

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

BRUNO FERREIRA LUZZI

HELOISE NAOMI OKURA

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE
REVESTIMENTOS INTERMETÁLICOS FE-AL USANDO ENSAIO DE
RODA DE BORRACHA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2012

BRUNO FERREIRA LUZZI

HELOISE NAOMI OKURA

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE
REVESTIMENTOS INTERMETÁLICOS FE-AL USANDO ENSAIO DE
RODA DE BORRACHA**

Monografia do Projeto de Pesquisa apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para aprovação na disciplina.

Orientador: Prof. Dr. Ossimar Maranhão

CURITIBA

2012

AGRADECIMENTOS

A Deus, nosso porto seguro.

Aos nossos pais, pelo suporte dado durante esta fase de nossas vidas.

A nossos familiares e pessoas intimamente ligadas às nossas vidas, por todos os conselhos, compreensão e carinho.

Aos nossos orientadores, pela paciência, atenção e conhecimento compartilhado durante o projeto.

Aos amigos – professores e alunos – que nos ajudaram e incentivaram durante este período.

Ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Mecânica, pelos recursos disponibilizados para a execução do projeto.

E à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, por todos os recursos e infraestrutura disponibilizada para nossa formação acadêmica e pessoal.

RESUMO

Desgaste e corrosão, sejam de produtos acabados ou de equipamentos de industriais, são preocupações constantes dos mais diversos segmentos industriais. Uma maneira de atenuar o problema é a utilização de camadas superficiais protetoras que sejam resistentes às condições de trabalho nesses ambientes, como, por exemplo, as camadas formadas por intermetálicos ferro-alumínio. Em trabalho prévio, estudaram-se os efeitos de se utilizar atmosfera controlada para difusão do alumínio aspergido em uma barra de aço ABNT 1020, no que diz respeito à homogeneidade, dureza e espessura da camada de intermetálicos formada. Este trabalho teve como objetivo avançar no estudo dessas camadas através da avaliação do desgaste abrasivo, por meio de ensaios com um abrasômetro tipo roda de borracha. Foi possível identificar a influência do teor de alumínio na liga, da fragilidade e porosidade na resistência ao desgaste, sendo que a camada que menos apresentou as características citadas apresentou o melhor desempenho nos ensaios de desgaste.

Palavras-chave: intermetálico Fe-Al, plasma, desgaste abrasivo, roda de borracha.

ABSTRACT

Wear and corrosion of final products and industrial equipments are frequent concerns for the various industrial segments. An alternative to attenuate this problem is the use of protective superficial layers which are resistant to working conditions in these environments, as for example Fe-Al intermetallics layers. In a previous study, the effects of using controlled atmosphere in the diffusion treatment of sprayed aluminum in ABNT 1020 steel were analyzed, especially regarding the homogeneity, hardness and thickness of the intermetallic layer formed. The objective of this project was to progress in these layers study by wear abrasion evaluation using rubber wheel tests. It was possible to identify the influence of aluminum content, fragility and porosity in wear resistance, whereas the intermetallic layer which less exhibited the mentioned characteristics had the best performance in the abrasion tests.

Keywords: Fe-Al intermetallics, plasma, abrasive wear, rubber wheel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Camadas de intermetálicos obtidas em tratamento de difusão a 1100°C e 1 hora em (a) atmosfera não controlada e (b) atmosfera controlada	13
Figura 2 – Secção transversal da pistola de aspersão por chama com material de alimentação em forma de arame.....	16
Figura 3 – Diferença dos constituintes entre um gás não-ionizado e o plasma.....	17
Figura 4 – Interações plasma superfície.....	18
Figura 5 – Esquema representativo do reator de plasma.....	19
Figura 6 – Diagrama de fases da liga Fe-Al	21
Figura 7 – Desenho esquemático de um abrasômetro tipo roda de borracha.....	23
Figura 8 – Mecanismos de desgaste abrasivo	25
Figura 9 – (a) Marcas de desgaste abrasivo por riscamento e (b) de desgaste abrasivo por rolamento.....	27
Figura 10 – Relações entre taxas de remoção e propriedades mecânicas	28
Figura 11 – Influência da quantidade de alumínio das ligas Fe-Al na taxa de desgaste abrasivo (a) e na dureza (b).....	30
Figura 12 – Fluxograma da execução do projeto de pesquisa.	32
Figura 13 – Barra de aço com camada de alumínio aspergido (ERBESDOBLER, 2010).....	33
Figura 14 – Esquema para medição da camada na barra 01.....	34
Figura 15 – Esquema para medição da camada na barra 02.....	34
Figura 16 – Distribuição aproximada dos pontos de medição das espessuras.	36
Figura 17 – Reator de plasma (ERBESDOBLER, 2010).....	39
Figura 18 – Vista explodida do conjunto formado pelo suporte, recipiente, amostras e tampa para os tratamentos térmicos a 700°C.	41
Figura 19 – Vista explodida do conjunto formado pelo suporte, recipiente, amostra e tampa para os tratamentos térmicos a 900°C e 1050°C.	41

Figura 20 – Aspecto do conjunto dentro do reator durante o tratamento térmico.....	43
Figura 21 – (a) Limpadora de amostras Struers Metason 60 T e (b) secadora metalográfica Struers Drybox-2.....	44
Figura 22 – Abrasômetro tipo roda de borracha.....	45
Figura 23 – Sequência de corte para análise das espessuras de intermetálicos.	46
Figura 24 – Corte para medição de microdureza e análise da composição dos intermetálicos.	47
Figura 25 – Lixadeira/Politriz automática Buehler AutoMet 250.	48
Figura 26 – Método para medir a espessura média da camada na amostra 2.700.350	
Figura 27 – Representação dos perfis de microdureza realizados nas amostras.	51
Figura 28 – Amostras desgastadas, tratadas a 700°C, 900°C e 1050°C (da esquerda para a direita)	52
Figura 29 – Foto e linha base para a análise de EDX da amostra 2.700.3.	56
Figura 30 – Resultado da análise de EDX da amostra 2.700.3.....	56
Figura 31 – Foto e linha base para a análise de EDX da amostra 4.900.¼.	57
Figura 32 – Resultado da análise de EDX da amostra 4.900.¼.....	57
Figura 33 – Foto e linha base para a análise de EDX da amostra 9.1050.¼	58
Figura 34 – Resultado da análise de EDX da amostra 9.1050.¼.....	58
Figura 35 – Camada de intermetálico Fe-Al original (sem desgaste), com aumento de (a) 100x e de (b) 200x, para a amostra 2.700.3.	60
Figura 36 – (a) Camada com desgaste menos profundo e (b) camada com desgaste mais profundo (vale), com aumento de 100x, para a amostra 2.700.3.	60
Figura 37 – Impressões de microdureza no perfil 2 da amostra 2.700.3.....	61
Figura 38 – Camada de intermetálico Fe-Al original (sem desgaste), com aumento de (a) 100x e de (b) 200x, para a amostra 4.900.¼.	62
Figura 39 – (a) Camada com desgaste menos profundo e (b) camada com desgaste mais profundo (vale), com aumento de 100x, para a amostra 4.900.¼.	62

