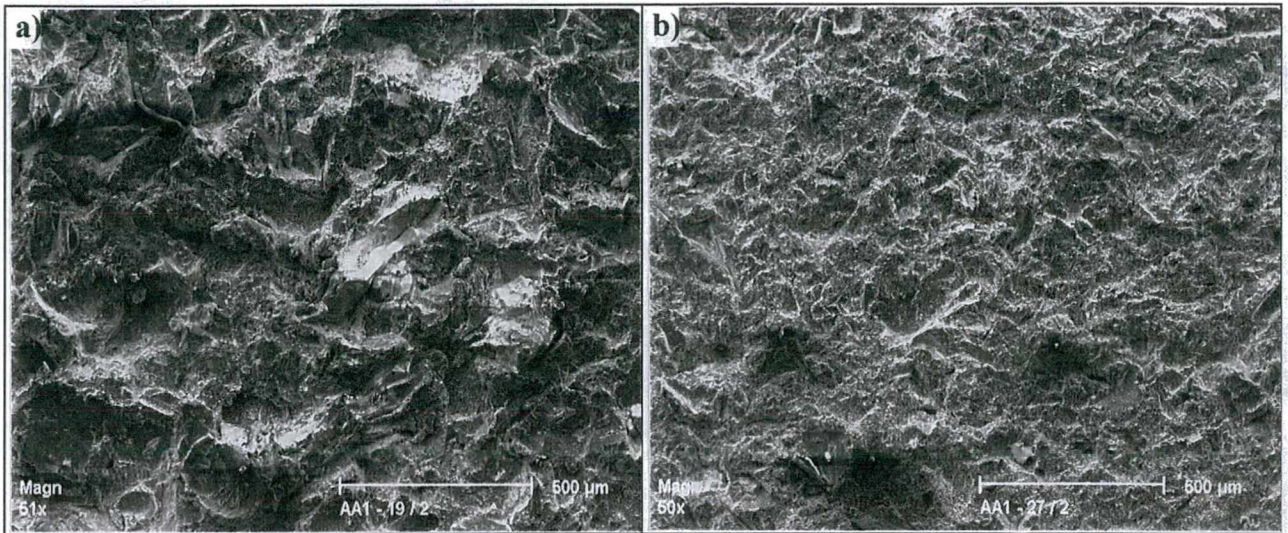
### 7.2.2 Textura da Superfície Jateada.

A textura da superfície é outra característica detectada através da microscopia eletrônica de varredura. As áreas centrais dos corpos de prova apresentadas na figura 23c foram fotografadas com o intuito de comparar o relevo da superfície após a 4ª série de jateamento em relação ao da 1ª série utilizando as duas granulometrias dos dois abrasivos. As figuras 41 a 44, mostram as variações ocorridas.

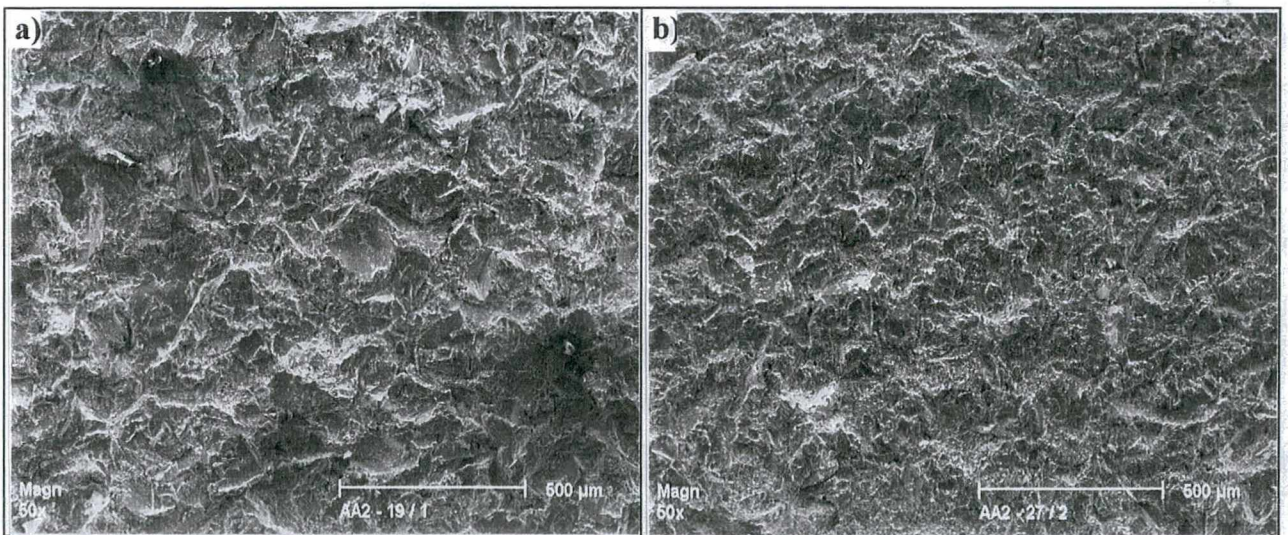
Constata-se visualmente e pelos valores dos desvios padrões da rugosidade  $R_y$  (tabela 26) que as superfícies jateadas com abrasivo Alundum 38A novo de grana 16 apresentam uma maior irregularidade em relação a mesma superfície da 4ª série (figura 41). Com relação aos abrasivos de grana 30 o relevo é menos irregular se comparado aos de grana 16, principalmente da 1ª utilização, além de apresentar menor variação entre a 1ª e 4ª série de jateamento (figura 42).

Quanto ao abrasivo Sinterball verifica-se que há menor agressão da superfície jateada com grana 2040, mas não é perceptível a diferença entre a 1ª e 4ª série de jateamento (figuras 43 e 44) para as duas granulometrias individualmente. Outro aspecto apresentado pelas superfícies jateadas com Sinterball é a ocorrência de sulcos com direções preferenciais, que são aquelas do bocal de jateamento.

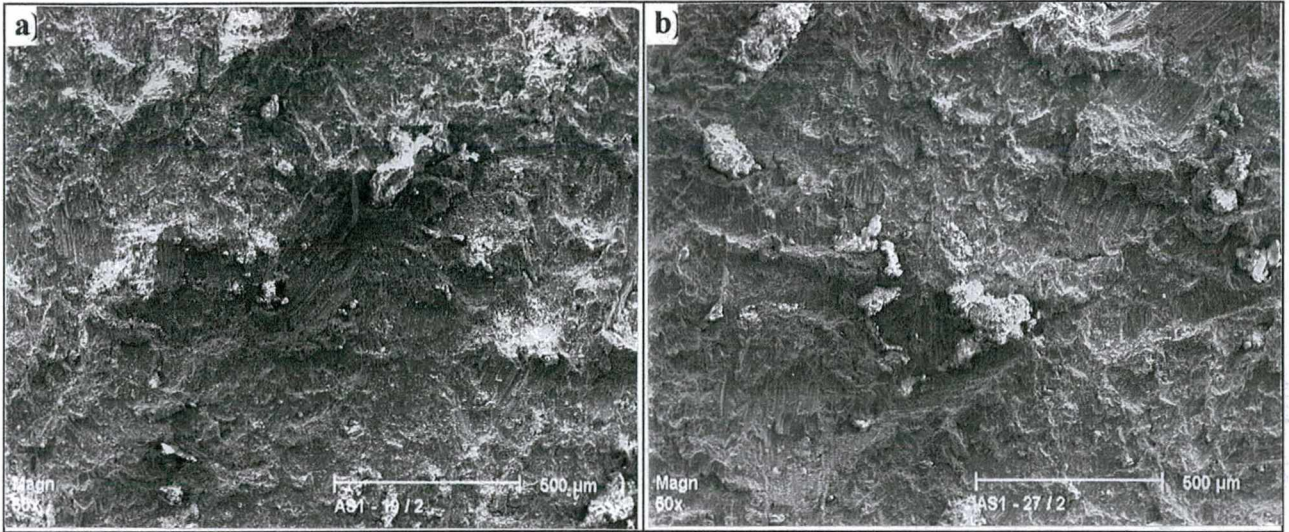
Comparando as superfícies verifica-se maior agressão daquelas jateadas com abrasivos alundum 38A devido as maiores pressões e ângulos e menores distância de jateamento. Outra diferença apresentada é a forma aleatória do relevo da superfície jateada com Alundum em relação as direções preferenciais das jateadas com Sinterball (figuras 41a e 43a). Na figura 45 a e b visualiza-se a presença de uma partícula de abrasivo e o relevo característico das superfícies jateadas, respectivamente, com alundum novo de grana 16 e sinterball 1220. A superfície jateada com alundum apresenta-se com maior irregularidade, caracterizada pelos maiores picos e vales ( $R_y$  da tabela 21).



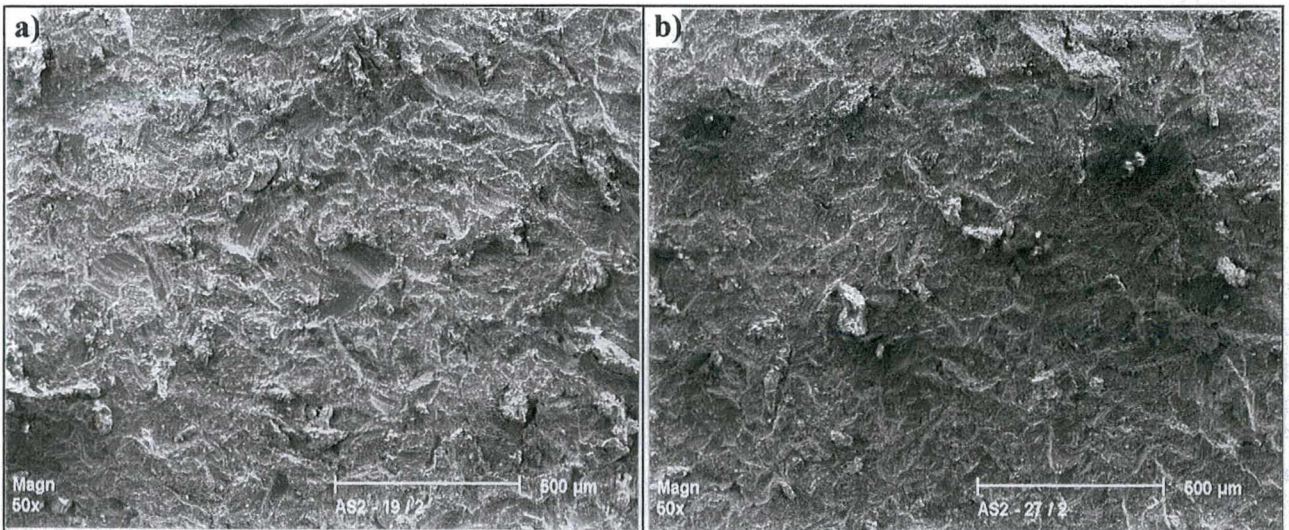
**Figura 41** - Textura das superfícies jateadas c/ abrasivo Alundum 38A de grana 16.  
 a) abrasivo novo (AA1-0); b) abrasivo reutilizado (AA1-4)



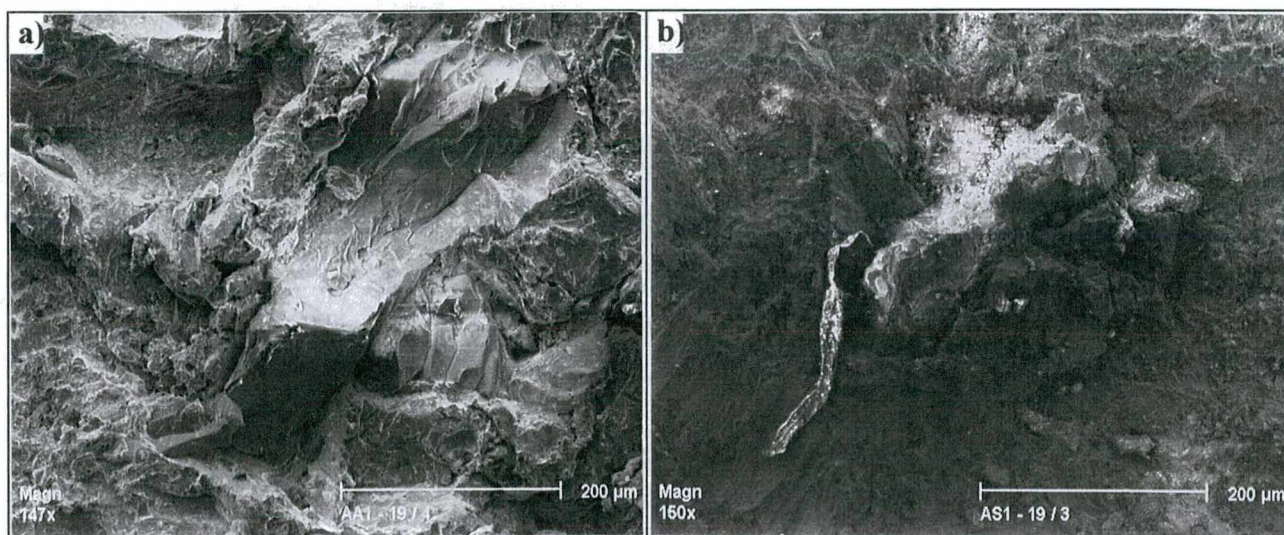
**Figura 42** - Textura das superfícies jateadas c/ abrasivo Alundum 38A de grana 30.  
 a) abrasivo novo (AA2-0); b) abrasivo reutilizado (AA2-4).



**Figura 43-** Textura das superfícies jateadas com abrasivo Sinterball de grana 1220.  
 a) abrasivo novo (AS1-0); b) abrasivo reutilizado (AS1-4)



**Figura 44 -** Textura das superfícies jateadas com abrasivo Sinterball de grana 2040.  
 a) abrasivo novo (AS2-0); b) abrasivo reutilizado (AS2-4)



**Figura 45** -Partículas de abrasivo aderidas na superfície jateada com alundum de grana 16 (a) e sinterball 1220 (b).

### 7.2.3 Impregnação por Partículas de Abrasivo

Através de análise por MEV verificou-se a impregnação da superfície com as partículas de abrasivos quando das operações de jateamento.

Nas áreas centrais dos corpos de prova foram feitos os espectros e quantificados os elementos presentes através de microscopia eletrônica de varredura. Nas figuras 46 a 49 podemos fazer uma comparação visual e analisar o espectro dos elementos contidos nas superfícies jateadas com os abrasivos Alundum 38A e Sinterball.

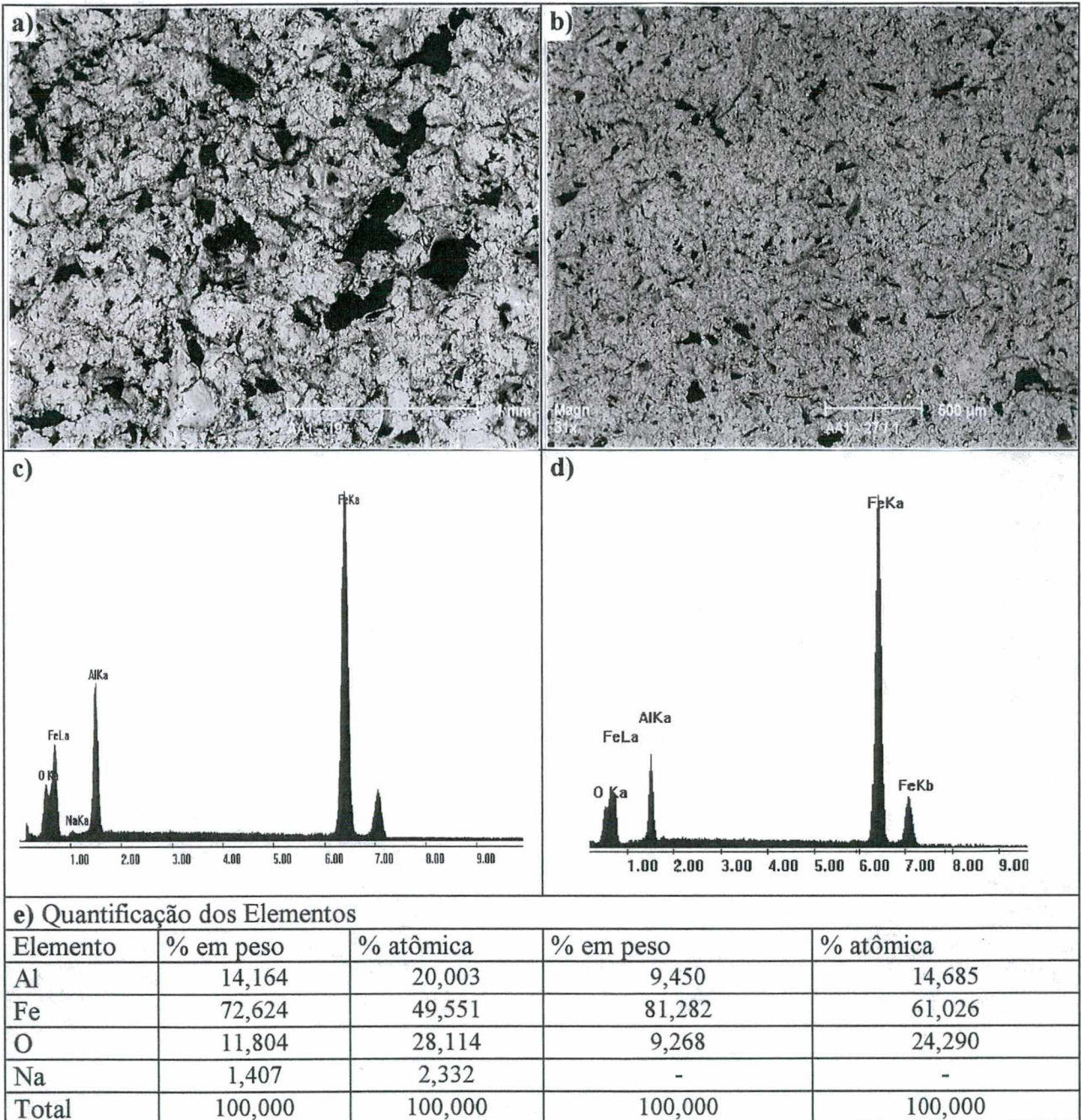
Analisando-se os espectros das figuras 46 e 47 verifica-se um pequeno aumento do percentual de alumínio na superfície jateadas com Alundum novo nas granas 16 e 30, demonstrando uma tendência a maior impregnação. Pelas figuras 48 e 49 pode-se fazer a mesma comparação das superfícies jateadas com Sinterball, as quais também apresentam maior impregnação quando utilizados abrasivos novos, além de acusar a presença de silício em todas as amostras.