Figura 40 – Impressões de microdureza no perfil 2 da amostra 4.900.¼.....	63
Figura 41 – Camada de intermetálico Fe-Al original (sem desgaste), com aumento de (a) 100x e de (b) 200x, para a amostra 9.1050.¼.	64
Figura 42 – (a) Camada com desgaste menos profundo e (b) camada com desgaste mais profundo (vale), com aumento de 100x, para a amostra 9.1050.¼.	64
Figura 43 – Impressões microdureza no perfil 2 da amostra 9.1050.¼.....	65
Figura 44 – Microdurezas para as amostras 2.700.3, 4.900.¼ e 9.1050.¼, e seus respectivos desvios padrões por ponto de análise.....	67
Figura 45 – Desenho do suporte para o termopar e recipientes (unidade: mm).	76
Figura 46 – Recipiente para tratamentos das amostras a 700°C (unidade: mm).	77
Figura 47 – Tampa do recipiente para tratamentos das amostras a 700°C (unidade: mm).	77
Figura 48 – Recipiente para tratamentos das amostras a 900°C e 1050°C (unidades: mm).	78
Figura 49 – Tampa do recipiente para tratamentos das amostras a 900°C e 1050°C (unidades: mm)	78
Figura 50 – Gráficos do coeficiente de atrito e das forças normais e tangenciais durante o ensaio de desgaste da amostra 2.700.3.	89
Figura 51 – Gráficos do coeficiente de atrito e das forças normais e tangenciais durante o ensaio de desgaste da amostra 4.900.¼.	91
Figura 52 – Gráficos do coeficiente de atrito e das forças normais e tangenciais durante o ensaio de desgaste da amostra 9.1050.¼.	93
Figura 53 – Impressões de microdureza no perfil 1 (a) e perfil 3 (b) da amostra 2.700.3.	94
Figura 54 – Impressões de microdureza no perfil 1 (a) e perfil 3 (b) da amostra 4.900.¼.	94
Figura 55 – Impressões de microdureza no perfil 1 (a) e perfil 3 (b) da amostra 9.1050.¼.	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dureza Vickers dos principais intermetálicos Fe-Al.....	22
Tabela 2 – Taxas de desgaste de intermetálicos e aços abradados contra partículas abrasivas.....	31
Tabela 3 - Valores medidos em estado de fornecimento.	35
Tabela 4 – Comparação entre os parâmetros de ensaio de desgaste adotados e da norma regente.....	45
Tabela 5 – Perda de massa média das amostras ensaiadas.	54
Tabela 6 – Tamanho das espessuras das camadas originais e desgastadas.....	55
Tabela 7 – Microdurezas medidas para cada perfil da amostra 2.700.3.	61
Tabela 8 – Microdurezas medidas para cada perfil da amostra 4.900.¼.	63
Tabela 9 – Microdurezas medidas para cada perfil da amostra 9.1050.¼.	65
Tabela 10 – Orçamento do projeto.....	74
Tabela 11 – Valores medidos na pesagem das amostras antes do ensaio de desgaste abrasivo.....	87
Tabela 12 – Valores medidos na pesagem das amostras após os ensaios de desgaste abrasivo.....	87
Tabela 13 – Tabela com forças normais e tangenciais e coeficiente de atrito durante ensaio de desgaste da amostra 2.700.3.	88
Tabela 14 – Forças normais e tangenciais e coeficiente de atrito durante ensaio de desgaste da amostra 2.700.3.....	90
Tabela 15 – Forças normais e tangenciais e coeficiente de atrito durante ensaio de desgaste da amostra 9.1050.¼.....	92
Tabela 16 – Resultados dos ensaios para amostras tratadas a 700°C.....	95
Tabela 17 – Resultados dos ensaios para amostras tratadas a 900°C.....	95
Tabela 18 – Resultados dos ensaios para amostras tratadas a 1050°C.....	96

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Contexto do Tema e Caracterização do Problema	12
1.2	Objetivos	13
1.3	Justificativa	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Aspersão térmica	15
2.2	Tratamento térmico de difusão em Reator de Plasma	16
2.2.1	Plasma	16
2.2.2	Aquecimento em um reator de plasma	17
2.2.3	O reator de plasma	18
2.3	Intermetálicos	20
2.4	Abrasômetro tipo roda de borracha	22
2.5	Formas de desgaste	24
2.5.1	Desgaste Abrasivo	24
2.5.2	Resistência ao desgaste abrasivo	27
2.5.3	Efeitos do material no desgaste abrasivo	27
2.6	Desgaste de intermetálicos	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	Aspersão de alumínio em pó	32
3.2	Preparação das amostras para tratamento de difusão	33
3.2.1	Amostras no estado de fornecimento	34
3.2.2	Controle das espessuras de depósito	35
3.3	Seleção de temperatura e tempo de tratamento de difusão	37
3.4	Nomenclatura das amostras	37
3.5	Tratamento térmico de difusão no reator de plasma	38
3.5.1	Preparação para os tratamentos	40
3.5.2	Ordem de tratamento	42
3.5.3	Processo utilizado durante os tratamentos	42
3.6	Ensaio de desgaste	44
3.6.1	Preparação pós-tratamento térmico	44
3.6.2	Execução dos ensaios de desgaste abrasivo	44
3.7	Preparação das amostras para análise metalográfica e microdureza	46
3.8	Análise metalográfica e microdureza	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
4.1	Ensaio de desgaste abrasivo	52
4.2	Cálculo do tamanho das espessuras	55
4.3	Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDX)	55
4.4	Análise metalográfica e microdureza	60
4.4.1	Amostras tratadas a 700°C	60
4.4.2	Amostras tratadas a 900°C	62
4.4.3	Amostras tratadas a 1050°C	64
5	CONCLUSÕES	68
6	REFERÊNCIAS	69
	APÊNDICE A – CRONOGRAMA DO PROJETO	73

APÊNDICE B – ORÇAMENTO DO PROJETO	74
APÊNDICE C – ESPESSURAS EM CONDIÇÕES INICIAIS, ITERAÇÕES, ESPESSURAS MÉDIAS PARCIAIS E A CONDIÇÃO FINAL APROXIMADA DA CAMADA DE ALUMÍNIO	75
APÊNDICE D – SUPORTE PARA O TERMOPAR E RECIPIENTES PARA O TRATAMENTO TÉRMICO NO REATOR DE PLASMA	76
APÊNDICE E – TABELAS DE AQUECIMENTOS DAS AMOSTRAS DURANTE OS TRATAMENTOS TÉRMICOS	79
APÊNDICE F – VALORES MEDIDOS NA PESAGEM DAS AMOSTRAS ANTES E DEPOIS DOS ENSAIOS DE DESGASTE	87
APÊNDICE G – COEFICIENTES DE ATRITO INSTANTÂNEOS ENTRE RODA DE BORRACHA E AMOSTRAS 2.700.3, 4.900.¼ E 9.1050.¼, E FORÇAS NORMAIS E TANGENCIAIS DA CÉLULA DE CARGA DURANTE OS ENSAIOS DE DESGASTE	88
APÊNDICE H – PERFIS 1 E 3 DE DUREZA NAS AMOSTRAS 2.700.3, 4.900.¼ E 9.1050.¼	94
APÊNDICE I - DIFERENÇAS EM MASSA, DIÂMETRO DA RODA DE BORRACHA APÓS O USO, PERDA DE MASSA AJUSTADA, PERDA DE MASSA MÉDIA E DESVIO PADRÃO EM CADA CONDIÇÃO DO TRATAMENTO DE DIFUSÃO	95

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema e Caracterização do Problema

A avaliação e caracterização da resistência ao desgaste abrasivo em camadas protetoras superficiais são de fundamental importância. Este fenômeno, somado ao desgaste erosivo, à cavitação e à corrosão, vem causando enormes prejuízos de cunho operacional e, em consequência, financeiro aos setores das indústrias mecânica e petroquímica.