Verifica-se também visualmente e através do espectro que o abrasivo Sinterball impregna um pouco mais o substrato que o Alundum 38A. As quantificações do espectro apresentam diferenças muito pequenas entre as superfícies jateadas com Alundum e Sinterball, sendo excessão aquelas jateadas com os abrasivos novos de granulometria 16 e 1220. Estas diferenças aumentariam se as condições de jateamento para o Sinterball fossem mais intensas (maiores pressões e ângulos, menores distâncias bocal/substrato).

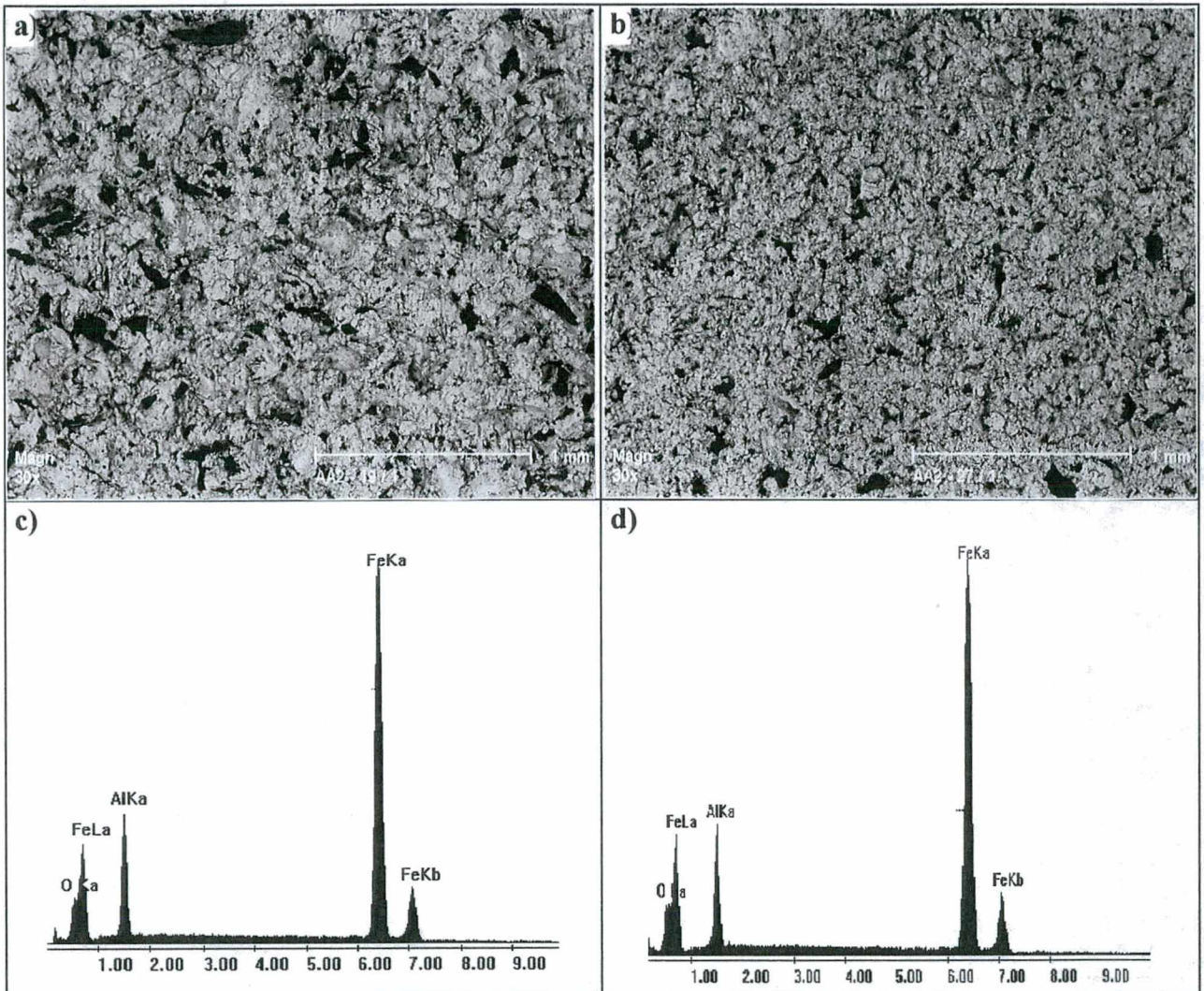


Na quantificação direta sobre as fotos mediante contagem dos pontos (figuras 46 e 47) os resultados para o abrasivo Alundum 38A foram os seguintes: com a grana 16 houve um decréscimo da quantidade de área ocupada (contaminação) de 28 % para 16 % da 1ª a 4ª utilização; com a grana 30 ocorreu o inverso, ou seja a contaminação aumentou de 19 % para 31 %. A mesma análise feita para o Sinterball (figura 48 e 49) apresentou contaminação decrescente, da 1ª para a 4ª utilização, nas duas granulometrias. Para a grana 1220 a variação foi de 33 % para 28 % e de 35 % para 18 % para a grana 2040. Com excessão da superfície jateada com Alundum 38A de grana 30, os resultados desta análise foram coerentes com aqueles fornecidos pela quantificação do espectro no MEV. Isto é, os abrasivos novos tendem a impregnar mais acentuadamente a superfície.

A maior impregnação com abrasivos novos, sobretudo de maior granulometria, nas superfícies jateadas poderia ser explicada pela fragmentação e arredondamento das arestas com as reutilizações. Com os abrasivos novos as partículas chegariam ao substrato com maior energia cinética incrustrando na superfície e fragmentando-se mais acentuadamente. Com as reutilizações e conseqüente diminuição do tamanho médio, devido ao desgaste, as mesmas tendem a perder energia cinética aderindo com menor rigor na superfície. O arredondamento das arestas é um fator de menor influência, mas não completamente desprezível, pois partículas arredondadas possuem menor poder de abrasão que dificultaria sua incrustação no substrato.



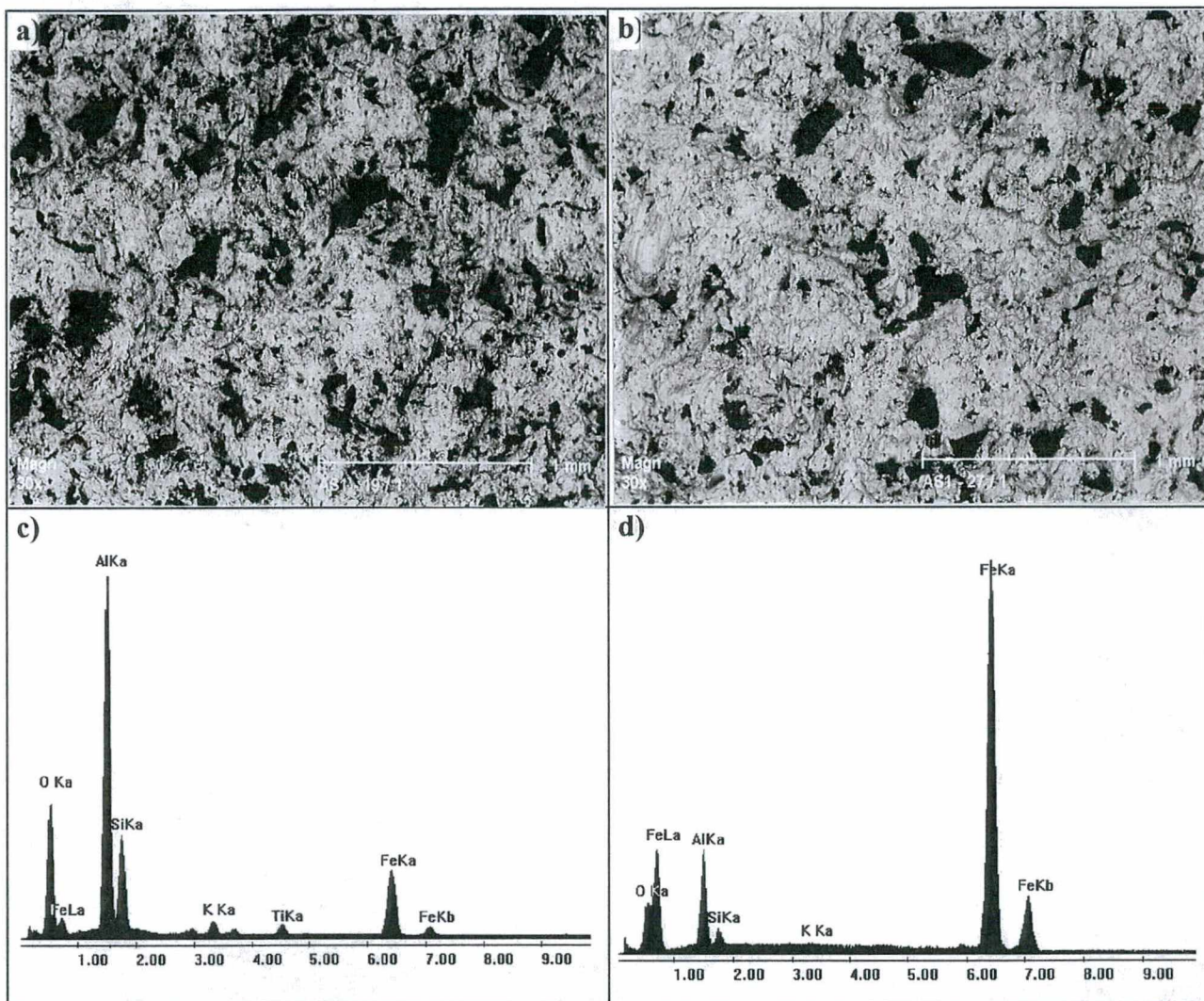
**Figura 46** - Superfície Jateada com Alundum de grana 16 novo (coluna da esquerda) e reutilizado (coluna da direita) a, b) Aparência da superfície; c, d) Espectro dos elementos na área da foto; e) quantificação dos elementos.



e) Quantificação dos Elementos

Elemento	% em peso	% atômica	% em peso	% atômica
Al	12,034	18,133	11,087	16,757
Fe	78,135	56,883	78,844	57,575
O	9,831	24,984	10,070	25,668
Na	-	-	-	-
Total	100,000	100,000	100,000	100,000

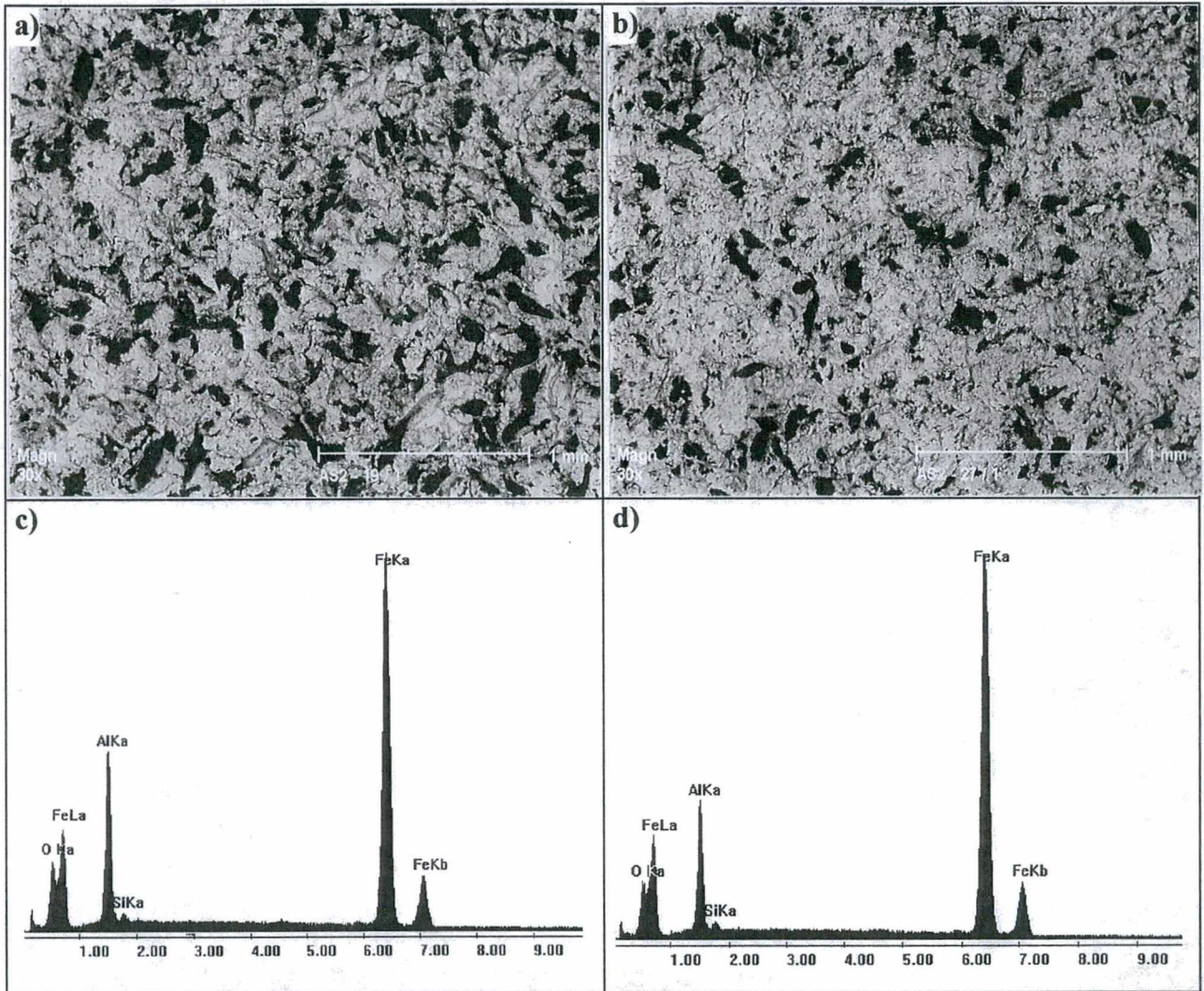
Figura 47 - Superfície Jateada com Alundum de grana 30 novo (coluna da esquerda) e reutilizado (coluna da direita) a, b) Aparência da superfície; c, d) Espectro dos elementos na área da foto; e) quantificação dos elementos.



e) Quantificação dos Elementos

Elemento	% em peso	% atômica	% em peso	% atômica
Al	29,032	24,239	9,393	14,091
Fe	16,905	6,819	77,971	56,514
Si	8,007	6,422	1,619	2,333
O	43,426	61,146	10,974	26,500
K	1,286	0,741	0,543	0,562
Ti	1,344	0,632	-	-
Total	100,000	100,000	100,000	100,000

**Figura 48** - Superfície Jateada com Sinterball de grana 1220 novo (coluna da esquerda) e reutilizado (coluna da direita). a, b) Aparência da superfície; c, d) Espectro dos elementos na área da foto; e) quantificação dos elementos.



**e) Quantificação dos Elementos**

Elemento	% em peso	% atômica	% em peso	% atômica
Al	14,911	20,591	11,949	17,506
Fe	71,109	47,442	76,204	53,940
Si	0,590	0,782	0,677	0,952
O	13,391	31,185	11,171	27,601
K	-	-	-	-
Ti	-	-	-	-
Total	100,000	100,000	100,000	100,000

**Figura 49** - Superfície Jateada com Sinterball de grana 2040 novo (coluna da esquerda) e reutilizado (coluna da direita). a, b) Aparência da superfície; c, d) Espectro dos elementos na área da foto; e) quantificação dos elementos.

## 7.3 Ensaios de Aderência por Tração

### 7.3.1 Qualificação dos Revestimentos conforme Normas

Normalmente os serviços contratados para deposição de revestimentos por aspersão térmica são avaliados por normas específicas como a MIL 2138A, AWS C2.18 e Petrobras N-2568, que especificam os corpos de prova e condições de ensaio para qualificação dos procedimentos. Posteriormente quando da execução dos serviços efetua-se no campo outros testes de tração. Para a qualificação as normas exigem a média de 13,8 MPa e nenhum valor individual inferior a 10,3 MPa. As normas Mil 2138A e Petrobras N-2568 exigem ainda testes de tração em campo, onde os resultados obtidos não podem ser inferiores a 6,9 MPa.

Verifica-se que a média dos valores exigidos para a qualificação é duas vezes superior àqueles obtidos em campo. Por este fato questiona-se se não haveria rigor acentuado na qualificação e abrandamento para os testes em campo. Poderia ser argumentado que os testes são feitos por equipamentos e em situações diferentes, ou seja os testes de qualificação conforme norma ASTM C-633 e em campo com equipamentos portáteis mencionados na norma ASTM D-4541. Porém estudos realizados no Labsolda [75] demonstraram variação mínima entre os dois casos.

Há conversações entre as empresas aplicadoras e a própria Petrobras para diminuir o valor médio exigido para a qualificação dos revestimentos, mantendo-se os valores mínimos individuais. Neste caso não haveria diminuição considerável da qualidade do revestimento, pois com as exigências atuais é possível encontrar, entre um grupo de cinco medições, diferenças superiores as obtidas entre as médias dos testes de qualificação e campo.

Comparando-se as exigências das normas com os resultados obtidos nesse trabalho para aspersão sem preaquecimento do substrato verifica-se que somente os revestimentos depositados em substratos jateados com Alundum novo de grana 30 (etapa AA2-1 da tabela 22) estariam qualificadas. Contudo após quatro utilizações deste abrasivo (etapa AA2-4 tabela 22) os mesmos estariam reprovados, pois apesar da média estar muito próxima do valor exigido houve uma medição inferior a 10,3 MPa. Nos outros casos (etapas AA1-1 e 4) não se constata nenhuma medição inferior a 10,3 MPa e média em torno de 12 MPa, o que reprovava o procedimento pelas exigências atuais das normas de qualificação.

No caso dos revestimentos depositados em superfícies jateadas com Sinterball (etapas AS1-1 e 4, AS2-1 e 4 tabela 22) todos seriam reprovados nos testes de qualificação. Apesar da

média estar muito próxima de 13,8 MPa existem resultados individuais abaixo do valor mínimo exigido. Nestes casos observa-se grande dispersão dos resultados apresentando valores de 4,9 a 20,9 MPa em uma mesma etapa.

Entretanto vale ressaltar que as exigências das normas são para revestimentos depositados sobre substratos preaquecidos a 120 °C e os resultados obtidos em nosso trabalho foram sobre substratos sem preaquecimento. Testes de aderência em revestimentos depositados sobre substratos preaquecidos das etapas AA1-1 e AS1-1 (tabela 23) demonstraram um aumento significativo na aderência, os quais estariam aprovados pelas exigências das normas. Portanto os valores de aderência obtidos nas etapas desse trabalho são satisfatórios por serem muito próximos daqueles exigidos pelas normas, apesar de terem sido aplicados sem o preaquecimento do substrato.

### 7.3.2 Efeito do Tipo e Granulometria dos Abrasivos

Na análise da influência do tipo de abrasivo (Alundum e Sinterball) foram consideradas as primeiras séries de jateamento, ou seja jateamento com abrasivos novos (etapas com finais 1 da tabela 22).

Para o Alundum verifica-se aumento nos valores de aderência com a diminuição da granulometria do abrasivo e, por consequência, de Ry (figura 50). Nesse caso a maior grana resultou em rugosidade Ry acima de uma faixa ótima, ocasionando menores valores de aderência. Pelos resultados de nosso trabalho esta faixa de rugosidade Ry estaria entre 60 e 80  $\mu\text{m}$ , mais estreita que a recomendada pela literatura de 50 a 100  $\mu\text{m}$ .

No caso do Sinterball (figura 50) não ocorreu variação nos valores de aderência com o decréscimo da granulometria e rugosidade Ry, ratificando a faixa de 60 a 80  $\mu\text{m}$  como ideal para a deposição de revestimentos de alumínio com espessura de 250  $\mu\text{m}$ .

Nos casos anteriores percebe-se que o tipo de abrasivo não teve influência na aderência, pois os valores situaram-se em patamares bem próximos tanto para o Alundum como para o Sinterball, com a exceção da etapa AA1-1 devido a excessiva rugosidade Ry. Vale ressaltar que apesar da média situar-se num mesmo patamar registrou-se elevada dispersão nos valores de aderência relativos ao Sinterball. Este fato talvez possa ser explicado pelos tipos de falhas (figuras 54 e 55 e tabela 22), ocorridas por coesão interna do revestimento ou no adesivo. Desta forma, apesar da média ficar da mesma ordem que para o Alundum, foram medidos valores isolados para o Sinterball (ruptura por coesão) bastantes mais altos.

No caso do Sinterball os valores inferiores de aderência estão associados aos tipos de falha mista por coesão e fração elevada no adesivo (50/60 %). Entretanto tipo similar de falha mista (coesão/adesivo) também ocorreu com o Alundum (etapa AA2-1 tabela 22), porém com maiores tensões de ruptura.

### 7.3.3 Efeito da Reutilização dos Abrasivos

A reutilização até quatro vezes dos abrasivos não causou variação significativa nos valores de aderência, desde que a rugosidade  $R_y$  estivesse dentro de uma faixa ideal (60/80  $\mu\text{m}$ ), conforme demonstrado pelos resultados da tabela 22 e figura 51.

Para o Alundum de grana 16 (etapa AA1-1 e 4 tabela 22 e figura 51) não foi possível detectar decréscimo mais acentuado nos valores de aderência, pois já na primeira utilização apresentou rugosidade  $R_y$  acima da faixa ideal e textura com a presença de grandes picos e vales, prejudicando o contato do revestimento de alumínio com o substrato. No caso das menores granulometrias tem-se a impressão que houve maior decréscimo da aderência com as reutilizações quando se observa os valores médios. Porém nota-se que as medições individuais são muito próximas com uma única exceção, motivo pelo qual seria imprudente considerar que houve decréscimo significativo na qualidade do revestimento.

Com o abrasivo Sinterball (etapas AS1-1 e 4, tabela 22 e figura 51) de maior granulometria também não se verifica variação significativa. Apesar da grande dispersão dos resultados nota-se que os valores individuais são muito semelhantes. No caso da menor granulometria (etapas AS2-1 e 4, tabela 22 e figura 51) houve maior decréscimo nos valores de aderência por não se alcançar a rugosidade ideal após quatro utilizações.

Analisando individualmente os casos em que a rugosidade  $R_y$  ficou dentro da faixa de 60/80  $\mu\text{m}$  (etapas AA2-1 e 4, AS1-1 e 4, tabela 22 e figura 51) verifica-se que a impregnação do substrato e contaminação dos abrasivos não afetaram a aderência dos revestimentos.

Os valores de aderência ficam claramente afetados com as variações das granulometrias e parâmetros de jateamento. Quando utilizada grana 16 (etapa AA1-1) para jateamento com altas pressões e pequenas distâncias bocal/substrato obteve-se valores de  $R_y$  elevados e textura não uniforme, prejudiciais a aderência do revestimento. Por outro lado para o Sinterball de grana 2040 e parâmetros de jateamento (menores pressões e maiores distâncias bocal/substrato) não se conseguiu níveis de rugosidade  $R_y$  apropriados após quatro utilizações (etapa AS2-4).



### 7.3.4 Observações sobre os Tipos de Falhas

Verificou-se uma distinção clara entre as falhas apresentadas pelos revestimentos depositados sobre superfícies jateadas com Alundum e Sinterball (tabela 22 e figuras 52 a 55). Nas superfícies jateadas com Alundum predominou a ruptura na interface revestimento/substrato (falha de aderência) e naquelas jateadas com Sinterball a ruptura foi predominantemente no interior do revestimento (falha de coesão) com maiores níveis de tensão. Essas diferenças seriam explicadas pelas diferentes texturas e impregnação do substrato por partículas do abrasivo.

Os grandes vales característicos da textura nas superfícies jateadas com Alundum, principalmente de grana 16 (figura 41), não seriam preenchidos com o material aspergido, causando descontinuidades na interface revestimento/substrato, que favoreceriam a ruptura por aderência (figuras 52 e 53) com menores níveis de tensão (tabela 22). Para mostrar a ausência de material aspergido (descontinuidades) nos grandes vales foram feitos cortes transversais nos revestimentos depositados sobre substrato jateados com Alundum e Sinterball (figura 56). Na figura 56a (Alundum) percebe-se textura mais irregular com a presença de partícula de abrasivo incrustada. Esta partícula só poderia estar neste local se fosse seccionada, ou na preparação da amostra (corte, lixamento, polimento) houvesse o deslocamento de material (do substrato e/ou do revestimento) sobre a partícula de abrasivo. A segunda hipótese pode ser alimentada observando as pequenas trincas acima dessa região, demonstrando que houve um deslocamento do revestimento. Portanto o preparo das amostras prejudicou a comprovação da ausência de material gerador de descontinuidades que causam a falha de aderência.

Nas superfícies jateadas com Sinterball a textura apresenta-se mais homogênea acomodando melhor o revestimento e, por consequência, melhorando o contato com o substrato (figura 56b). Com isso aumenta-se os níveis de tensão requeridos para a ruptura (tabela 22), que ocorre por coesão (figura 54 e 55).

Por outro lado quando a textura apresenta-se mais homogênea (superfícies jateadas com Sinterball) as partículas de abrasivo impregnadas no substrato exerceriam maior influência no tipo de falha. Através da figura 57 percebe-se que há maior quantidade de partículas aderidas na superfície de fratura dos corpos de prova jateados com Sinterball, mostrando que houve maior facilidade de sua remoção pelo revestimento. Essa facilidade de remoção acontece por estarem as partículas de Sinterball menos incrustadas (figura 45). Com isso essas partículas causariam o início da ruptura, que devido a melhor textura e aderência ao substrato, prossegue por coesão.

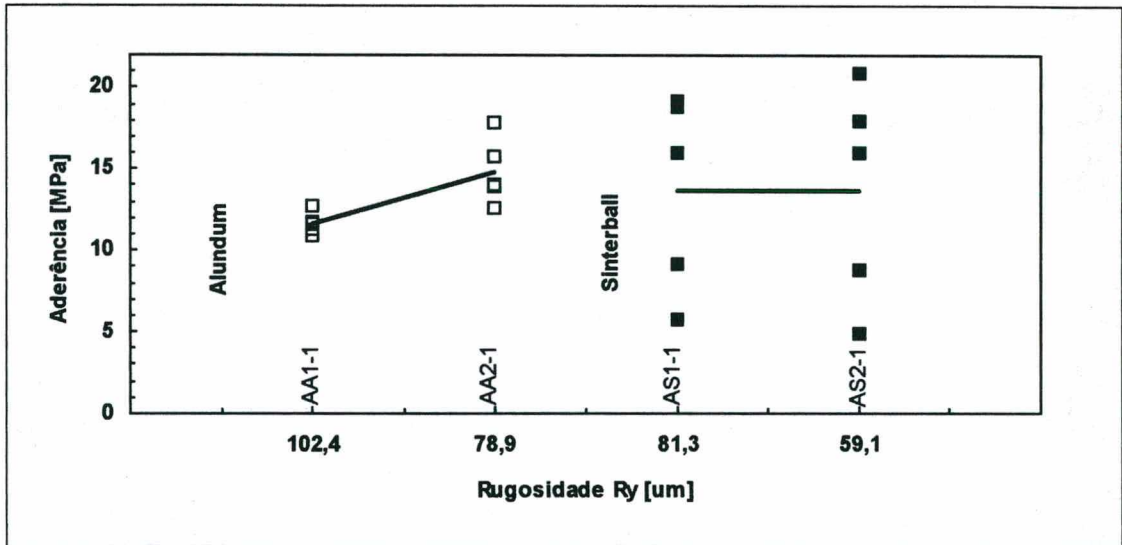
**Tabela 22** - Resultados do teste de tração em corpos de prova. metalizados com correspondentes valores de Ra, Ry e Sm do substrato.

Etapas	Rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]			Aderência [MPa]		Tipos de Falha*
	Ra	Ry	Sm			
AA1-1S				11,6		100% aderência
				12,7		100% aderência
	8,61	102,4	184,5	11,7		100% aderência
				10,9		45% aderência; 55% adesivo
				11,3		45% aderência; 55% adesivo
				X= 11,6	S= 0,6	
AA1-4S				11,6		100% aderência
				13,7		100% aderência
	6,71	71,8	126,2	12,0		100% aderência
				11,3		100% aderência
				11,3		100% aderência
				X= 11,9	S= 1,0	
AA2-1S				12,6		100% aderência
				13,9		100% aderência
	7,22	78,9	136,4	14,1		100% aderência
				15,8		50% coesão; 50% adesivo
				17,8		50% coesão; 50% adesivo
				X= 14,8	S= 2,0	
AA2-4S				7,1		100% aderência
				13,5		100% aderência
	5,89	61,4	123,3	13,3		100% aderência
				13,8		95% aderência; 05% adesivo
				15,8		95% aderência; 05% adesivo
				X= 12,7	S= 3,2	
AS1-1S				5,7		50% coesão; 50% adesivo
				9,2		80% coesão; 20% adesivo
	6,17	81,3	153,1	19,2		100% coesão
				16,0		80% coesão; 20% adesivo
				18,8		95% coesão; 05% adesivo
				X= 13,7	S= 6,0	
AS1-4S				4,5		40% coesão; 60% adesivo
				8,6		55% coesão; 45% adesivo
	5,56	68,2	145,6	15,9		80% coesão; 20% adesivo
				19,2		100% coesão
				19,7		100% coesão
				X= 13,6	S= 6,7	
AS2-1S				4,9		45% coesão; 55% adesivo
				8,8		50% coesão; 50% adesivo
	5,46	59,1	122,1	16,0		85% coesão; 15% adesivo
				20,9		85% coesão; 15% adesivo
				18,0		95% coesão; 05% adesivo
				X= 13,7	S= 6,6	
AS2-4S				5,7		40% coesão; 60% adesivo
				8,2		90% coesão; 10% adesivo
	4,88	47,7	111,7	10,2		80% coesão; 20% adesivo
				16,2		100% coesão
				17,8		95% coesão; 05% adesivo
				X= 11,6	S= 5,1	

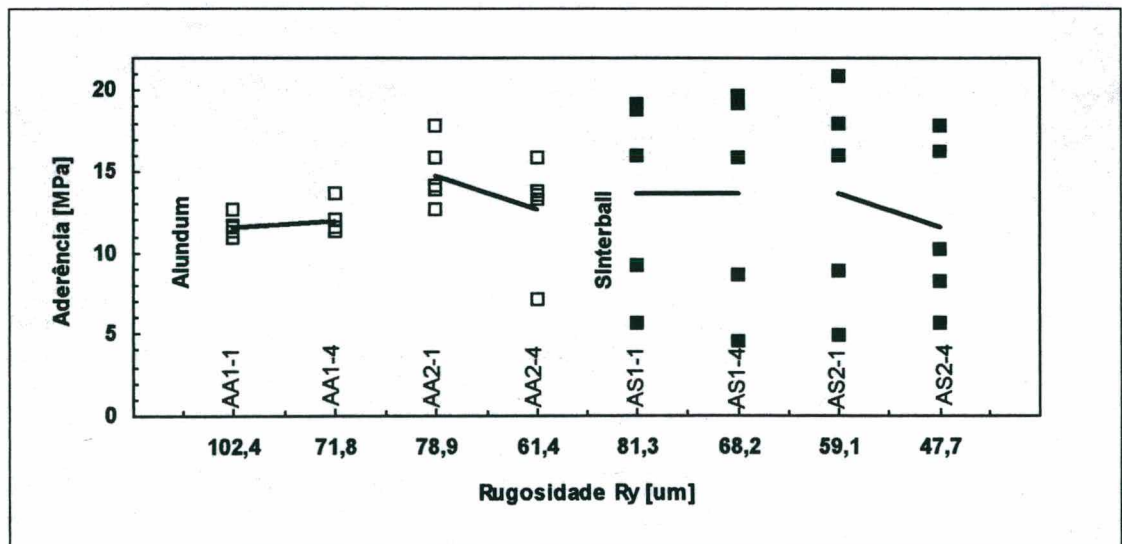
\* Os tipos de falhas são mostrados nas figuras 52 a 55.

**Tabela 23-** Resultados do teste de tração em cps. metalizados com preaquecimento do substrato a 120 °C e correspondentes valores de Ra, Ry e Sm.