A princípio, uma das maneiras para a minimização destes problemas se dá através do revestimento do componente mecânico por outro material, no intuito de otimizar suas propriedades mecânicas para dificultar o surgimento de falhas ou deterioração do mesmo antes do previsto ou de forma crítica.

Nesse contexto, Silva e Gmach (2008) estudaram dois métodos de obtenção de camadas de intermetálicos Fe-Al: o primeiro utilizando corpos de prova de aço ABNT 1020 com alumínio aspergido e o segundo barras de alumínio inseridas sob pressão em tubos de aço ABNT 1020. As camadas foram obtidas tratando as amostras em forno elétrico convencional, ou seja, sem controle da atmosfera de tratamento. Elas apresentaram bons resultados quanto às durezas, porém não se formaram de maneira homogênea.

Erbesdobler (2010) deu continuidade à pesquisa de Silva e Gmach (2008) através do estudo de camadas de intermetálicos Fe-Al formadas em corpos de prova de aço ABNT 1020 aspergidas com alumínio e submetidas a tratamento térmico de difusão em reator de plasma, ou seja, em atmosfera controlada. Com seu estudo foi possível avaliar, além dos efeitos da atmosfera de tratamento, o efeito dos parâmetros espessura de depósito, tempo e temperatura do tratamento de difusão na dureza e homogeneidade das camadas. Verificou-se que o processo de difusão é mais rápido em atmosfera controlada do que em não controlada, resultando em camadas mais homogêneas para mesmas condições de tratamento, como pode-se observar na Figura 1.

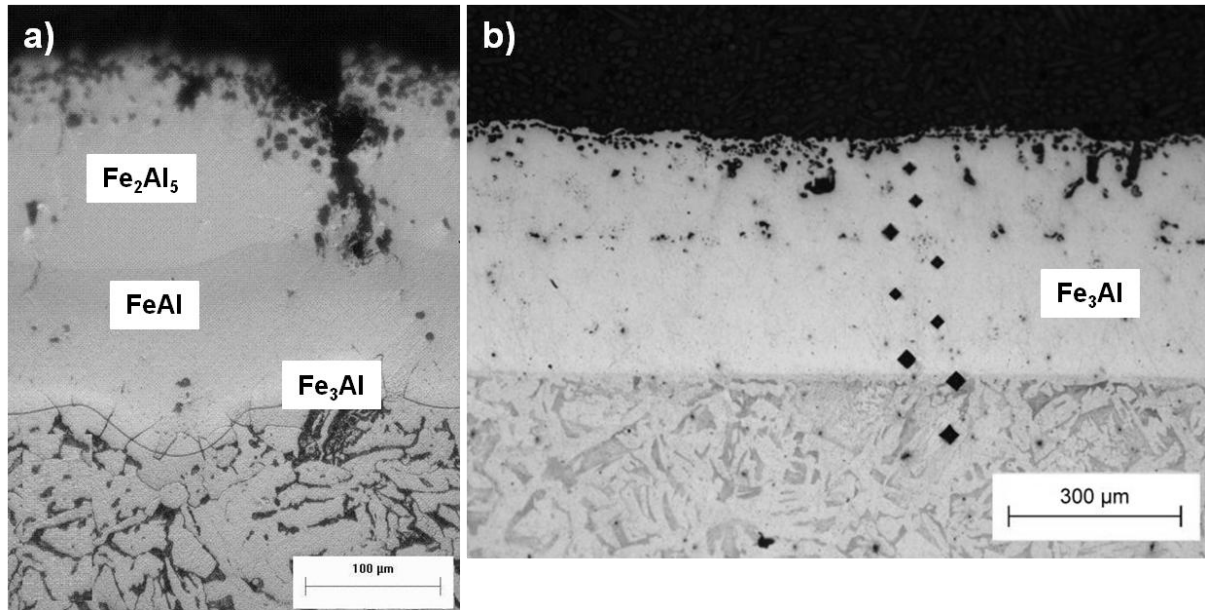


Figura 1 – Camadas de intermetálicos obtidas em tratamento de difusão a 1100°C e 1 hora em (a) atmosfera não controlada e (b) atmosfera controlada

Fonte: (a) adaptado de Silva e Gmach (2008, p. 61); (b) Erbesdobler (2010, p. 64)

A partir destes resultados e dentro do contexto citado, considera-se importante e uma ótima oportunidade para continuidade dos estudos iniciados por Silva e Gmach (2008) e Erbesdobler (2010) a avaliação da resistência ao desgaste abrasivo dessas camadas intermetálicas utilizando um abrasômetro tipo roda de borracha, sendo esta mais uma das etapas para a caracterização das mesmas a fim de ter conhecimento sobre suas propriedades e avaliar em que contexto teriam boa aplicação.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste projeto é caracterizar a resistência ao desgaste, em ensaio de roda, de camadas de intermetálicos Fe-Al formadas por aspersão térmica e difusão em reator de plasma. Dessa forma, para a formação das camadas de intermetálicos serão tomados como base os ciclos de processamento desenvolvidos no trabalho de Erbesdobler (2010) e aplicados ensaios em um abrasômetro tipo roda de borracha que foi construído por Franchin, Baratieri e Molleta (2009), de modo a atender a ASTM G65 – 04 (Reaprovada 2010).

1.3 Justificativa

As camadas superficiais compostas por intermetálicos Fe-Al apresentam boa resistência contra compostos de enxofre (PAREDES; D'OLIVEIRA; CAPRA, 2001), bem como alta eficiência contra a corrosão e a oxidação (CAPRA, 2005). Por isso, o uso de intermetálicos Fe-Al encontra aplicações nas indústrias de componentes de equipamentos para a extração de petróleo, proteção de paredes de tubos, turbinas, entre outros. Possuem, também, boas propriedades mecânicas como microdureza e adesão, excelente capacidade de lubrificação, bom recobrimento da superfície, baixa porosidade e excelente resistência ao desgaste abrasivo (SENDEROWSKI et al., 2010).

Os diferentes processos de obtenção das camadas e os parâmetros utilizados em cada processo são fatores determinantes nas características das camadas resultantes, sendo que o estudo de novas técnicas proporciona descobertas de novas aplicações para esses materiais. Além disso, sempre há a busca de técnicas que venham a suprir detalhes de fabricação que possam complementar os atualmente existentes, bem como a contribuir para a sempre desejada redução nos custos de fabricação de componentes.

Junto com os resultados obtidos por Erbesdobler (2010), espera-se ter conhecimento se o processo de aspensão térmica seguida de difusão em reator de plasma produz camadas que além de homogêneas sejam também resistentes ao desgaste abrasivo, satisfazendo as condições em que serão aplicadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspersão térmica

A aspersão térmica consiste na deposição de camadas de materiais metálicos ou não metálicos sobre uma superfície previamente preparada (CAPRA, 2005), visando à proteção do material a ser revestido.

O material do revestimento é fundido por uma fonte de calor química ou elétrica e impulsionado por jatos de ar comprimido ou outros gases na direção da superfície a ser revestida. As partículas aspergidas aderem ao substrato por mecanismos de natureza mecânica, químico-metalúrgica e física conforme a temperatura da fonte de calor e a velocidade das partículas. A estrutura das camadas é formada por lamelas sobrepostas, devido ao achatamento que resulta do impacto das partículas de pó fundidas ou semi-fundidas com o substrato, óxidos e poros (MARANHO, 2006).

Existem vários processos de aspersão térmica, sendo os principais: aspersão a chama convencional (Flame Spray – FS), aspersão por detonação (Detonation Gun – D-Gun), aspersão a chama hipersônica (High Velocity Oxygen Fuel – HVOF), aspersão a arco elétrico (Arc Spraying – ASP), aspersão a plasma (Atmospheric Plasma Spraying – APS) e aspersão a frio (Cold Gas Spraying – CGS) (MARANHO, 2006).