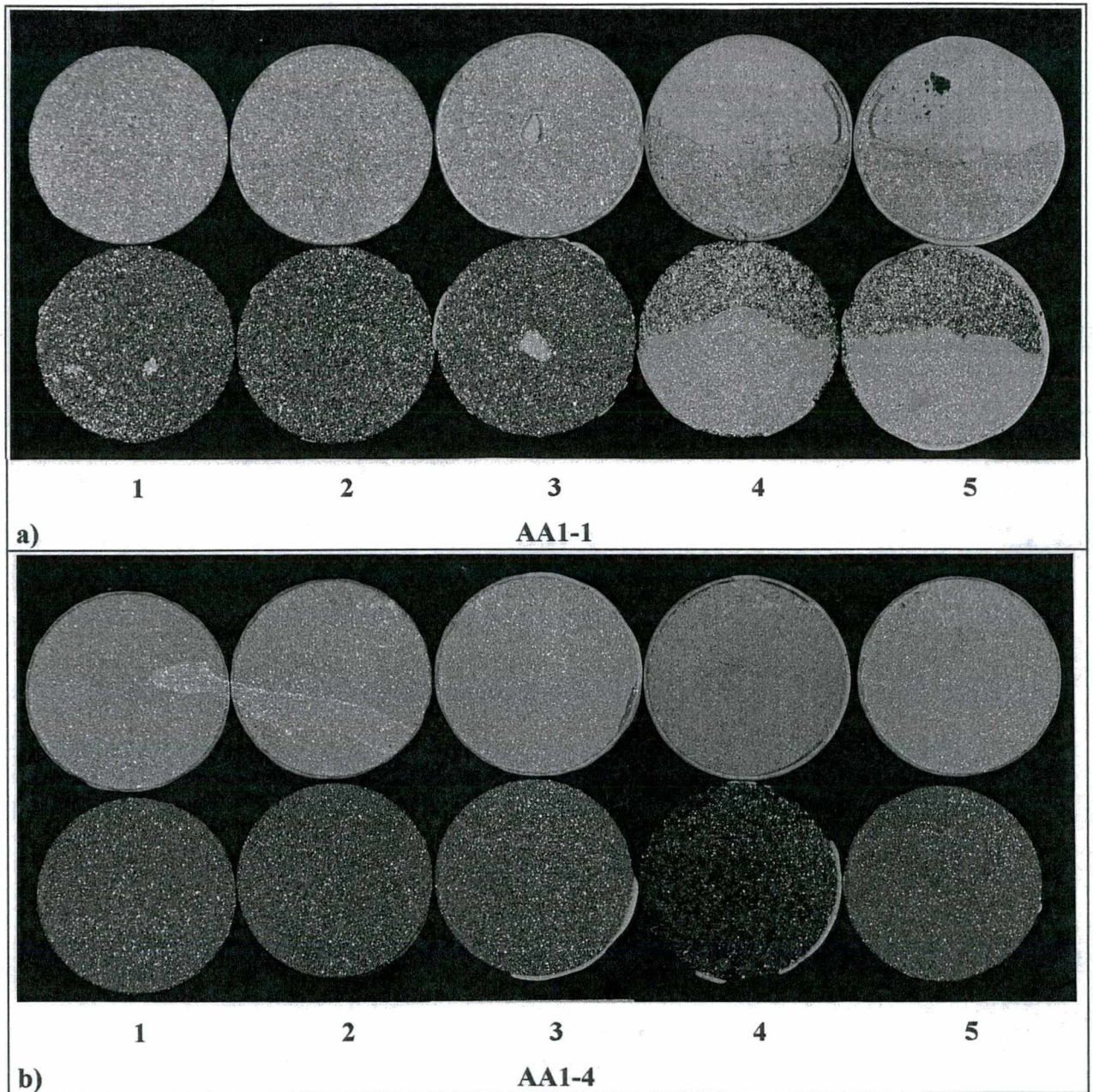
Etapas	Rugosidade [μm]			Aderência [MPa]		Tipos de Falha
	Ra	Ry	Sm			
AA1-1P				17,9		100% adesivo
				31,1		100% adesivo
	8,61	102,4	184,5	34,4		100% adesivo
				28,6		100% adesivo
				31,8		100% adesivo
				X = 28,7	S = 6,4	
AS1-1P				33,1		100% adesivo
				33,8		100% adesivo
	6,17	81,3	153,1	30,2		100% adesivo
				33,0		100% adesivo
				29,9		100% adesivo
				X = 32,0	S = 1,8	



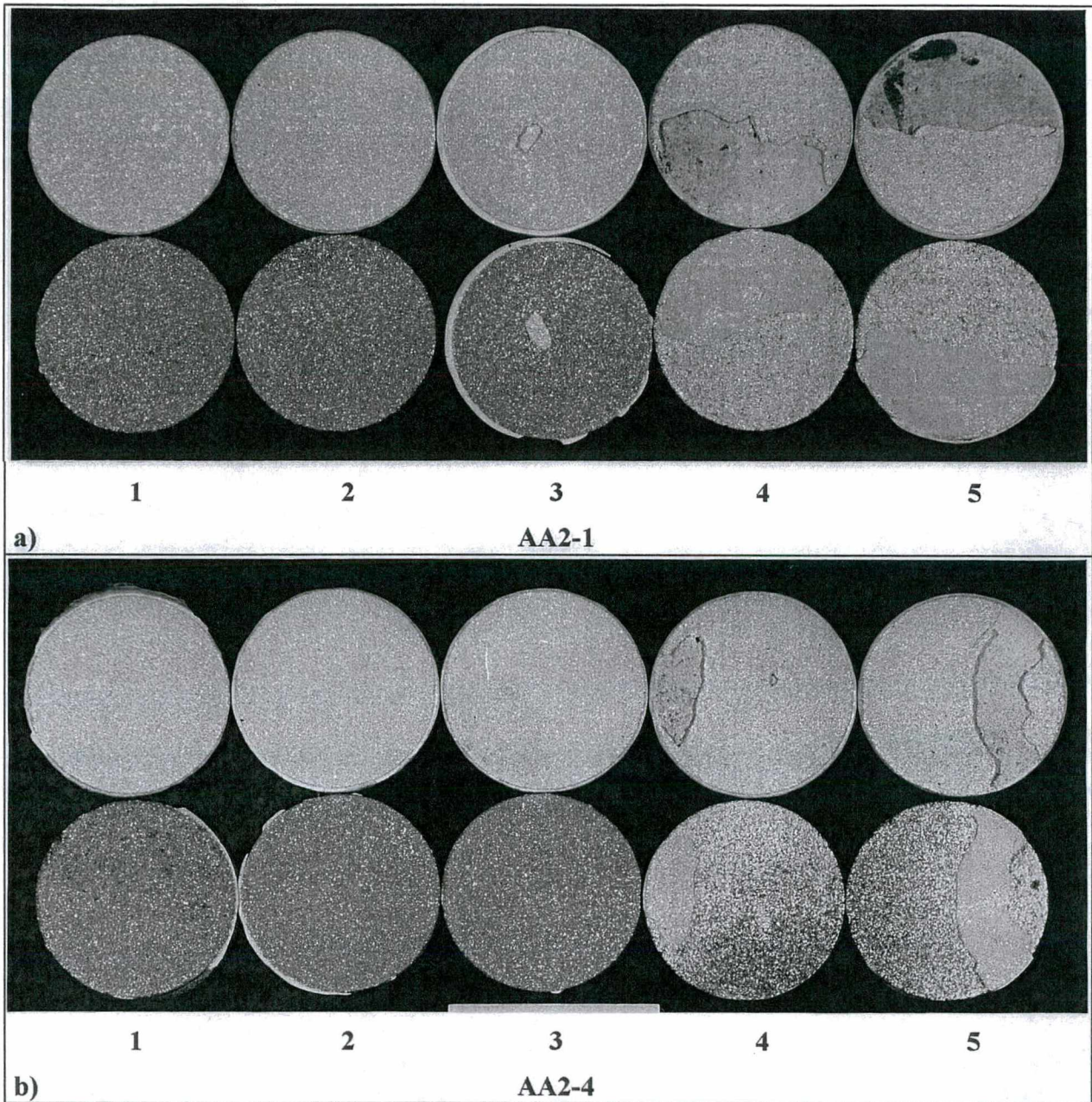
**Figura 50** - Aderência versus rugosidade com abrasivos novos (tabela 22).



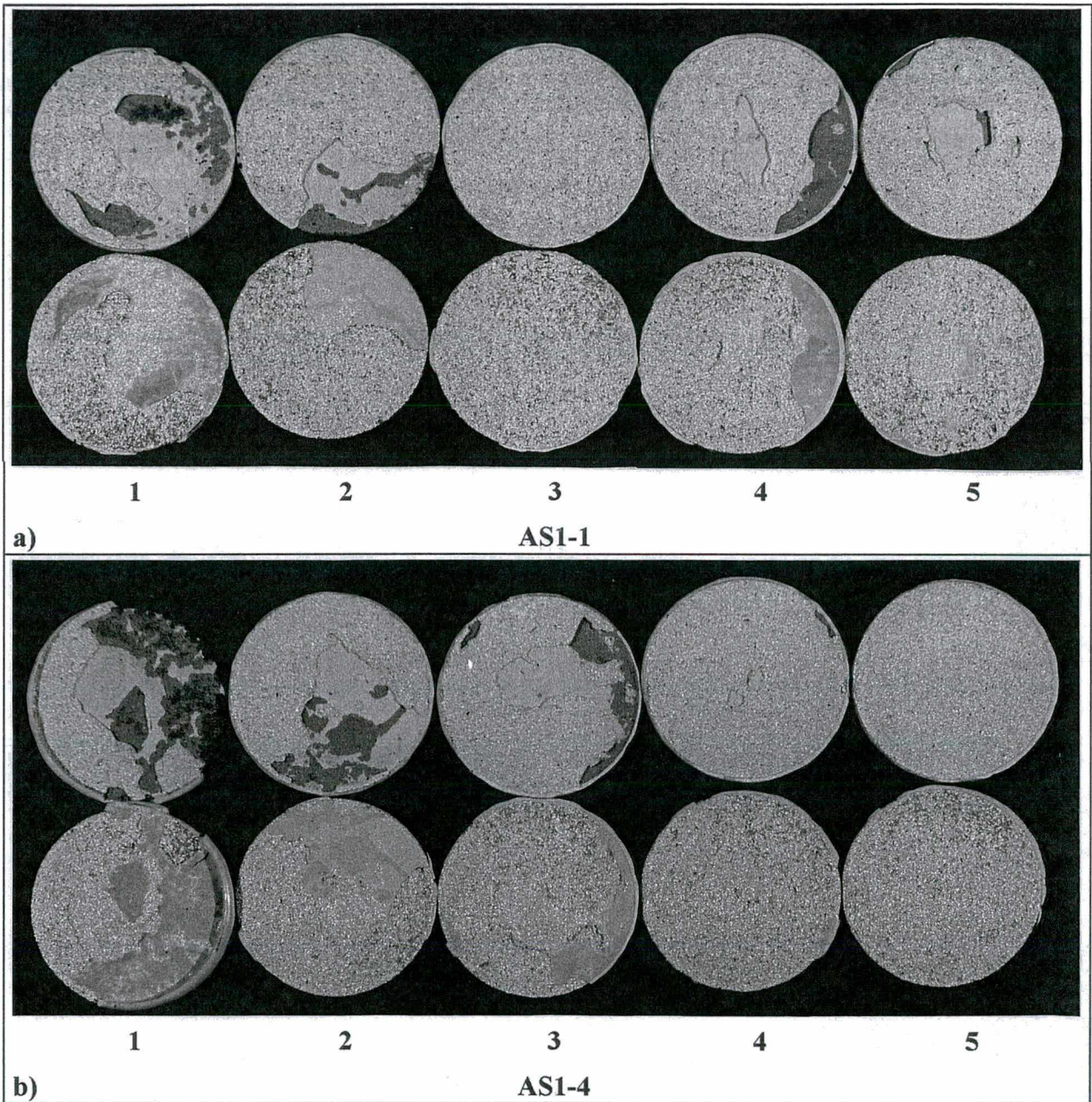
**Figura 51** - Aderência versus rugosidade com a reutilização dos abrasivos (tabela 22).



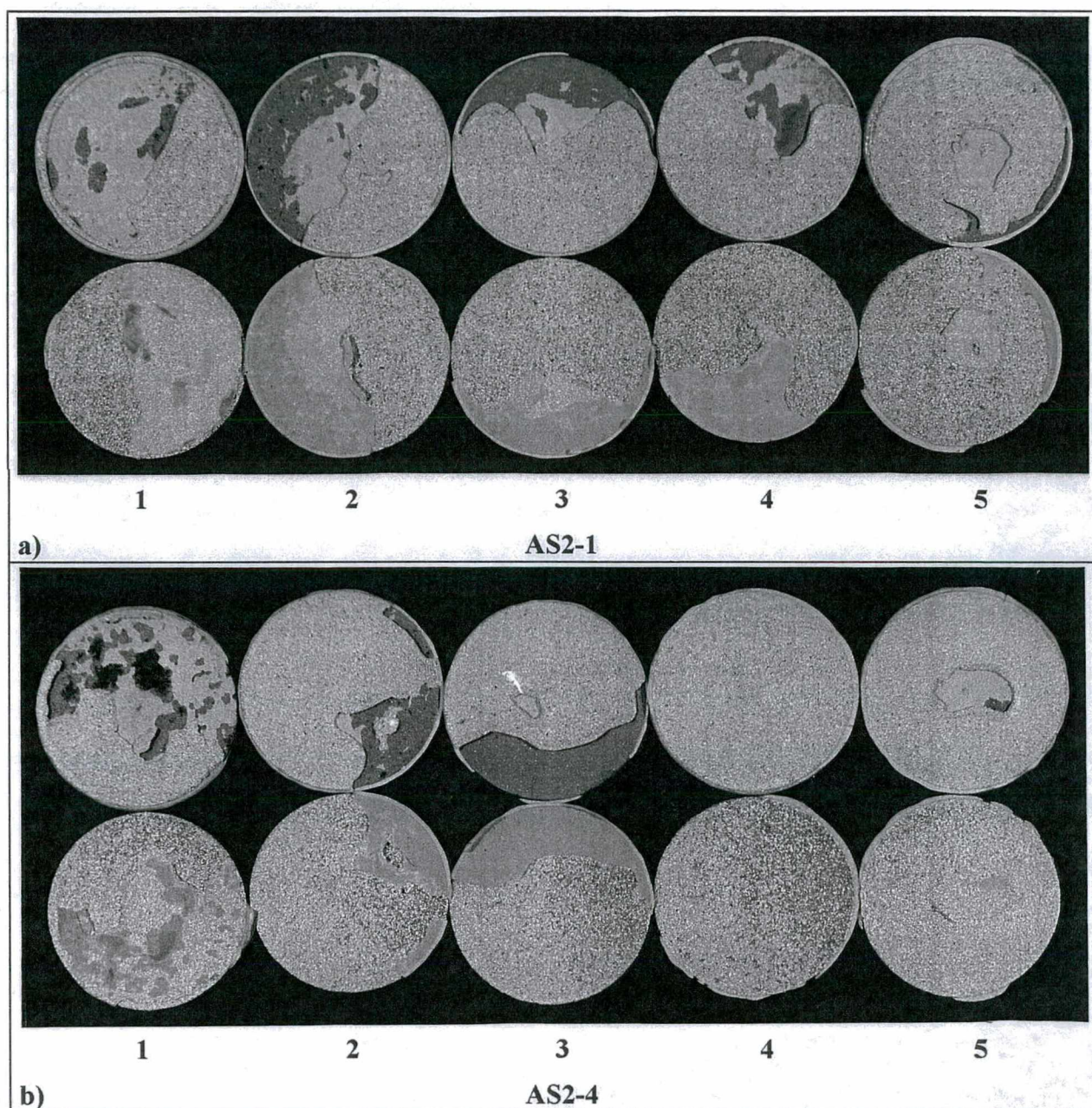
**Figura 52** -Corpos de Prova (inferior) e corpo de extração (superior) após o ensaio de tração mostrando o tipo de falha nas superfícies jateadas com alundum de grana 16 novo (a) e após 4 utilizações (b) (etapas AA1-1 e AA1-4).



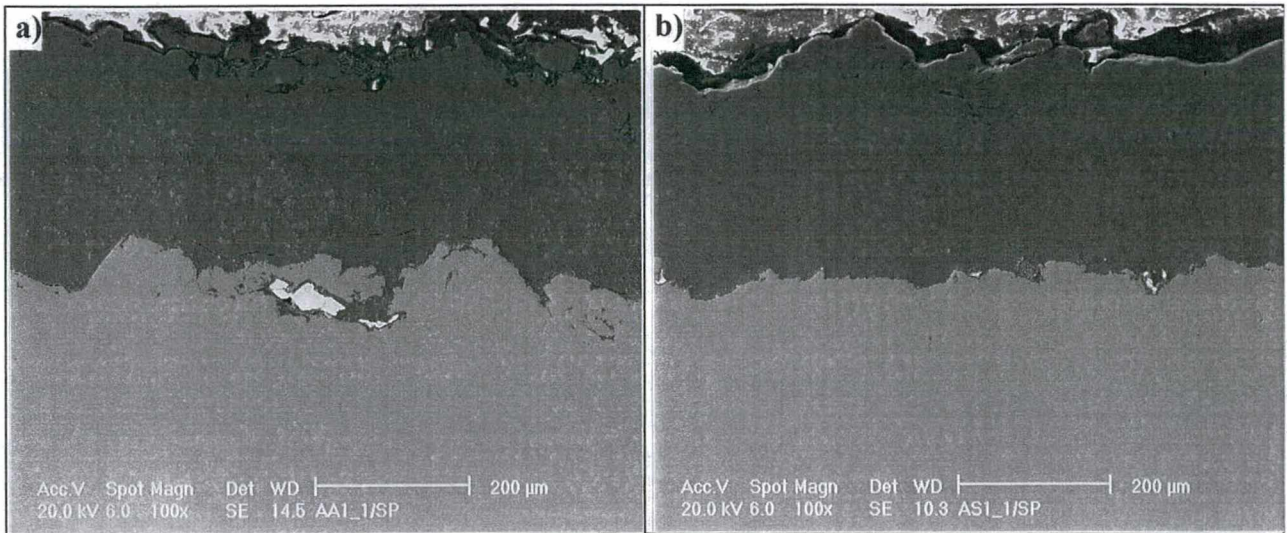
**Figura 53** -Corpos de Prova (inferior) e corpo de extração (superior) após o ensaio de tração mostrando o tipo de falha nas superfícies jateadas com alundum de grana 30 novo (a) e após 4 utilizações (b) (etapas AA2-1 e AA2-4).



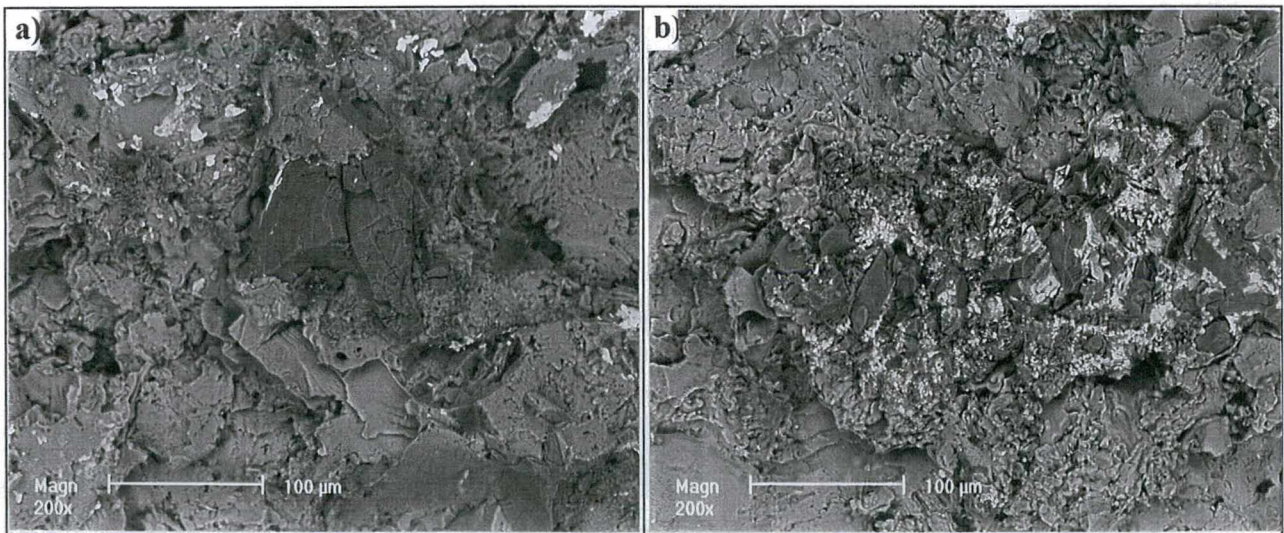
**Figura 54** -Corpos de Prova (inferior) e corpo de extração (superior) após o ensaio de tração mostrando o tipo de falha nas superfícies jateadas com sinterball de grana 1220 novo (a) e após 4 utilizações (b) (etapas AS1-1 e AS1-4).



**Figura 55** -Corpos de Prova (inferior) e corpo de extração (superior) após o ensaio de tração mostrando o tipo de falha nas superfícies jateadas com sinterball de grana 2040 novo (a) e após 4 utilizações (b) (etapas AS2-1 e AS2-4).



**Figura 56** - Corte transversal das camadas de alumínio (cinza escuro) depositada sobre substratos (cinza claro) jateados com Alundum de grana 16 (a) e Sinterball 1220(b).



**Figura 57** -Partículas de abrasivo aderidas na superfície de fratura dos corpos de extração mostrados nas figuras 52 e 54 (MEV). a) cp. 1 da fig. 52a; b) cp. 4 da fig.54a.



## **7.4 Ensaio de Aderência por Dobramento**

### **7.4.1 Efeito da Preparação da Superfície**

A variação de aderência não foi perceptível quando comparados os corpos de prova jateados com Alundum 38A e Sinterball nas duas granulometrias, pois os ângulos de dobramento foram próximos para o início das trincas e para o destacamento do revestimento (tabela 24).

Portanto não foi possível determinar, através deste ensaio, a influência do desgaste e contaminação do abrasivo, rugosidade e impregnação da superfície na aderência dos revestimentos.

### **7.4.2 Efeitos do Preaquecimento do Substrato e Tratamento Térmico Posterior do Revestimento**

Os testes de dobramento apesar de qualitativos foram suficientes para avaliar o efeito desses diferentes ciclos térmicos sobre o desempenho dos revestimentos depositados.

Comparando-se os resultados obtidos nos ensaios dos corpos de prova sem preaquecimento (1S) e preaquecidos a 120 °C (1P) não se observa variação dos ângulos de início de trincas e destacamento do revestimento (tabela 24).

Ao contrário, nas amostras preaquecidas a 250 °C (1R), apesar do ângulo de início de trincas ser muito semelhante aos casos anteriores, não houve destacamento do revestimento mesmo com dobramento de até 180 °C (tabela 24).

Nos corpos de prova preaquecidos a 120°C e tratados termicamente a 400 °C (1Q) após a aspersão foram obtidos os melhores resultados. Ou seja o ângulo de início de trincas foi maior e também não houve destacamento do revestimento (tabela 24).

Nas figuras 58 a 60 vê-se a micrografia , após o ensaio de dobramento, dos três corpos de prova preaquecidos e tratados termicamente. No caso dos corpos de prova. metalizados sem preaquecimento a micrografia é idêntica à daqueles metalizados com 120 °C.

Notou-se através destes ensaios que houve uma melhoria na aderência com preaquecimento do substrato ao patamar de 250 °C, detectada pelo não destacamento do revestimento apesar da presença de trincas grandes até o substrato (figura 59). A melhor condição é aquela onde foi efetuado tratamento térmico posterior, pois as trincas menores (figura 60), em

relação ao preaquecimento a 120 °C e 250 °C, não permitiram o destacamento do revestimento. A presença de trincas menores e não destacamento dos revestimentos está associada a sua maior ductilidade, conseguida pela minimização das tensões provenientes do encruamento do material quando este é aspergido. A maior ductilidade do revestimento pode ser verificada pela redução substancial dos valores de dureza (tabela 25) com um preaquecimento a 250 °C ou a 120 °C com tratamento térmico da camada a 400 °C. Isto mostra que essas temperaturas seriam suficientes para eliminar as tensões residuais inerentes do processo de deposição e até mesmo recristalizar o material do revestimento.

Por outro lado a dureza foi similar nos revestimentos depositados sobre substratos sem e com preaquecimento a 120 °C (tabela 25), mostrando que a essa temperatura o mesmo continua com certo nível de encruamento, confirmado pelo ensaio de dobramento que não apresentou variações para os dois tipos de preparação do substrato. Apesar de não ser possível detectar através do ensaio de dobramento melhorias na aderência dos revestimentos com preaquecimento do substrato a 120 °C supõe-se que houve um alívio das tensões residuais. Este alívio de tensões fica perceptível quando efetuado os ensaios de aderência por tração (tabela 23) que apresentaram valores de aderência superiores com o preaquecimento do substrato.

Como detectado pelos ensaios de dobramento o preaquecimento do substrato a temperaturas no patamar de 250 °C é favorável a melhoria da aderência. Sendo a mesma incrementada ainda mais com o preaquecimento do substrato a 120°C e tratamento térmico da camada a 400 °C. Porém por questões práticas e até econômicas torna-se difícil a obtenção dessas temperaturas nos serviços de grandes estruturas. Por isso surgem como opção os processos de deposição (ASP, HVOF) que proporcionam maiores temperaturas ou velocidades das partículas, favorecendo a melhoria da aderência sem a necessidade de preaquecimento do substrato.

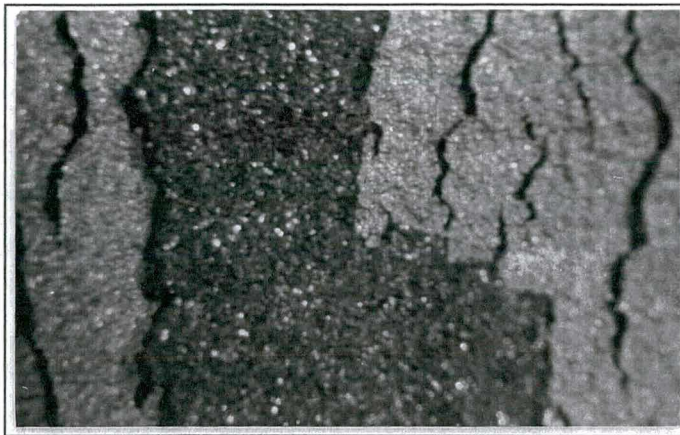
**Tabela 24** - Resultados do ensaios de dobramento em revestimentos depositados sobre superfícies com, sem pré-aquecimento e tratados termicamente.

Corpos de Prova	Âng.Trincas [°]	Aderência [MPa]	Comentários
AA1-1S	25	média	início pequenas trincas
	65		destacamento do revestimento
AA2-1S	25	média	início pequenas trincas
	65		destacamento do revestimento
AA1-1P	10	média	início pequenas trincas
	65		destacamento do revestimento
AA2-1P	10	média	início pequenas trincas
	65		destacamento do revestimento
AA1-1Q	40	grande	início pequenas trincas
	180		trincas médias;substrato visível;não destacamento do revestimento
AA2-1Q	40	grande	início pequenas trincas
	180		trincas médias;substrato visível;não destacamento do revestimento
AA1-1R	15	grande	início pequenas trincas
	180		trincas grandes;substrato visível;não destacamento do revest.
AA2-1R	15	grande	início pequenas trincas
	180		trincas grandes;substrato visível;não destacamento do revest.
AS1-1S	20	média	início de pequenas trincas
	60		destacamento do revestimento
AS2-1S	20	média	início de pequenas trincas
	65		destacamento do revestimento
AS1-1P	15	média	início de pequenas trincas
	75		destacamento do revestimento
AS2-1P	20	média	início de pequenas trincas
	75		destacamento do revestimento
AS1-1Q	40	grande	início de pequenas trincas
	180		trincas médias;substrato visível;não destacamento do revestimento
AS2-1Q	40	grande	início de pequenas trincas
	180		trincas médias;substrato visível;não destacamento do revestimento
AS1-1R	15	grande	início de pequenas trincas
	180		trincas grandes;substrato visível;não destacamento do revest.
AS2-1R	20	grande	início de pequenas trincas
	180		trincas grandes;substrato visível;não destacamento do revest.

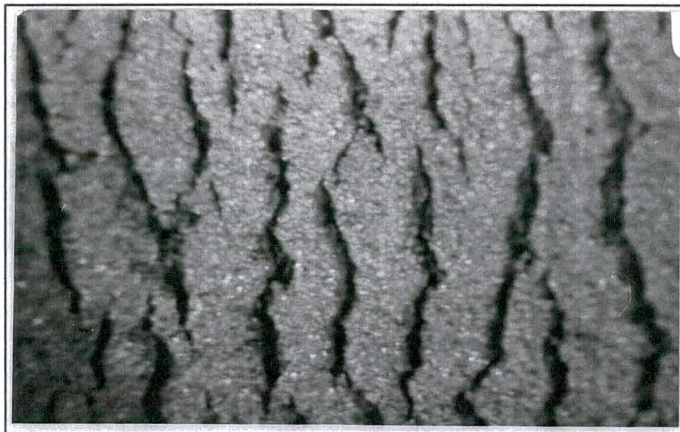
**Tabela 25** - Dureza dos revestimentos p/ diferentes preaquecimentos e/ou tratamentos térmicos

Preaquecimento/ Tratamento Térmico	*Dureza [HV <sub>15</sub> ]	
	Média	Desvio Padrão
Sem preaquecimento	46	7,5
120 °C	48	5,0
250 °C	36	8,0
120 °C + TT a 400 °C	35	3,6

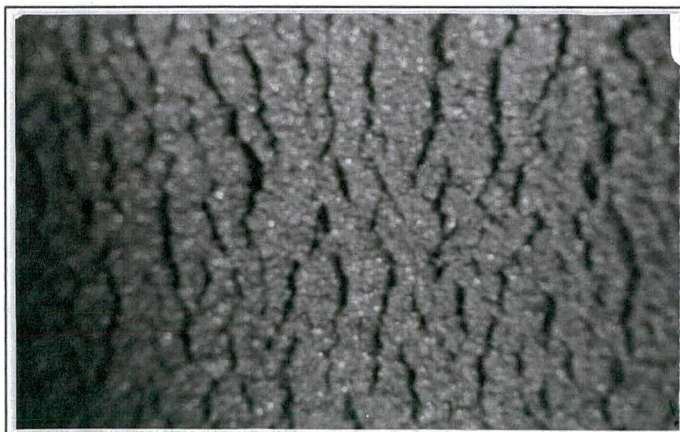
\* Dureza medida a uma distância média entre o substrato e a superfície do revestimento.



**Figura 58** - Corpo de prova ensaiado por dobramento com substrato preaquecido a 120°C (10x).



**Figura 59** - Corpo de prova ensaiado por dobramento com substrato preaquecido a 250°C (10x).



**Figura 60** - Corpo de prova ensaiado por dobramento com substrato preaquecido a 120°C e trat. térmico posterior(10x).

## VIII CONCLUSÕES

As conclusões agrupadas em função dos itens mais importantes são apresentadas na sequência:

### **a) Quanto a reutilização dos abrasivos;**

Os resultados mostraram a viabilidade de reutilização dos dois abrasivos na preparação da superfície de chapas de aço carbono, com graus A e C de corrosão, para deposição de revestimentos de alumínio por aspersão térmica.

Com o abrasivo Alundum, nas duas granulometrias (16 e 30), a faixa de rugosidade  $R_y$  recomendada na literatura (50 a 100  $\mu\text{m}$ ) pode ser atingida, mesmo em quatro operações severas de jateamento, no limite superior das recomendações práticas dos fabricantes.

Para o Sinterball de menor granulometria (2040), com as condições mais amenas de jateamento especificadas pelo fabricante para esse abrasivo sinterizado, o limite inferior de rugosidade  $R_y$  (50  $\mu\text{m}$ ) não é obtido na quarta reutilização.

O decréscimo nos valores de aderência com as quatro reutilizações dos abrasivos (inferior a 15%) não é significativa até a quarta série de jateamento e fica dentro da faixa de dispersão dos resultados dos ensaios de tração. Portanto a impregnação da superfície, contaminação e desgaste dos abrasivos não são fatores relevantes na aderência, nas condições de jateamento empregadas.

### **b) Quanto a relação entre aderência e rugosidade;**

Os melhores níveis médios de aderência foram medidos para o jateamento com Alundum de granulometria inicial 30 e valores de  $R_y$  na faixa de 60 a 80  $\mu\text{m}$ . A rugosidade  $R_y$  acima de 100  $\mu\text{m}$ , produzida com abrasivo novo de granulometria mais grosseira (16), tem efeito negativo sobre a aderência.

Para o Sinterball, em ambas granulometrias, as falhas nos testes de aderência por tração foram por coesão (e coesão-adesivo), o que impede uma correlação direta entre faixa de rugosidade  $R_y$  e nível de aderência. Entretanto as falhas predominantemente por coesão, sob valores individuais elevados e superiores a aderência medida no caso do Alundum, demonstram melhor ancoramento do revestimento de Alumínio ao substrato preparado com Sinterball. Isso leva a conclusão que os parâmetros de rugosidade verticais ( $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_y$ ) e horizontal ( $S_m$ ) não

são suficientes para caracterizar a resistência e o tipo de falha dos revestimentos no ensaio de tração, uma vez que não expressam o possível efeito benéfico da textura preferencial do jateamento a 45° (Sinterball).

**c) Quanto a necessidade de preaquecimento do substrato**

O requisito mínimo de aderência (13,8 MPa), das normas para qualificação de procedimentos de aspersão térmica com alumínio, só foi preenchido na caso do jateamento com abrasivo Alundum novo de granulometria 30, mesmo sem o preaquecimento do substrato. Dessa forma, apesar do nível de aderência (11,6 a 14,8 MPa) atingido nesse trabalho ser relativamente bom de acordo com a literatura, seria recomendável o preaquecimento do substrato a 120°C, que permite aumento acima de 100 % na aderência, para garantir o atendimento das normas vigentes.

**d) Quanto a aplicabilidade do ensaio de dobramento**

O dobramento mostrou-se inadequado como ensaio de aderência, pois só foi sensível a variações no comportamento dos revestimentos aplicados sobre substratos preaquecidos a 250 °C, ou após tratamento térmico a 400 °C, quando o encruamento e a dureza decrescem pela recristalização do revestimento de alumínio.

## **IX PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS**

Verificar, para o abrasivo Alundum, os níveis de impregnação e textura superficial utilizando menores pressões de jateamento (60psi), maiores distâncias bocal/substrato (450mm) e menores ângulos de jateamento (45° e 60°). Correlacionar os níveis obtidos com a aderência dos revestimentos.

Repetir os ensaios em revestimentos depositados sobre substratos jateados com Sinterball utilizando na colagem outro tipo de adesivo (CA-9 da 3M), para comprovar se as possíveis causas da dispersão dos resultados estão relacionadas com o tipo de adesivo.

Realizar testes de jateamento controlados com outros tipos de abrasivos de menor custo, como Alundum Marron (menor pureza), quartzo, escórias, para correlacionar os níveis de desgaste, impregnação e rugosidade com a aderência dos revestimentos.