As amostras utilizadas nesse trabalho foram aspergidas com o processo a chama convencional, o qual utiliza o calor gerado pela combustão de gases para fundir o material de deposição, que é introduzido na forma de pó ou arame em uma pistola, como a ilustrada na Figura 2.

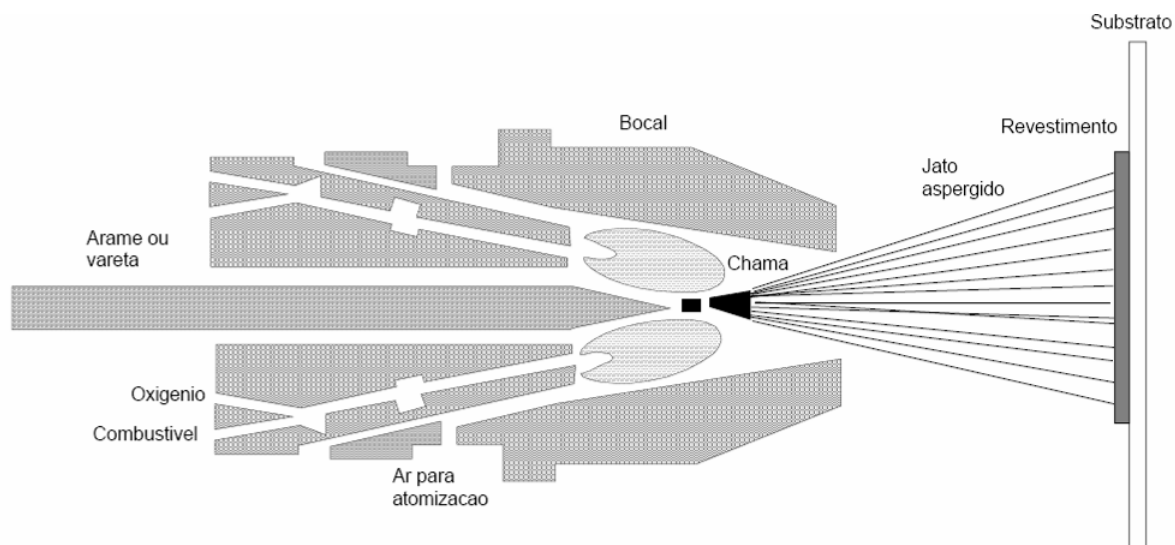


Figura 2 – Seção transversal da pistola de aspersão por chama com material de alimentação em forma de arame

Fonte: SILVA e GMACH (2008, P. 21)

O material de deposição é fundido no bocal da pistola e aspergido por um fluxo de ar comprimido, que pode ser substituído por gases inertes quando se deseja menor oxidação ou, no caso do material em pó, a aspersão pode ser feita pelos próprios gases de combustão.

2.2 Tratamento térmico de difusão em Reator de Plasma

2.2.1 Plasma

O plasma pode ser definido como o 4^o estado da matéria e é obtido ionizando parcialmente um gás para que seus elementos se constituam em moléculas e átomos neutros, íons e elétrons (IPP – MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK, 2011).

O plasma conduz eletricidade (IPP – MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PLASMAPHYSIK, 2011) e pode ser utilizado para elevar a temperatura de componentes mecânicos devido ao bombardeamento da superfície por partículas de alta energia cinética.

O grau de ionização é um parâmetro importante na caracterização dos plasmas, sendo que em tratamentos onde não se deseja a alteração do estado físico

da superfície, como na nitretação, ou o simples aquecimento em ambiente inerte, a relação taxa de ionização é de cerca de uma partícula carregada para dez mil partículas neutras, o que leva este tipo de plasma a ser denominado de pouco ionizado (CHAPMAN, 1980). A ionização do gás é feita aplicando uma diferença de potencial entre dois eletrodos que são mantidos no ambiente gasoso, hermeticamente fechado e a baixa pressão. E ele passará a se comportar como plasma a partir do momento em que a energia cinética dos elétrons exceda o potencial que os átomos ou moléculas têm para ionizar [CHAPMAN, 1980 apud PERIN; BINDER; KLEIN, 2006], assim passará a ter forma como mostra a Figura 3.

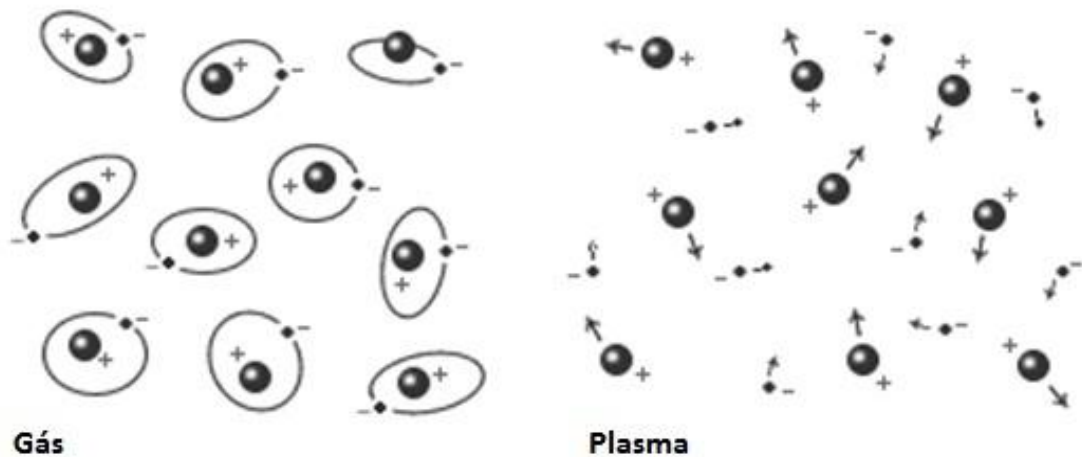


Figura 3 – Diferença dos constituintes entre um gás não-ionizado e o plasma

Fonte: IPP – Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (2011)

2.2.2 Aquecimento em um reator de plasma

O emprego deste equipamento para o processamento de materiais e especialmente superfícies vem sendo cada vez mais difundida em virtude dos menores tempos que tais materiais permanecem em tratamento se comparado aos fornos convencionais.

O aquecimento da amostra (cátodo) se dará em virtude das colisões entre as partículas eletricamente carregadas e as partículas neutras que gera dissipação de calor (ERBESDOBLER, 2010). Quando essas partículas são bombardeadas contra a superfície, cerca de 90% [AHMED, 1987 apud JUNIOR, 2011] da energia delas é

transferida sob a forma de calor, como mostra a Figura 4, para o aquecimento da amostra, sendo que parte dela será perdida na forma de radiação, condução e convecção.

Para qualquer que seja o cátodo e o gás utilizado é possível calcular a eficiência do aquecimento dividindo o calor perdido pelo aquecimento pela potência fornecida pela descarga (produto da voltagem aplicada entre os eletrodos e a corrente que os atravessa).