Verificar através de rugosímetro de bancada outros parâmetros horizontais e verticais de rugosidade, correlacionando-os entre si para o levantamento mais preciso do perfil das superfícies jateadas. Através destes perfis seria possível detectar variações imperceptíveis pelos parâmetros Ra, Rz, Ry e Sm, permitindo uma análise mais profunda da textura superficial para determinar as possíveis variações na aderência.

Analisar através de metalografia óptica e eletrônica a interface revestimento de alumínio substrato de aço, para caracterizar mais precisamente os mecanismos de ligação que acontecem quando utilizados os três processos de deposição (aspersão a chama, aspersão a chama de alta velocidade e arco elétrico). Para isso deve-se levar em consideração as características do alumínio e aço, uma vez que os resultados podem ser mascarados com a preparação inadequada das amostras.

Estudar os ciclos térmicos nas operações de aspersão térmica, alterando as condições de preaquecimento do substrato e tratamento térmico do revestimento, para determinar a influência na aderência.

Verificar a possibilidade de utilização e acuracidade de ensaios de tração sem uso de adesivos. Pois os adesivos disponíveis não atendem aos requisitos mínimos de aderência para os processos mais recentes de deposição (HVOF). Entre alguns testes podem ser citados o de indentação que analisa as trincas provocadas pela pressão da pirâmide de dureza Vickers na interface revestimento/substrato com determinada carga, a qual apresenta uma correlação linear com o raio das trincas. Outro teste é o teste de riscamento que consiste em mover um indentador de diamante cônico no sentido substrato/revestimento com uma carga específica, com isso aparecem trincas nessa interface que é medida e correlacionada com a carga. Traça-se uma curva relacionando o comprimento das trincas com as cargas, e a tensão crítica de início de trincas pode ser determinada por extrapolação [76].



## X REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] KENNY, E. D., ESMANHOTO, E. J. Desempenho de revestimentos termoplásticos obtidos por aspersão térmica. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE, 7, 1994, São Paulo. **Anais...** Sao Paulo: Associação Brasileira de Tratamento de Superfícies, 1994. v. 1, p.375-381.
- [02] RAMANATHAN, Lalgudi V. **Corrosão e seu controle**. Sao Paulo: Hemus Editora Ltda, [19..]. 338p.
- [03] ETT, Volkmar. A proteção contra corrosão de estruturas "offshore". In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 17, 1993, Rio de Janeiro.
- [04] THOMASON, W.H. Offshore corrosion protection with thermal-sprayed aluminum. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 17, 1985, Houston.
- [05] PARKS, Richard, KOGLER JR., R.A. U.S. Navy experience with high temperature corrosion control of lagged piping system components using sprayed aluminum coatings. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 2, 1988, Cincinnati.
- [06] DANIEL,R.L., SANDERS,H.L., MENDREK,M.J. Replacement of environmentally hazardous corrosion protection paints on the space shuttle main engine using wire arc sprayed aluminum. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 7, 1994, Boston.
- [07] HEINRICH, Peter. Thermal spraying - facts and state-of-the-art. **Sonder e Druck**. Hoellriegelskreuth, v. 10, p.3-28, Out. 1992.
- [08] CLARE, J.H.; CRAWMER, D.E. Thermal Spray Coatings. In : American Society for Metals. **Surface cleaning, finishing, and coating**. Ohio, 1982. v. 5, p. 361-374,
- [09] MAYER, C.A. Thermal spray coating - a money-saving technology. **Welding Design & Fabrication**. p. 66-74, Feb. 1982.
- [10] Thermal Spraying: practice, theory and application. American Welding Society, Miami, 1985, 184 p.
- [11] SMITH, Ronald W., NOVAK, Richard. Advances and applications in U.S. thermal spray technology. **Powder Metallurgy International**. v.23, n.3, p.147-155, Mar. 1991.
- [12] LUGSHEIDER, E., ESCHNAUER, H., MÜLLER, U., WEBER, Th. Quo vadis, thermal spray technology? **Powder Metallurgy International**. v.23, n.1, p.33-40, Jan. 1991

- [13] BRITTON, C.R., Flame Spraying With Aluminium and Aluminium Alloys. **Aluminium Industry**. v. 7, n. 10, p. 5-7, Dec.1988.
- [14] BORBECK, K.D. Market survey of Thermal Spraying. **Welding and Cutting**. v. 8, p. 118-119, Aug. 1990.
- [15] GRASME, Dieter. Arc spraying of aluminium. **Welding and Cutting**. v. 8, p.124-125, Aug. 1990.
- [16] KREYE, H. State of development and prospects of higt-velocity flame spray. **Welding and Cutting**. v. 8, p.119-124, Aug. 1990.
- [17] THORPE, M.L. Thermal spray - industry in transition. **Advanced Materials & Processes**. v. 5, p.50-61, Mai. 1993
- [18] HOEHNE, Kurt. Haftvermittelnde schichten beim thermischen spritzen von metallen. **Schweißtechnik**.v. 35, n. 11, p. 497-499, Nov. 1985.
- [19] PARKER, D.W., KUTNER, G.L. HVOF-spray technology-poised for growth. **Advanced Materials & Processes**. v. 4, p. 68-74, Apr. 1991.
- [20] AMIN, M. Coating quality in arc spraying-getting it righth. **The Welding Institute Bulletin**. v. 3, p.52-57, May/Jun. 1992.
- [21] IRVING, Bob, KNIGHT, Richard, SMITH, Ronal W. The HVOF process - the hottest topic in the thermal spray industry. **Welding Journal**. v.7, p.25-30, Jul. 1993.
- [22] METCO PERKIN ELMER. **Metco DJ Diamond Jet Sistem, Technical Bulletin**. Jun. 1990, New York.14p.
- [23] KAISER, J.J., MILLER, R.A., Inert gas improves arc-sprayed coatings. **Advanced Materials and Process**. v. 12, p.37-40, Dez. 1989.
- [24] NORTORF MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS LTDA. **Panorama Atual da Tecnologia de Jateamento**. São Paulo. Out. 1989. 18p
- [25] NORTORF MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS LTDA. **Noções Básicas sobre Equipamentos para Jateamento**. São Paulo. Out. 1988. 16p.
- [26] LENHAERT, R.M., WEIGHTMAN, Neil, WOELFEL, Michael M. Abrasive blast cleaning. In : American Society for Metals. **Surface cleaning, finishing, and coating**. Ohio, 1982. v. 5, p. 83 - 96.
- [27] ETT, Volkmar. **Carta de recomendações práticas**. Cascadura Industrial, VE/hh.D.035. São Paulo. Fev. 94. 4p.
- [28] NORTON S/A/ INDÚSTRIA E COMÉRCIO Grãos Abrasivos. São Paulo, Jul. 1986. 25 p.

- [29] FRAGATA, F.I., MEDUNA, J.R. Estudo de novo tipo de abrasivo a base de óxido de alumínio ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 17, 1993, Rio de Janeiro.
- [30] FUNDACENTRO. **Resultado de análise quantitativa nº 00202**. São Paulo. Ago. 1990.
- [31] MINERAÇÃO CURIMBABA LTDA. **Boletim técnico sobre bauxito sinterizado (sinterball)**. Poços de Caldas. Mar. 1992.
- [32] THÜMMLER, F., OBERACKER, R. **An introduction to powder metallurgy**. The Institute of Materials. London, 1993. 320p.
- [33] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. **B-215: practices for sampling finished lots of metal powders**. Philadelphia, 1990. 2p.
- [34] GERMAN, Randall M. **Powder Metallurgy Science**. Metal Powder Industries Federation. New Jersey, 1989. 275p.
- [35] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, AMERICAN NATIONAL STANDARD, Philadelphia. **E-11: specifications for wire-cloth for testing purposes**. Philadelphia, 1970. 5p.
- [36] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia. **B-214: test method for sieve analysis of granular metal powders**. Philadelphia, 1986. 3p.
- [37] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, AMERICAN NATIONAL STANDARD, Philadelphia. **C-371: method for wire-cloth sieve analysis of nonplastic ceramic powders**. Philadelphia, 1978. 3p.
- [38] AMERICAN NATIONAL STANDARD, New York. **B-74.12: specifications for the size of abrasive grain - grinding wheels, polishing and general industrial use**. New York, 1976. 8p.
- [39] SILVA, P. F. **Introdução a corrosão e proteção das superfícies metálicas**. Belo Horizonte: Imprensa Universitária-UFMG, 1981.
- [40] SWEDISH STANDARDS INSTITUTION, Stockholm. **SIS 055900: pictorial surface preparation standard for painting steel surfaces**. Stockholm, 1975. 4p.
- [41] SUMARÉ INDÚSTRIA QUÍMICA S/A. **Introdução a Proteção Anti-corrosiva**. São Paulo. 1992. 66p.
- [42] GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara. 1987.
- [43] AGOSTINHO, O.L., RODRIGUES. A.C.S., LIRANI, J. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análises de dimensões**. São Paulo: Editora Blücher, 1977. 292p.

- [44] BET, L. **Metodologia da medição e estudo do parâmetros de avaliação na análise de superfícies técnicas**. Florianópolis: UFSC, 1996. Proposta de Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1996. 167p.
- [45] BRITISH STANDARDS INSTITUTION, London. **BS 6741: surface roughness terms**. London 1987. 16p.
- [46] HOWES Jr., Charles P. Thermal Spraying: processes, preparation, coatings and application. **Welding Journal**, v. 4, p. 47 - 51, Apr. 1994.
- [47] ROUND, M.J. The training and certification of metal spraying protection inspectors. **Thermal Spraying**, v. 6, p. 175 - 185, Jun. 1989.
- [48] MILITARY STANDARD, Washington DC. **MIL-STD-2138A(SH): metal sprayed coatings for corrosion protection aboard naval ships**. Washington DC, 1992. 33p.
- [49] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE, AMERICAN WELDING SOCIETY, Miami. **C2.18: guide for the protection of steel with thermal sprayed coatings of aluminum and zinc and their alloys and composites**. Miami, 1993. 30p.
- [50] AMERICAN WELDING SOCIETY, Miami. **C2-2: recommended practices for metallizing with aluminium and zinc for protection of iron and steel**. Miami, 1967, 9 p.
- [51] WIGREN, Jan. Grit-blasting as surface preparation before plasma spraying. **Volvo Internal Report**, Department of Materials Technology. Sweden, p. 99 - 104, (19..).
- [52] APPS, R.L. **Grit blasting v. bond strength in metal spraying**. London: The Welding Institute, 1969. 95 p.
- [53] FEBRATEC LTDA. **Recomendações Técnicas 719/95**. São Paulo, Jul. 1995.
- [54] LYMAN, Taylor. **Metals Handbook**, 8 ed., v.2, p. 494 - 496, 1979.
- [55] INGHAN, H.S., SHEPARD, A.P., **Flame Spray Handbook**. New York: Metco Inc., 1969. v.1 220p.
- [56] KREYE, Heinrich. **Institut fur Werkstofftechnik, UniBw Hamburg**. Nov. 1993. (Comunicação Privada).
- [57] HAVRDA, Mir. Surface preparation for arc spraying aluminium coating. **Welding in the World**, v. 29, n. 5/6, p. 124 - 129, 1981.
- [58] BARDAL, E. The effect of surface preparation on the adhesion of arc- and flame-sprayed aluminium and zinc coating to mild steel. In: **INTERNATIONAL METAL SPRAYING CONFERENCE**, 7, 1973, London. p. 215-223.

- [59] FEIST, Klaus, SCHULZ, Wolf-Dieter. Zum einfluß des strahlmittels auf die vorbehandlung von stahloberflächen für nachfolgendes metallspritzen mit zink und aluminium. **Schweiss Technik**, n. 1, v. 38, p. 485-488, Out. 1988.
- [60] APPS, R.L. The influence of surface preparation on the bond strength of flame sprayed aluminium coating on mild steel. **Journal Vacuum Science Technologi**, v. 11, n. 4, p. 741 746, Jul/Aug. 1974.
- [61] BARDAL, E., MOLDE, P., EGGEN, T.G. Arc and flame sprayed aluminium and zinc coatings on mild steel: bond strength, surface roughness, structure and hardness. **British Corrosion Journal**, v.8, p. 15-19, Jan.1973.
- [62] SHIMIZU, Y., SATO, M., KOBAYASHI, M., MAEDA, K. Effect of test specimen size upon adhesive strength of flame sprayed coatings. In: NATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, Pittsburg, PA. May.1991.
- [63] BERNARD, D., FAUCHAIS, P. Influence of the torch-substrate relative movements and cooling of coating during spraying on the mechanical properties of TBCs. In: NATIONAL THERMAL CONFERENCE, 3, 1990, Long Beach. **Anais...Ohio:Thermal Spray Research and Applications**, 1991. v. 1, p. 551-560.
- [64] NITZSCHE, K., **Schichttrnesstechnik**. Leipzig: Editora VEB, 1993.
- [65] LIMA, Carlos R. Camello, TREVISAN, Roseana E. Análise da correlação dos resultados de ensaios de adesão em revestimento obtidos por aspersão térmica a plasma. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DA SOLDAGEM, 22, 1996, Blumenau. **Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Soldagem**, 1996. v. 2, p 557-567.
- [66] MILEWISK, W. Current analysis of hitherto adhesion test methods for thermally sprayed coatings. **DVS 152**. p.258-260. Aachen. 1993.
- [67] LEIGH,S.H., BERNDT,C.C.A test for coating adhesion on flat substrates-a technical note. **Journal of Thermal Spray Technology**, v.3, p.184-190, Jun. 1994.
- [68] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, Berlin. **50160**: ermittlung der haftzugfestigkeit im stirnzugversuch. Berlin, 1992. 4p.
- [69] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia, 1980. **C 633**:. standard test method for adhesion or cohesive strength of flame-sprayed coatings. Philadelphia, 1980. 5p.
- [70] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, Philadelphia, 1986. **D 4541**:. standard test method for pull-off strength of coatings using portable adhesion testers. Philadelphia, 1986. 7p.

- [71] SMART, R.F. Quality control of sprayed coatings. In: INTERNATIONAL THERMAL SPRAY CONFERENCE, 8, 1976, Miami.
- [72] COMISSÃO DE NORMAS TÉCNICAS (SC-26) PETROBRÁS, Rio de Janeiro. N-2568: seleção e aplicação (por aspersão térmica) do alumínio, zinco e suas ligas como revestimento anticorrosivo. Rio de Janeiro, 1996. 34 p.
- [73] METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION, New Jersey. . MPIF 05: determination of sieve analysis of metal powders. New Jersey, 1986. 2p.
- [74] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Central de Análises do Departamento de Química. **Resultado de Análises nº 039/95 e 015/96.** Florianópolis, Jan. 1996.
- [75] UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Laboratório de Soldagem. **Testes de aferição de equipamentos portáteis para medição da adência de camadas depositadas por aspersão térmica. Relatório Técnico.** Mar. 1996.
- [76] BLUNT, F.J. A review of techniques for measuring and ranking adhesion of HVOF sprayed coatings. **The Welding Institute**, 7227.01/95/825.2, p. 1-25, Nov. 1995.

**ANEXO 1**

**ESPESSURAS DOS REVESTIMENTOS DOS CORPOS DE PROVA ENSAIADOS POR  
TRAÇÃO E DOBRAMENTO**

**Tabela 1 - Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova para ensaio de tração etapa AA1-1**

Corpos de	Medições [ $\mu\text{m}$ ]					
Prova	1	2	3	4	5	X
1	260	270	270	280	295	275
2	300	270	250	290	280	278
3	265	300	270	280	300	283
4	300	275	300	285	295	291
5	285	280	265	320	290	288

**Tabela 2 - Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova para ensaio de tração da etapa AA1-1, com preaquecimento do substrato a 120 °C.**

Corpos de	Medições [ $\mu\text{m}$ ]					
Prova	1	2	3	4	5	X
1	280	315	320	310	300	305
2	325	300	320	340	340	325
3	290	312	320	340	300	312
4	300	300	292	290	280	292
5	270	290	235	300	280	275

**Tabela 3 - Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova para ensaio de tração da etapa AA1-4**

Corpos de	Medições [ $\mu\text{m}$ ]					
Prova	1	2	3	4	5	X
1	280	300	310	280	280	290
2	260	270	280	250	310	274
3	300	260	320	300	260	288
4	290	270	280	280	260	276
5	280	290	255	270	270	273

**Tabela 4 - Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova para ensaio de tração da etapa AA2-1**

Corpos de	Medições [ $\mu\text{m}$ ]					
Prova	1	2	3	4	5	X
1	280	280	320	265	285	286
2	260	280	270	275	300	277
3	260	300	280	270	280	278
4	280	260	255	290	270	271
5	300	280	260	300	310	290



**Tabela 5 - Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova para ensaio de tração da etapa AA2-4**

Corpos de Prova	Medições [ $\mu\text{m}$ ]					
	1	2	3	4	5	X
1	260	320	300	300	300	296
2	280	320	300	270	300	294
3	320	270	320	300	300	302
4	265	270	280	270	275	272
5	275	300	270	265	280	278

**Tabela 6 - Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova para ensaio de tração da etapa AS1-1**

Corpos de Prova	Medições [ $\mu\text{m}$ ]					
	1	2	3	4	5	X
1	250	290	270	285	280	275
2	255	255	250	270	260	258
3	275	275	260	270	275	271
4	290	290	260	250	285	275
5	280	280	250	255	280	269

**Tabela 7 - Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova para ensaio de tração da etapa AS1-1, com preaquecimento do substrato a 120 °C.**

Corpos de Prova	Medições [ $\mu\text{m}$ ]					
	1	2	3	4	5	X
1	320	290	302	300	300	302
2	320	292	290	280	280	292
3	300	290	280	292	300	292
4	310	320	300	320	300	310
5	315	270	300	330	310	305

**Tabela 8 - Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova para ensaio de tração da etapa AS1-4**

Corpos de Prova	Medições [ $\mu\text{m}$ ]					
	1	2	3	4	5	X
1	265	295	270	2770	320	284
2	295	270	250	270	270	271
3	260	300	260	270	300	278
4	275	310	255	275	310	285
5	290	270	260	300	275	279

**Tabela 9 - Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova para ensaio de tração da etapa AS2-1**

Corpos de Prova	Medições [ $\mu\text{m}$ ]					
	1	2	3	4	5	X
1	275	285	300	260	300	284
2	300	310	240	255	270	275
3	295	300	250	240	290	275
4	310	300	270	300	320	300
5	300	300	285	240	300	285

**Tabela 10 - Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova para ensaio tração da etapa AS2-4**

Corpos de Prova	Medições [ $\mu\text{m}$ ]					
	1	2	3	4	5	X
1	310	320	250	300	300	296
2	300	320	270	300	295	297
3	300	310	275	300	310	299
4	310	300	295	250	300	291
5	300	275	270	350	310	301

**Tabela 11 - Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova para ensaio de dobramento da etapa AA1**

Medições	Tipo de Preaquecimento e Tratamento Térmico			
	S/Preaquec. (1S)	120°C 1P	120°C + T.T. 400°C (1Q)	250°C (1Q)
1	290	340	280	320
2	270	360	300	340
3	300	360	260	320
Média	286	353	280	327

**Tabela 12 - Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova para ensaio de dobramento da etapa AA2**

Medições	Tipo de Preaquecimento e Tratamento Térmico			
	S/Preaquec. (1S)	120 °C 1P	120 °C + T.T. (1Q)	250 °C (1Q)
1	260	280	290	220
2	280	300	230	250
3	260	290	240	250
Média	266	290	253.3	240

**Tabela 13 - Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova para ensaio de dobramento da etapa AS1**

Medições	Tipo de Preaquecimento e Tratamento Térmico			
	S/Preaquec. (1S)	120 °C 1P	120°C + T.T. (1Q)	250 °C (1Q)
1	270	320	300	290
2	300	340	300	300
3	280	300	270	280
Média	283	320	290	290

**Tabela 14 - Espessuras dos revestimentos dos corpos de prova para ensaio de dobramento da etapa AS2**

Medições	Tipo de Preaquecimento e Tratamento Térmico			
	S/Preaquec. (1S)	120 °C 1P	120 °C + T.T. (1Q)	250 °C (1Q)
1	280	270	270	420
2	290	300	290	400
3	270	300	280	390
Média	280	290	280	403.3

## **ANEXO 2**

### **DADOS DE PENEIRAMENTO DOS ABRASIVOS**

**Tabela 1 - Dados de Peneiramento das Séries de Jateamento com abrasivo Alundum 38A de grana 16 em chapas com grau "A" de corrosão**

Tamanho das Partículas		Amostras									
mm	malha	AA1-0		AA1-1		AA1-2		AA1-3		AA1-4	
		% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.
2.00	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.70	12	0.36	0.36	0.04	0.04	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
1.40	14	1.86	2.22	0.16	0.20	0.17	0.19	0.03	0.03	0.09	0.09
1.18	16	27.06	29.28	10.06	10.26	4.67	4.86	1.89	1.92	0.91	1.00
1.00	18	57.96	87.24	37.50	47.76	25.64	30.50	13.54	15.46	10.91	11.91
0.85	20	10.08	97.32	13.58	61.34	17.94	48.44	13.83	29.29	12.67	24.58
0.71	25	1.10	98.42	80.8	69.42	8.72	57.16	8.40	37.69	9.08	33.66
0.60	30	0.19	98.61	6.53	75.95	7.60	64.76	8.46	46.15	9.17	42.83
0.50	35	0.10	98.71	5.80	81.75	7.30	72.06	8.86	55.01	10.47	53.30
< 0.50	< 35	0.30	99.01	17.36	99.11	27.78	99.84	44.24	99.25	45.72	99.02

**Tabela 2 - Dados de Peneiramento das Séries de Jateamento com abrasivo Alundum 38A de grana 16 em chapas com grau "C" de corrosão**

Tamanho das Partículas		Amostras									
mm	malha	CA1-0		CA1-1		CA1-2		CA1-3		CA1-4	
		% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.
2.00	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.70	12	0.12	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.40	14	0.40	0.52	0.10	0.10	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00
1.18	16	32.55	33.07	6.05	6.15	1.90	1.90	1.65	1.67	0.74	0.74
1.00	18	56.00	89.07	31.98	38.13	18.60	20.50	13.36	15.03	8.61	9.35
0.85	20	9.37	98.44	16.69	54.82	15.67	36.17	12.68	27.71	10.87	20.22
0.71	25	1.05	99.49	9.71	64.53	9.12	45.29	9.03	36.74	8.43	28.65
0.60	30	0.30	99.79	7.23	71.76	7.88	53.19	9.15	45.89	8.15	36.80
0.50	35	0.06	99.85	7.04	78.80	8.93	62.10	10.21	56.10	10.29	47.09
< 0.50	< 35	0.15	100.00	20.24	99.04	36.72	99.02	43.31	99.41	52.89	99.98

**Tabela 3 - Dados de Peneiramento das Séries de Jateamento com abrasivo Alundum 38A de grana 30 em chapas com grau "A" de corrosão**

Tamanho das Partículas		Amostras									
mm	malha	AA2-0		AA2-1		AA2-2		AA2-3		AA2-4	
		% Retida [g]	% Retida Acum. [g]	% Retida [g]	% Retida Acum. [g]	% Retida [g]	% Retida Acum. [g]	% Retida [g]	% Retida Acum. [g]	% Retida [g]	% Retida Acum. [pg]
1.00	18	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.85	20	0.27	0.32	0.24	0.24	0.25	0.25	0.24	0.24	0.00	0.00
0.71	25	1.91	2.23	1.12	1.36	0.72	0.97	0.49	0.73	0.38	0.38
0.60	30	50.47	52.70	26.95	28.31	19.69	20.66	11.91	12.64	8.28	8.66
0.50	35	42.10	94.80	38.92	67.23	32.20	52.86	28.02	40.66	22.73	31.39
0.425	40	4.23	99.03	9.53	76.76	13.79	66.65	15.84	56.50	16.23	47.62
0.355	45	0.36	99.39	5.20	81.96	7.01	73.66	7.86	64.36	8.61	56.23
0.30	50	0.04	99.43	4.28	86.24	5.80	79.46	7.38	71.74	8.33	64.46
0.25	60	0.04	99.47	3.36	89.60	5.16	84.62	6.83	78.57	7.98	72.44
< 0.25	< 60	0.02	99.49	9.97	99.57	15.10	99.72	21.20	99.77	26.85	99.29

**Tabela 4 - Dados de Peneiramento das Séries de Jateamento com abrasivo Alundum 38A de grana 30 em chapas com grau "C" de corrosão**

Tamanho das		Amostras									
Partículas		CA2-0		CA2-1		CA2-2		CA2-3		CA2-4	
mm	malha	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.
1.00	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.85	20	0.13	0.13	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.71	25	1.73	1.86	1.27	1.40	0.87	0.87	0.78	0.78	0.45	0.45
0.60	30	48.40	50.26	27.86	29.26	17.88	18.75	12.42	13.20	8.12	8.57
0.50	35	41.85	92.11	36.89	66.15	31.82	50.57	26.77	39.97	24.18	32.75
0.425	40	6.82	98.93	13.57	79.72	15.47	66.04	13.56	53.53	16.89	49.64
0.355	45	0.55	99.48	5.26	84.98	7.65	73.69	8.33	61.86	8.63	58.27
0.30	50	0.06	99.54	4.44	89.42	6.29	79.98	7.66	69.52	8.36	66.63
0.25	60	0.10	99.64	3.52	92.94	5.60	85.58	7.32	76.84	7.54	74.17
< 0.25	< 60	0.11	99.75	7.03	99.97	13.83	99.41	22.60	99.44	25.33	99.50

**Tabela 5 - Dados de Peneiramento das Séries de Jateamento com abrasivo Sinterball de grana 1220 em chapas com grau "A" de corrosão**

Tamanho das		Amostras									
Partículas		AS1-0		AS1-1		AS1-2		AS1-3		AS1-4	
mm	malha	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.
2.00	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.70	12	5.50	5.50	3.58	3.58	2.18	2.18	2.24	2.24	1.59	1.59
1.40	14	20.51	26.01	12.96	16.54	10.75	12.93	10.03	12.27	6.27	7.86
1.18	16	20.00	46.01	16.01	32.55	14.62	27.55	11.60	23.87	8.76	16.62
1.00	18	25.62	71.63	24.73	57.28	23.11	50.66	20.79	44.66	15.23	31.85
0.85	20	15.03	86.66	16.15	73.43	15.18	65.84	17.15	61.81	13.75	45.60
0.71	25	3.89	90.55	7.80	81.23	8.26	74.10	8.72	70.53	8.62	54.22
0.60	30	2.10	92.65	4.80	86.03	5.83	79.93	6.73	77.26	6.77	60.99
0.50	35	1.60	94.25	3.88	89.91	4.77	84.70	5.35	82.61	5.97	66.96
< 0.50	< 35	5.09	99.34	9.66	99.57	14.77	99.47	16.90	99.51	32.98	99.94

**Tabela 6 - Dados de Peneiramento das Séries de Jateamento com abrasivo Sinterball de grana 1220 em chapas com grau "C" de corrosão**

Tamanho das		Amostras									
Partículas		CS1-0		CS1-1		CS1-2		CS1-3		CS1-4	
mm	malha	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.
2.00	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.70	12	0.31	0.31	0.26	0.26	0.23	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00
1.40	14	0.75	1.06	0.53	0.79	0.48	0.71	0.40	0.40	0.34	0.34
1.18	16	9.32	10.38	5.16	5.95	4.76	5.47	2.43	2.83	2.59	2.93
1.00	18	45.09	55.47	33.18	39.13	27.12	32.59	21.39	24.22	18.74	21.67
0.85	20	29.31	84.78	25.92	65.05	24.86	57.45	22.68	46.90	20.12	41.79
0.71	25	9.41	94.19	11.81	76.86	11.98	69.43	12.28	59.18	12.11	53.90
0.60	30	3.47	97.66	6.70	83.56	8.73	78.16	9.24	68.42	9.00	62.90
0.50	35	1.15	98.81	4.81	88.37	5.95	84.11	7.05	75.47	7.45	70.35
< 0.50	< 35	0.58	99.39	11.30	99.67	15.60	99.71	24.20	99.67	29.22	99.57

**Tabela 7 - Dados de Peneiramento das Séries de Jateamento com abrasivo Sinterball de grana 2040 em chapas com grau "A" de corrosão**

Tamanho das Partículas		Amostras									
mm	malha	AS2-0		AS2-1		AS2-2		AS2-3		AS2-4	
		% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.
1.00	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.85	20	0.10	0.10	0.08	0.08	0.20	0.20	0.22	0.22	0.21	0.21
0.71	25	9.41	9.51	9.03	9.11	6.56	6.76	6.15	6.37	4.59	4.58
0.60	30	39.76	49.27	35.61	44.72	32.42	39.18	30.85	37.22	25.55	30.35
0.50	35	36.10	85.37	34.00	78.72	34.38	73.66	32.71	69.93	31.93	62.28
0.425	40	10.57	95.94	11.10	89.82	12.52	86.08	13.26	83.19	15.38	77.66
0.355	45	2.16	98.10	4.12	93.94	4.16	90.24	5.12	88.31	5.68	83.34
0.30	50	1.10	99.20	2.47	96.41	2.82	93.06	3.30	91.61	4.10	87.44
0.25	60	0.46	99.66	1.61	98.02	2.32	95.38	2.58	94.19	3.53	90.97
< 0.25	< 60	0.14	99.80	1.28	99.30	4.46	99.84	5.42	99.61	9.00	99.97

**Tabela 8 - Dados de Peneiramento das Séries de Jateamento com abrasivo Sinterball de grana 2040 em chapas com grau "C" de corrosão**

Tamanho das Partículas		Amostras									
mm	malha	CS2-0		CS2-1		CS2-2		CS2-3		CS2-4	
		% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.	% Retida	% Retida Acum.
1.00	18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.85	20	0.32	0.32	0.45	0.45	0.30	0.30	0.32	0.32	0.32	0.32
0.71	25	10.21	10.53	9.08	9.53	7.68	7.98	7.08	7.40	6.04	6.36
0.60	30	28.16	38.69	26.31	35.84	23.30	31.28	20.08	27.48	19.72	26.08
0.50	35	39.10	77.79	37.39	73.23	32.84	64.12	31.30	58.78	29.27	55.35
0.425	40	19.05	96.84	15.86	89.09	19.66	83.78	19.67	78.45	20.90	76.25
0.355	45	1.66	98.50	3.71	92.80	5.65	89.43	6.38	84.83	6.66	82.91
0.30	50	0.64	99.14	2.08	94.88	3.05	92.48	4.13	88.96	3.96	86.87
0.25	60	0.30	99.44	1.48	96.36	2.50	94.98	3.56	92.52	3.48	90.35
< 0.25	< 60	0.21	99.65	2.77	99.13	5.01	99.99	7.14	99.66	9.16	99.51

**ANEXO 3**

**RUGOSIDADES OBTIDAS NAS SÉRIES DE JATEAMENTO**



**Tabela 1 - Rugosidades das chapas jateadas na etapa AA1**

Pontos	Rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]											
	1ª série			2ª série			3ª série			4ª série		
	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz
1	9.89	128.8	67.3	6.33	84.2	55.9	6.63	67.1	51.0	7.72	67.1	55.4
2	12.22	114.4	62.9	11.40	85.3	66.1	6.53	71.1	53.1	6.54	66.3	51.8
3	7.70	81.1	55.3	7.52	86.4	59.2	6.66	67.6	47.4	6.92	70.0	54.9
4	8.91	127.8	82.7	7.44	80.1	52.7	8.67	93.0	53.2	5.93	73.2	55.8
5	9.44	103.2	66.9	9.39	104.5	63.2	5.75	74.9	51.0	6.19	64.4	43.4
6	6.98	108.1	53.3	8.78	93.3	60.9	7.49	96.5	55.1	6.56	64.8	45.0
7	7.49	109.4	61.9	8.67	91.8	57.9	6.10	83.9	46.8	5.24	56.6	37.5
8	11.09	100.8	54.1	8.97	86.8	66.9	6.24	82.4	50.2	7.70	77.2	60.3
9	7.20	93.8	63.2	9.66	91.1	64.1	7.50	66.8	49.7	6.64	75.9	53.2
10	9.17	86.1	62.1	7.58	79.2	53.4	5.21	63.2	39.7	8.54	80.1	59.4
11	8.20	107.7	71.9	7.40	79.3	46.2	8.77	69.8	51.8	8.26	83.2	49.5
12	7.78	115.7	60.5	8.45	55.0	46.3	6.31	79.0	47.3	5.48	71.1	49.6
13	6.01	121.2	68.9	8.33	90.6	70.5	5.05	70.7	45.2	6.79	80.3	57.1
14	8.10	87.6	51.8	5.54	89.8	61.2	5.77	65.5	44.8	5.87	69.6	57.8
15	8.88	92.7	62.3	6.90	63.6	47.7	4.52	62.3	38.0	8.18	69.5	46.9
16	6.67	95.7	63.8	9.40	92.0	59.7	8.15	78.0	55.4	7.01	68.8	46.2
17	6.92	78.1	56.8	6.13	81.2	52.8	8.70	71.1	43.0	6.33	86.6	58.5
18	12.27	91.7	69.8	6.98	77.8	58.7	6.56	59.8	44.6	7.62	68.1	59.4
Média	8.61	102.4	63.1	8.05	84.56	58.0	6.70	73.50	48.20	6.86	71.82	52.3
D.Pad	1.82	15.3	7.6	1.46	11.2	7.1	1.28	10.2	5.0	0.97	7.5	6.5