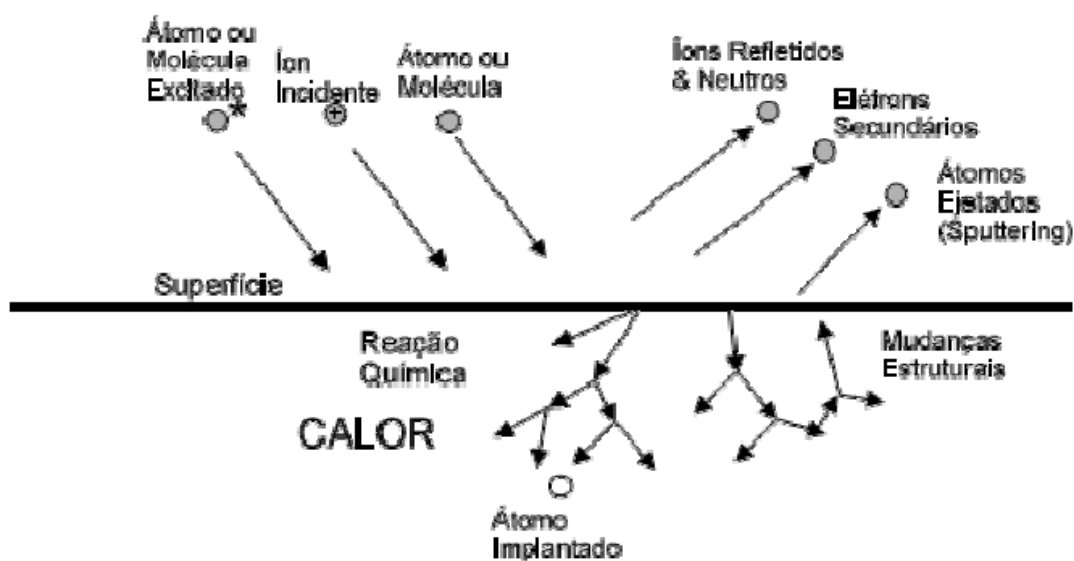


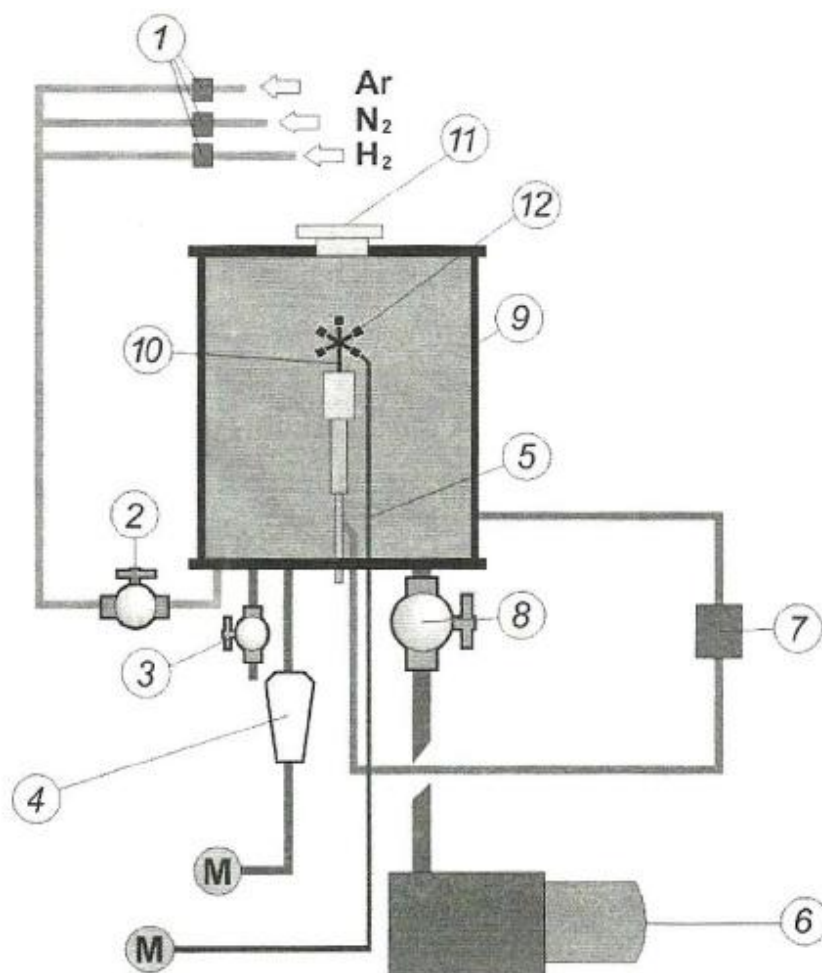
Figura 4 – Interações plasma superfície

Fonte: Erbesdobler (2010, P. 27)

2.2.3 O reator de plasma

Todo o aparato do reator de plasma para o tratamento de difusão deve consistir de uma fonte de abastecimento para a mistura gasosa, regulada através de fluxímetros nos dutos de entrada da câmara de tratamento. Antes da entrada dos gases, deve se obter vácuo no interior da câmara, através de uma bomba mecânica de sucção com válvula de controle do vácuo. Como a transformação de gás comum para gás ionizado deve ser realizada sob condições específicas de pressão deve haver um sensor de pressão conectado à câmara. Além disso, deve existir uma fonte de tensão para aplicar-se entre os eletrodos (em geral peça e paredes da câmara)

diferença de potencial que manterá a alimentação da descarga elétrica. E, por fim, no interior da câmara, centralizada à mesma, deve haver um porta amostra, como ilustra a Figura 5, sob o qual está montado um sensor de temperatura (termopar).



- | | |
|--|-----------------------------------|
| 01 - Fluxímetros | 07 - Fonte de tensão pulsada |
| 02 - Válvula da entrada da mistura | 08 - Válvula do controle do vácuo |
| 03 - Válvula para quebra do vácuo | 09 - Câmara de nitretação |
| 04 - Medidor de pressão | 10 - Porta amostra |
| 05 - Medidor de temperatura (termopar) | 11 - Janela para observação da de |
| 06 - Bomba mecânica | 12 - Amostras |

Figura 5 – Esquema representativo do reator de plasma

Fonte: Erbesdobler (2010, P. 43)

2.3 Intermetálicos

Um dos critérios de classificação dos materiais sólidos diz respeito à maneira como seus átomos estão organizados, podendo ser cristalinos, não-cristalinos (ou amorfos) ou uma mistura de ambos. Os materiais cristalinos são aqueles nos quais os átomos estão arranjados de maneira ordenada entre si por grandes distâncias atômicas, ou seja, existe uma estruturação tridimensional padrão que se repete ao longo de uma boa quantidade de átomos, sendo que algumas propriedades dos materiais são diretamente ligadas à maneira como esses átomos estão organizados.

Composto intermetálico é uma classe de materiais que consiste de uma liga de fases ordenadas, formada por dois ou mais elementos metálicos, onde diferentes átomos ocupam pontos específicos na rede cristalina (ERBESDOBLER, 2010). Compostos que contenham átomos vizinhos diferentes formam fases que resistem ao cisalhamento, pois, em geral, o deslizamento destruiria a ordenação preferencial entre os átomos diferentes. Elas são, portanto, duras e frágeis (VAN VLACK, 1984). Em geral, intermetálicos possuem ligações metálicas e covalentes dependendo dos tipos de constituintes. Devido a estas características as propriedades dos intermetálicos são altamente influenciadas por pequenas mudanças no sistema. Isto quer dizer que variações na composição podem significar alterações na tenacidade e ductilidade do intermetálico formado (ERBESDOBLER, 2010).

Em termos de suas propriedades, compostos intermetálicos são geralmente considerados como uma classe de materiais entre metais e cerâmicas devido às suas ligações atômicas. Intermetálicos são intrinsecamente resistentes, com alto módulo de elasticidade. Sua estrutura ordenada e ligações atômicas também dão origem a baixos coeficientes de difusão e conseqüentemente maior estabilidade das propriedades controladas pela difusão. Como as cerâmicas, entretanto, a maior desvantagem dos intermetálicos é a sua baixa ductilidade, particularmente a temperaturas baixas e intermediárias (SMALLMAN; BISHOP, 1999).

A Figura 6 apresenta o diagrama Fe-Al, no qual se verifica que cinco tipos de intermetálicos estáveis podem ser formados: Fe_3Al , FeAl , FeAl_2 , Fe_2Al_5 e FeAl_3 , sendo que a formação desses intermetálicos está relacionada à temperatura e ao tempo de difusão. Outro fator importante é o coeficiente de difusão entre ferro e

alumínio, que no caso da utilização de substratos de aço, sofre influência do teor de carbono e elementos de liga presentes na liga.

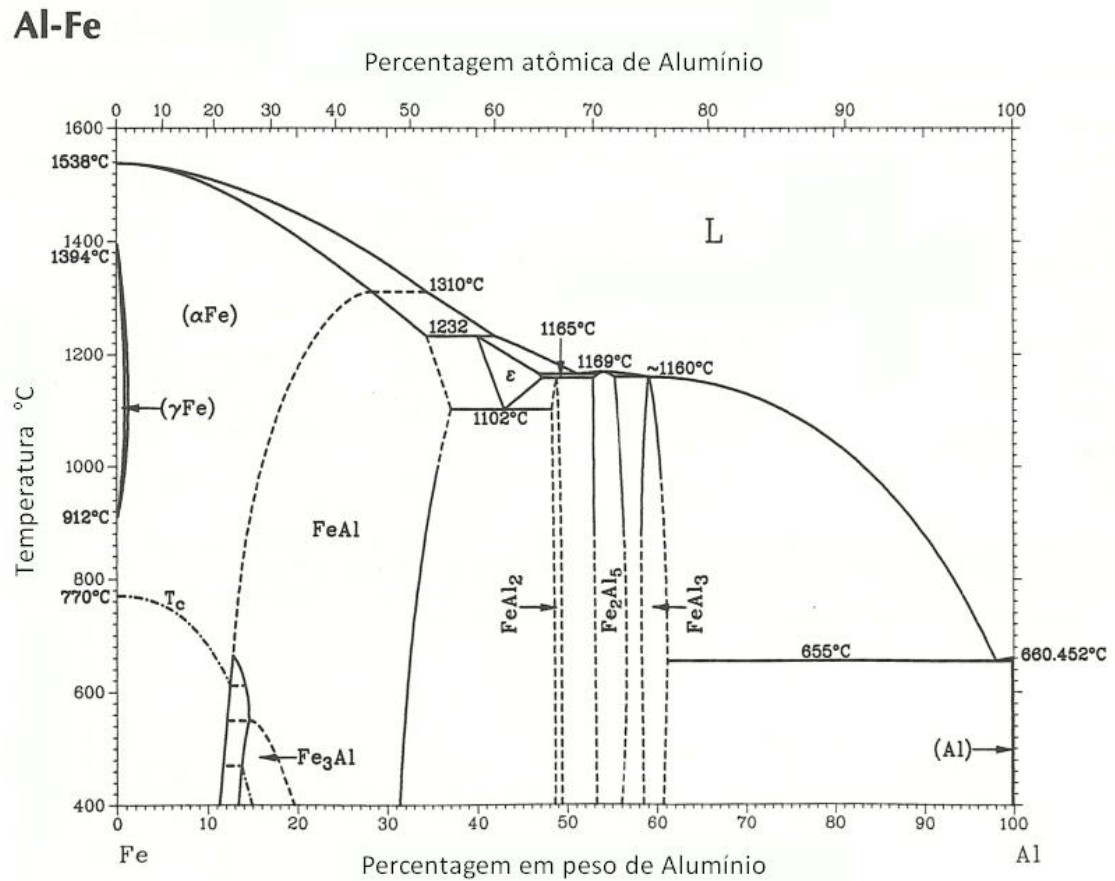


Figura 6 – Diagrama de fases da liga Fe-Al

Fonte: ASM Handbook (2007, Seção 1, P. 27)

Estudos realizados por Paredes et al. (2003) mostram que quanto maior a quantidade de alumínio no composto, maior a dureza do mesmo, sendo os valores obtidos por ele apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Dureza Vickers dos principais intermetálicos Fe-Al

Intermetálico	Porcentagem de Alumínio	Dureza Vickers
FeAl ₂ , Fe ₂ Al ₅ e FeAl ₃	49,00% a 63,00%	1000
FeAl	32,60%	420 a 520
Fe ₃ Al	13,90%	250 a 350

Fonte: Paredes et al. (2003, P. 4)

A utilização dos intermetálicos FeAl₂, Fe₂Al₅ e FeAl₃ é problemática devido à fragilidade dos mesmos. Já os compostos Fe₃Al e FeAl podem ser usados como materiais estruturais pois possuem boa resistência ao desgaste, à oxidação, à corrosão e propriedades relativas à resistência mecânica (KOBAYASHI; YAKOU, 2002).

2.4 Abrasômetro tipo roda de borracha

O desgaste abrasivo tem sido foco de muitos estudos devido à sua importância na indústria mundial. Estima-se que 50% de todos os problemas relacionados a desgaste na indústria são devido à abrasão, e como tal, muitos trabalhos de laboratório têm examinado e procurado racionalizar o comportamento em desgaste abrasivo de uma grande gama de materiais [EYRE, 1976 apud WIROJANUPATUMP; SHIPWAY, 2000]. Sendo assim, muitos métodos de teste têm sido desenvolvidos.

De forma ampla, os métodos de teste podem ser divididos entre aqueles que visam que o abrasivo mova-se solto enquanto passa sobre o corpo de prova (comumente denominado abrasão a três corpos) e aqueles nos quais o abrasivo está engastado enquanto desloca-se sobre o corpo de prova (comumente denominado abrasão a dois corpos). A configuração de teste mais comumente utilizada para abrasão a três corpos é aquele englobado pela norma ASTM G65 – 04 (2010), conhecido como ensaio de roda de borracha com areia seca (DSRW – dry-sand rubber wheel) (NAHVI; SHIPWAY; McCARTNEY, 2009).

Nesse ensaio, o corpo de prova (plano) é submetido a um carregamento contra a roda de borracha, que gira a uma velocidade constante, e um fluxo constante de abrasivo, no caso areia, é introduzido na interface. O sentido de rotação da roda no arco de contato com o corpo de prova é o mesmo que o do fluxo de areia, o carregamento é aplicado através de um braço de alavanca e um peso morto, de modo que fique normal à superfície de teste do corpo de prova e sobre a linha diametral horizontal da roda de borracha. A amostra é pesada antes e depois do ensaio para se obter a perda de massa e, devido às diferentes densidades dos materiais, calcula-se o volume perdido para ser apresentado como resultado do ensaio (ASTM INTERNATIONAL, 2010). Um desenho esquemático do dispositivo é apresentado na Figura 7.