**Tabela 2 - Rugosidades das chapas jateadas na etapa AA2**

Pontos	Rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]											
	1ª série			2ª série			3ª série			4ª série		
	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz
1	9.21	92.9	61.4	6.76	63.8	42.7	6.73	50.5	42.22	7.61	60.8	47.9
2	6.03	63.1	44.0	7.32	52.5	36.9	4.43	59.3	43.6	5.71	50.9	41.6
3	8.46	117.3	63.7	5.02	61.7	41.8	10.09	65.9	48.1	5.77	66.9	45.5
4	5.79	95.4	49.4	7.49	72.0	50.4	6.15	62.1	39.2	4.78	46.8	27.3
5	7.73	73.8	53.8	4.99	70.3	40.7	7.32	97.5	51.9	6.14	68.9	50.4
6	7.38	79.1	47.5	5.87	62.9	48.8	5.39	67.0	41.6	5.56	62.1	46.8
7	7.60	70.7	48.3	6.86	77.2	48.7	5.24	45.7	33.3	6.60	63.6	48.3
8	7.39	72.0	54.7	5.95	61.1	41.7	4.65	47.9	40.8	6.32	50.6	43.4
9	6.94	78.6	53.3	4.73	79.5	37.2	6.08	57.5	36.0	5.55	68.5	52.5
10	7.27	80.2	54.7	6.14	59.0	38.1	5.30	54.5	40.1	5.71	59.5	42.3
11	6.02	116.7	64.3	6.12	63.2	42.8	5.03	56.5	41.7	5.98	69.9	52.1
12	6.64	55.0	43.2	6.20	76.4	51.2	4.22	60.5	42.1	6.96	58.8	36.3
13	8.11	61.9	46.8	6.22	58.1	45.2	5.80	58.1	40.7	5.65	57.0	42.7
14	6.43	86.7	47.3	5.64	75.8	48.6	6.02	70.4	43.9	5.48	63.2	40.7
15	8.59	76.6	55.7	5.57	46.7	37.2	5.11	62.8	39.9	6.33	65.5	43.8
16	6.11	58.4	41.7	5.57	54.1	39.2	5.81	53.6	37.5	4.53	56.8	37.0
17	8.48	80.3	55.4	4.52	57.5	36.0	5.46	83.4	47.0	3.86	69.8	51.3
18	5.75	61.6	40.5	4.61	68.1	43.3	5.42	68.1	40.8	7.50	65.0	50.9
Média	7.22	78.90	51.4	5.86	64.43	42.8	5.79	62.29	41.69	5.89	61.36	44.49
D.Pad	1.07	17.8	7.2	0.88	9.3	5.0	1.32	12.5	4.3	0.95	6.9	6.5

**Tabela 3 - Rugosidades das chapas jateadas na etapa CA1**

Pontos	Rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]											
	1ª série			2ª série			3ª série			4ª série		
	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz
1	10.81	101.9	66.7	6.00	118.3	60.7	6.89	66.6	46.0	5.55	61.6	46.6
2	6.66	87.9	48.9	7.05	91.6	46.8	7.83	87.0	60.7	8.25	76.1	57.2
3	9.21	93.2	64.6	7.03	62.3	49.8	4.53	64.5	42.5	5.06	71.1	49.4
4	7.89	99.1	69.3	8.29	89.2	66.5	6.42	86.2	47.4	5.43	52.8	35.9
5	7.05	85.3	59.0	9.27	93.8	63.3	7.78	105.1	64.6	6.37	60.9	36.8
6	6.42	97.6	57.5	8.38	61.8	43.6	11.10	82.3	53.8	6.39	75.4	49.8
7	10.19	88.4	51.2	10.20	99.6	72.0	6.04	82.7	58.7	6.98	67.9	41.4
8	10.48	75.0	49.2	6.73	105.0	57.5	7.27	94.9	59.6	7.10	69.7	47.2
9	8.30	90.2	59.4	8.35	81.1	52.6	6.34	100.8	33.0	7.73	88.3	62.4
10	7.71	101.9	49.2	7.31	90.5	53.2	6.07	60.9	43.7	7.4	106.5	46.4
11	8.01	121.1	49.7	8.14	77.3	58.1	8.60	87.2	51.9	5.20	60.1	44.1
12	9.42	117.3	61.5	6.36	88.0	47.9	7.96	69.2	54.7	5.35	56.2	39.4
13	10.71	122.1	75.1	7.50	79.1	50.6	7.03	66.9	54.0	5.38	87.7	45.3
14	12.64	122.3	66.8	7.01	98.8	56.4	7.76	72.5	51.4	4.97	72.2	52.5
15	11.16	108.8	56.1	7.38	83.6	67.6	5.98	80.0	49.5	6.14	67.6	44.7
16	9.62	113.4	69.7	9.02	88.1	67.7	8.77	112.4	60.9	8.22	99.4	50.7
17	11.76	112.9	63.9	8.80	108.1	59.4	6.97	68.4	47.8	7.07	54.9	40.4
18	7.50	86.7	58.0	7.82	93.2	60.9	5.87	88.9	54.5	9.33	61.5	42.4
Média	9.20	101.4	59.78	7.81	89.41	57.5	7.2	82.03	51.9	6.55	71.7	46.3
D.Pad	1.84	14.5	8.1	1.09	14.4	8.1	1.45	14.9	7.8	1.28	15.2	6.8

**Tabela 4 - Rugosidades das chapas jateadas na etapa CA2**

Pontos	Rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]											
	1ª série			2ª série			3ª série			4ª série		
	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz
1	7.26	80.2	59.9	5.98	55.0	38.0	4.88	52.8	34.3	5.39	55.3	35.0
2	6.51	76.6	62.3	4.95	82.0	57.6	5.18	64.5	41.1	4.51	47.5	36.5
3	7.75	72.4	46.1	6.05	64.9	46.0	5.00	60.2	46.0	5.74	66.5	44.7
4	5.61	78.2	58.3	3.71	98.4	44.0	6.31	64.6	40.4	7.03	71.1	47.9
5	6.64	85.1	60.5	4.95	58.3	36.7	6.57	50.8	42.5	5.82	69.0	34.4
6	5.87	61.6	44.6	7.68	66.5	56.3	7.29	54.0	41.5	6.63	69.5	50.0
7	6.07	66.4	48.6	5.37	75.9	46.4	5.58	63.5	43.9	4.53	61.8	41.6
8	5.51	76.4	45.3	5.11	68.9	46.6	6.22	68.1	38.9	5.72	58.2	42.8
9	7.51	61.3	40.1	8.13	81.3	57.5	6.37	58.8	36.4	7.19	69.8	51.5
10	7.32	55.9	40.2	4.70	68.8	51.1	5.54	53.1	37.4	5.80	54.7	37.7
11	5.94	86.6	60.1	5.71	59.2	43.1	7.96	81.8	53.6	6.37	60.6	39.3
12	8.01	68.9	52.6	6.81	58.2	47.6	5.71	63.1	41.1	5.43	63.6	44.1
13	6.82	63.5	47.7	6.75	66.6	42.5	4.00	60.4	43.7	6.35	53.6	42.7
14	6.68	60.3	39.2	7.67	54.0	42.2	5.97	67.1	44.8	5.86	50.4	37.5
15	9.00	78.6	66.1	4.77	59.3	47.7	6.18	71.7	47.1	4.09	50.3	36.4
16	9.07	87.8	59.4	7.65	81.6	49.6	6.75	57.0	46.6	6.88	51.1	48.4
17	6.23	108.8	68.9	7.41	73.0	44.8	6.69	91.2	48.0	5.75	49.0	35.9
18	7.43	68.1	50.2	6.13	73.3		4.46	55.9	38.8	5.63	60.6	56.4
Média	6.96	74.26	52.8	6.08	69.17	49.6	5.92	63.25	42.6	5.82	59.03	42.4
D.Pad	1.06	12.9	9.4	1.28	11.6	5.9	1.00	10.4	4.7	0.86	7.9	6.4

**Tabela 5 - Rugosidades das chapas jateadas na etapa AS1**

Pontos	Rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]											
	1ª série			2ª série			3ª série			4ª série		
	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz
1	4.57	82.5	39.3	8.43	59.6	47.1	6.39	77.6	56.6	6.99	71.2	40.4
2	5.98	76.3	49.3	5.98	78.8	54.8	7.91	86.3	46.1	4.68	68.6	39.0
3	8.89	83.7	55.2	7.76	96.0	59.1	9.20	40.2	32.9	5.45	82.0	38.9
4	7.10	85.3	57.9	6.34	67.2	43.8	6.01	72.2	38.0	5.14	59.4	36.1
5	7.82	105.9	58.0	6.38	67.0	49.8	7.21	74.2	44.2	5.40	66.7	40.0
6	6.29	75.4	46.7	7.26	73.0	40.4	6.93	68.3	48.8	4.62	49.8	40.0
7	6.03	70.7	41.5	5.24	58.7	47.2	7.06	64.1	43.5	5.42	76.1	43.9
8	6.74	85.2	53.5	6.42	82.5	48.0	5.07	53.5	38.6	5.16	58.7	46.3
9	4.79	81.9	51.0	6.51	88.7	50.1	5.60	72.6	38.5	5.15	57.4	40.3
10	6.20	90.9	48.6	6.61	64.1	42.5	7.18	74.5	50.4	5.67	64.7	40.8
11	7.03	76.5	58.4	5.32	67.9	44.1	6.39	86.7	44.6	8.51	74.8	53.4
12	5.80	75.2	57.3	7.10	67.7	43.6	7.70	73.2	38.8	4.57	61.2	39.4
13	4.06	69.8	50.1	4.89	60.9	39.8	9.87	91.4	62.4	7.39	86.8	55.7
14	5.63	60.7	42.2	5.97	72.4	35.5	9.06	99.5	48.9	4.72	61.3	39.1
15	4.81	90.9	45.0	5.72	65.6	41.0	5.12	58.7	40.8	4.87	73.1	42.2
16	6.64	74.6	49.3	5.98	69.8	49.3	5.03	56.4	33.2	4.70	74.0	46.3
17	7.46	81.6	55.2	6.73	60.0	40.9	6.39	65.6	40.4	5.53	74.8	44.6
18	5.21	96.8	55.5	5.30	75.4	45.6	6.35	78.5	52.3	6.22	67.7	40.2
Média	6.17	81.32	50.78	6.33	70.85	45.7	6.92	71.86	44.8	6.04	64.64	42.6
D.Pad	1.24	10.6	6.1	0.92	10.3	5.7	1.42	14.4	7.8	1.08	9.4	5.1

**Tabela 6 - Rugosidades das chapas jateadas na etapa AS2**

Pontos	Rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]											
	1ª série			2ª série			3ª série			4ª série		
	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz
1	4.38	46.1	36.1	4.87	41.5	28.6	4.87	58.1	37.7	5.99	52.4	36.3
2	5.19	59.4	41.5	6.76	58.3	40.6	5.35	58.0	37.0	4.74	43.4	38.4
3	4.28	61.1	39.3	4.56	59.6	37.7	5.69	63.4	45.1	4.95	51.5	32.2
4	5.66	74.7	42.0	4.35	42.8	34.2	3.96	49.1	35.3	4.53	50.2	40.5
5	6.05	53.3	40.1	5.69	59.4	44.5	4.88	68.8	42.1	5.95	53.4	41.6
6	5.73	68.8	40.5	5.86	64.4	41.8	5.21	52.6	34.5	5.23	44.2	35.1
7	4.70	73.2	42.7	6.02	58.2	40.3	6.47	50.0	39.3	4.55	53.3	41.3
8	6.18	53.5	43.5	4.05	45.1	34.3	4.15	70.9	36.2	4.24	50.6	31.0
9	5.92	54.0	44.3	6.14	61.4	43.3	3.83	53.6	33.8	5.04	44.0	33.3
10	6.30	50.7	36.0	5.48	61.7	37.9	4.84	45.2	33.9	3.53	50.1	35.2
11	5.43	51.7	41.0	5.24	49.2	38.9	3.57	45.5	35.4	4.78	44.5	41.3
12	5.41	49.3	37.7	4.84	59.7	36.5	5.37	50.1	39.1	4.72	52.4	38.9
13	4.73	62.7	45.3	5.07	84.6	39.8	3.92	40.7	35.1	4.93	48.0	34.4
14	5.58	49.3	36.7	5.33	60.9	36.2	3.74	54.4	38.4	3.99	47.7	46.7
15	4.23	55.7	41.2	5.72	66.0	36.7	7.90	50.2	36.5	6.01	38.2	25.7
16	6.12	63.5	48.0	6.18	56.5	40.0	4.77	49.5	36.9	5.51	51.6	42.6
17	6.63	76.5	43.3	7.06	74.6	46.9	5.15	52.3	37.7	4.79	38.2	32.7
18	5.73	60.8	39.4	4.54	49.1	40.7	5.64	52.0	35.9	4.27	44.4	30.1
Média	5.46	59.12	43.7	5.43	58.5	38.8	4.96	53.58	37.2	4.88	47.67	36.5
D.Pad	0.73	9.3	3.2	0.83	10.7	4.2	1.08	7.9	2.9	0.68	4.9	5.3

**Tabela 7 - Rugosidades das chapas jateadas na etapa CS1**

Pontos	Rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]											
	1ª série			2ª série			3ª série			4ª série		
	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz
1	7.01	55.2	46.2	4.49	54.7	30.0	3.55	51.8	26.9	6.30	59.9	45.6
2	6.17	62.8	49.8	5.52	60.0	44.8	2.89	53.4	36.2	4.95	42.4	34.5
3	7.50	82.4	56.5	6.13	79.4	47.9	6.91	86.2	49.3	6.80	47.2	37.2
4	5.87	58.7	41.5	6.49	61.6	45.0	5.51	49.0	34.4	9.93	71.1	59.2
5	6.71	72.7	39.1	6.20	68.7	50.4	4.70	64.0	45.1	6.55	59.0	49.2
6	5.85	77.1	54.0	4.84	61.5	43.4	3.70	82.4	46.5	5.82	64.2	45.8
7	6.67	74.7	47.2	5.93	94.3	49.5	4.41	55.0	43.0	4.71	61.8	53.4
8	11.06	81.6	61.6	5.20	64.6	45.5	7.30	77.4	40.5	4.07	56.0	31.7
9	5.88	90.5	42.2	5.97	43.5	33.0	5.16	72.4	40.4	7.53	43.2	
10	7.68	96.0	53.5	4.74	67.0	41.9	4.52	64.9	47.0	5.49	69.0	46.3
11	4.58	63.0	45.3	4.18	70.9	43.0	4.16	55.4	42.4	6.79	54.6	38.2
12	6.57	56.9	40.1	7.47	66.7	45.4	7.58	70.6	46.9	6.74	76.1	48.9
13	93.11	107.9	66.8	6.46	67.8	39.8	5.92	62.6	43.1	5.85	83.5	49.3
14	8.99	101.7	59.8	4.90	88.8	55.7	5.38	82.8	40.3	5.82	76.8	45.2
15	5.86	69.2	38.6	6.35	70.2	58.7	5.81	45.0	33.4	6.31	56.1	38.7
16	5.74	80.9	54.9	8.75	98.3	51.9	3.31	58.7	32.4	5.56	58.1	43.0
17	6.37	60.1	41.4	5.49	47.0	33.0	4.63	48.1	23.6	8.96	72.4	50.3
18	9.52	90.1	58.8	4.31	50.0	24.4	5.99	73.1	42.0	6.70	69.9	50.9
Média	11.73	76.75	47.54	5.75	67.50	43.52	4.97	64.04	39.6	6.38	62.29	45.1
D.Pad	11.64	16.0	8.7	1.16	15.1	8.9	1.35	12.9	7.1	1.41	11.6	7.0

**Tabela 8 - Rugosidades das chapas jateadas na etapa CS2**

Pontos	Rugosidade [ $\mu\text{m}$ ]											
	1ª série			2ª série			3ª série			4ª série		
	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz	Ra	Ry	Rz
1	3.74	52.2	32.4	7.52	67.22	43.5	6.42	46.6	32.0	4.40	48.8	29.1
2	3.60	61.3	34.6	5.23	70.6	43.7	3.94	59.3	34.6	4.74	46.1	37.6
3	5.32	74.8	37.6	5.37	38.8	33.1	4.68	63.8	34.9	5.79	69.0	29.2
4	4.86	48.3	32.5	5.32	60.7	46.8	4.37	67.1	36.2	5.68	53.7	40.5
5	4.20	50.9	39.9	5.06	54.8	33.1	4.43	52.3	35.0	4.74	51.5	29.3
6	6.65	57.6	41.4	4.11	54.0	39.7	4.75	66.4	46.7	5.17	57.3	39.4
7	6.16	53.7	37.6	6.74	84.2	43.3	6.50	55.4	31.3	4.40	63.0	38.4
8	4.45	55.2	45.5	6.05	45.9	35.0	5.55	59.0	50.3	4.23	50.5	35.4
9	7.24	80.7	47.7	4.53	49.0	39.7	4.06	63.8	33.8	6.99	60.5	39.8
10	5.08	51.1	38.1	5.53	70.6	40.7	6.60	40.1	29.8	4.99	55.9	31.7
11	5.80	73.3	39.2	4.39	72.7	37.1	5.48	71.0	36.4	5.35	52.0	36.0
12	4.79	77.1	43.7	4.06	50.8	33.3	4.25	43.0	37.8	5.45	65.6	40.2
13	5.94	66.4	41.0	6.60	54.3	33.9	5.88	49.2	41.3	6.22	52.9	35.7
14	5.50	76.3	35.0	4.41	68.5	46.6	4.14	47.4	38.9	4.42	77.4	51.6
15	6.23	59.5	43.6	4.92	53.2	35.3	4.67	42.3	27.5	6.49	60.3	42.7
16	4.90	79.4	34.4	4.36	78.8	41.1	8.18	76.3	42.8	5.27	55.2	36.3
17	4.42	52.1	36.1	5.16	42.1	32.3	7.58	68.7	38.0	4.49	50.5	37.1
18	5.80	52.5	36.4	7.87	77.1	39.0	6.33	61.6	45.2	4.41	48.1	37.4
Média	5.26	62.35	38.71	5.40	60.74	38.7	5.43	57.40	36.8	5.18	56.57	37.1
D.Pad	0.99	11.5	4.4	1.14	13.4	4.8	1.27	10.8	6.0	0.80	8.1	5.4