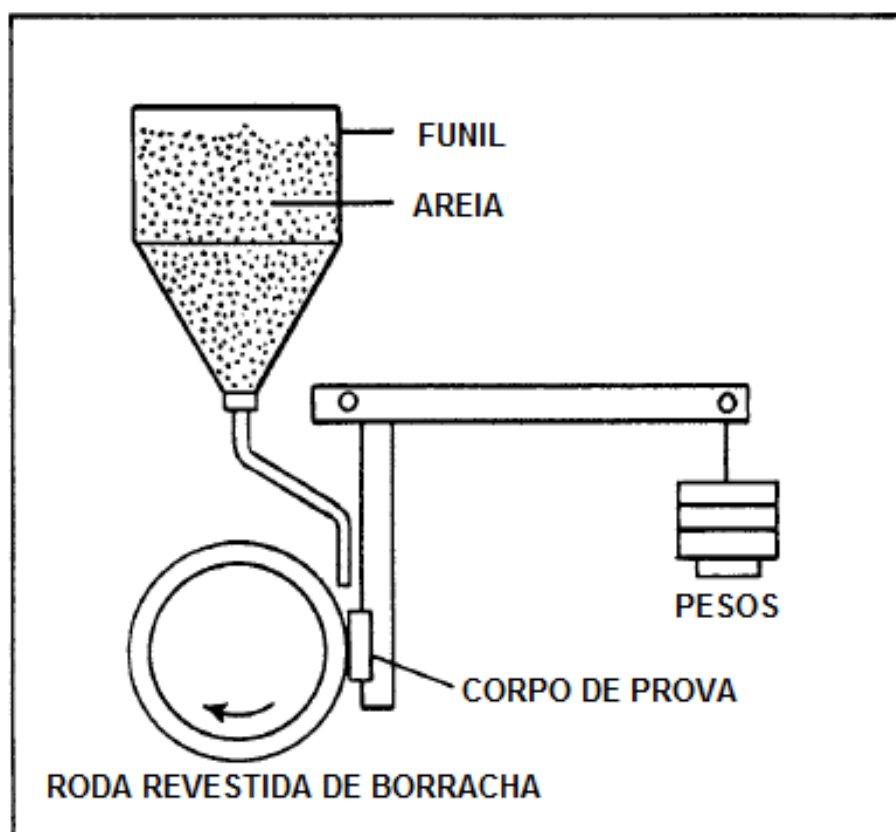


Figura 7 – Desenho esquemático de um abrasômetro tipo roda de borracha

Fonte: ASTM International (2010, P. 2)

2.5 Formas de desgaste

O desgaste de componentes de um sistema mecânico pode ser causado basicamente por erosão, cavitação e abrasão.

O desgaste será por erosão quando partículas (sólidas ou líquidas) sofrerem colisão com uma superfície sólida, causando a remoção de material da mesma. Já a cavitação ocorrerá quando a remoção de material for resultado da colisão de um fluido contra a superfície no momento em que bolhas de ar entram em colapso. E, finalmente, o desgaste abrasivo, que será estudado com maior profundidade nesse trabalho, será caracterizado quando houver remoção de material devido a um carregamento de uma superfície de um sólido contra outras partículas sólidas com dureza maior ou igual à da primeira (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2011).

2.5.1 Desgaste Abrasivo

Resumidamente há quatro mecanismos distintos de desgaste abrasivo: por corte (ou riscamento) de uma partícula mais dura sobre uma superfície mais mole, pela fratura do componente abradado (que ocorrerá quando a superfície a sofrer o desgaste tiver características frágeis), por fadiga resultante de repetidas deformações superficiais aliadas à remoção de material em superfícies dúcteis e, por fim, pelo arrancamento do grão por inteiro, que será comum em materiais cujas ligações entre grãos são relativamente fracas, *e.g.* a cerâmica (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2011). Os quatro mecanismos são ilustrados na Figura 8.

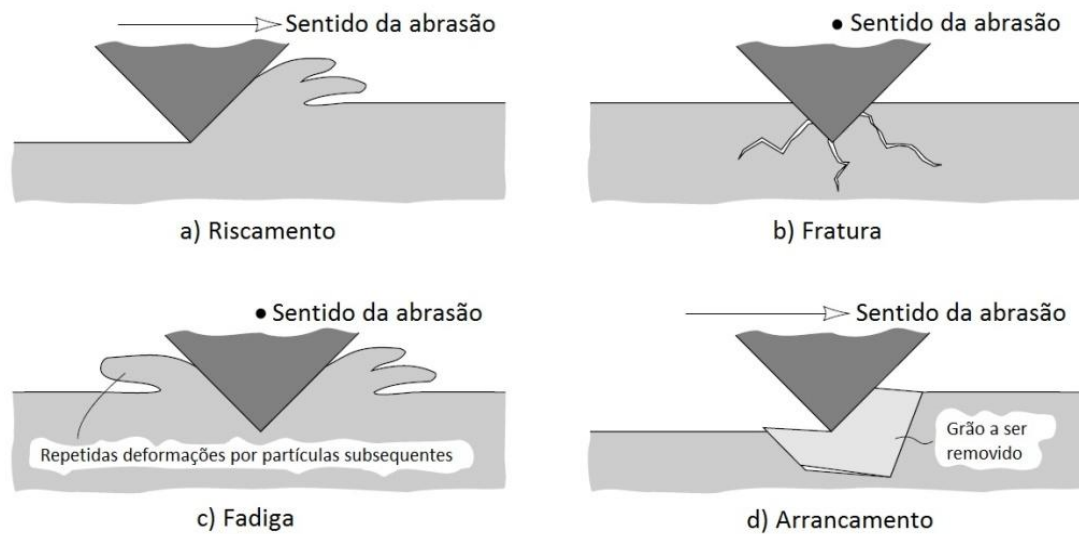


Figura 8 – Mecanismos de desgaste abrasivo

Fonte: Stachowiak (2011, P. 484)

Desgaste abrasivo por corte

Esta forma de desgaste é muito mais expressiva e a remoção de material será muito maior quando utilizados grãos com “cantos vivos” (ASM HANDBOOK, 1992). Estudos mostraram que existem ângulos de “afiação” críticos que se relacionam com as taxas máximas de remoção de material para determinado material a ser abradado, por exemplo, 45° para cobre e 85° para alumínio [SEDRICKS; MULHEARN, 1964 & SASAKI; OKAMURA, 1960 apud ASM HANDBOOK, 1992)].

Neste caso, logo abaixo da superfície abradada, existirá material com considerável deformação plástica, que causará encruamento superficial e consequente aumento da resistência ao desgaste abrasivo (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2011).

Desgaste abrasivo por fratura

O favorecimento deste modo de desgaste se dá em situações onde as partículas abrasivas são afiadas e são arrastadas com cargas altas contra uma superfície dura, que normalmente resistiria a uma carga mais baixa, mas de maneira súbita falha, desde que sob condições favoráveis (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2011).

Desgaste abrasivo por fadiga

Este modo de desgaste é observado quando as partículas deformam a superfície de maneira interrompida e repetida, movendo material para as extremidades do risco. Isso causa o encruamento no ponto de aglomeração de material e posterior falha/desgaste de maneira lenta se comparada com os tipos de desgaste citados anteriormente (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2011).

Desgaste abrasivo por arrancamento do grão

Quando o grão for grande e as ligações entre os grãos forem fracas o destacamento do grão poderá ocorrer. É um mecanismo relativamente raro quando comparado aos três primeiros para metais. Esse mecanismo acontece principalmente em materiais cerâmicos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2011).

Há dois modos pelos quais superfícies sólidas sofrem desgaste abrasivo. São eles. O desgaste abrasivo por riscamento (do inglês, grooving abrasion) se caracteriza pelas altas taxas de remoção de material e pelas partículas abrasivas estarem aderidas a uma superfície (que terá movimento relativo contra a superfície que sofrerá desgaste) e apresentarem somente movimento de deslizamento/translação sobre o corpo abradado. (COZZA, 2011)

O segundo modo, que apresenta taxa de remoção de massa 10 a 100 vezes menor (ASM HANDBOOK, 1992), se dá através do movimento livre de partículas abrasivas entre duas superfícies e é comumente chamada de desgaste abrasivo por rolamento ou impressões múltiplas (do inglês, rooling abrasion) (COZZA, 2011). A perda de material neste modo será menos intenso em função da competição que haverá com outras formas de desgaste. As partículas estarão livres para rolar sobre a superfície menos dura removendo pequenas quantidades de material devido à alta frequência de impactos contra a mesma, o que resultará em uma topografia aleatória da superfície desgastada. (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2011)

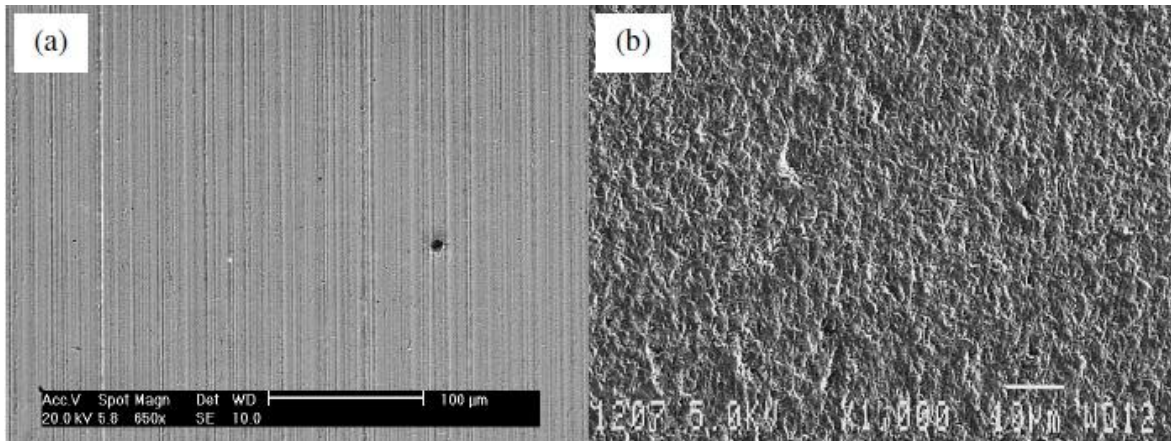


Figura 9 – (a) Marcas de desgaste abrasivo por riscamento e (b) de desgaste abrasivo por rolamento

Fonte: (a) Cozza; Tanaka; Souza (2009); (b) Trezona; Allsopp; Hutchings (1999)

A Figura 9 mostra a diferença das superfícies resultantes de desgaste abrasivo por riscamento (a) e de desgaste abrasivo por rolamento (b).

2.5.2 Resistência ao desgaste abrasivo

Resistência ao desgaste abrasivo é uma propriedade extrínseca ao material e é definida como as taxas de remoção de material devido a este tipo de desgaste. E a resistência relativa ao desgaste abrasivo é definida pela razão entre as taxas de remoção de massa de um material de controle e as taxas do material em análise (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2011).

2.5.3 Efeitos do material no desgaste abrasivo

Existem correlações formadas teoricamente e comprovadas experimentalmente acerca das dependências material-desgaste e ambiente-desgaste.

Sabe-se, por exemplo, que para a maioria dos materiais a dureza de sua superfície e as taxas de remoção de massa por abrasão apresentam relação inversa (ASM HANDBOOK, 1992) e não proporcional (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2011). Esta desproporcionalidade se dá justamente devido ao fato de que as taxas serão alteradas se alteradas a dureza local e, na abrasão, deformações plásticas subsuperficiais, que causam encruamento e conseqüente aumento da dureza, são

em muitos casos inevitáveis (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2011). Além desta propriedade, a microestrutura, a estrutura cristalina, a resistência à fratura também influenciarão na resistência ao desgaste (ASM HANDBOOK, 1992).

Ainda, com a alta demanda por materiais mais resistentes e o desenvolvimento dos processos de deposição nas últimas décadas, é crescente a frequência com que se utilizam revestimentos para essa finalidade.

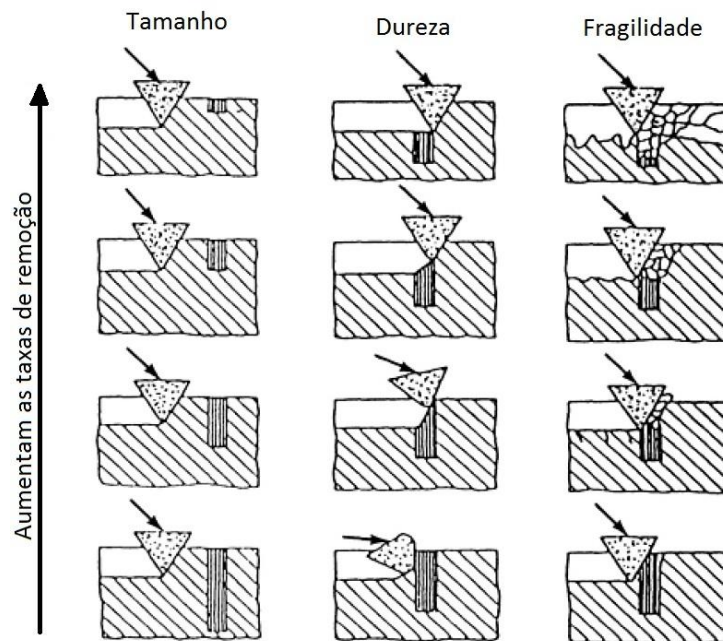


Figura 10 – Relações entre taxas de remoção e propriedades mecânicas
Fonte: ASM Handbook (1992, P. 344)

A Figura 10 mostra a dependência de três propriedades/características que afetam diretamente a resistência ao desgaste de um componente com uma segunda fase difundida (ou material formado) superficialmente. Esses revestimentos, como já foi dito anteriormente, têm o objetivo de melhorar a resistência ao desgaste do componente inicial, portanto, qualquer que seja a situação mostrada na figura, vale ressaltar que a resistência ao desgaste já foi melhorada. As relações mostram que quanto maior a dureza, maior o tamanho e quanto menor a fragilidade do revestimento, mais baixas serão as taxas de remoção de material, ou seja, melhor será a resistência ao desgaste abrasivo do conjunto.

Assim como as propriedades, algumas características das partículas abrasivas e do ambiente no qual o desgaste é conduzido poderá influenciar as taxas de perda de material. Por exemplo, quanto mais cantos vivos as partículas abrasivas tiverem e quanto maior for sua dureza, mais facilmente elas removerão material (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2011 & ASM HANDBOOK, 1992). Além dessas influências, a carga aplicada sobre as partículas abrasivas contra o corpo de prova e a velocidade com que haverá o contato (no caso que estudaremos, esta velocidade de contato será a velocidade com que a roda de borracha será rotacionada) também influenciarão as taxas de remoção. Para a velocidade, o aumento do desgaste será sutil quando a mesma aumentar. Já o aumento da carga de aplicação gerará um acréscimo proporcional de remoção de massa se não ocasionar, por consequência, a fratura das partículas abrasivas. Caso isto ocorra, se as quebras formarem mais cantos vivos, o desgaste poderá aumentar, porém se as fraturas arredondarem os cantos das partículas, o desgaste será menor (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2011 & ASM HANDBOOK, 1992).

2.6 Desgaste de intermetálicos

Estudos realizados por Alman et al (2001) sobre a resistência ao desgaste de ligas Fe_3Al e $FeAl$ com várias porcentagens de alumínio, utilizando um ensaio de pino sobre tambor, mostraram que quanto maior a dureza, menor a taxa de desgaste, ou seja, quanto maior a quantidade de alumínio na liga, maior a resistência ao desgaste, como pode-se observar na Figura 11.

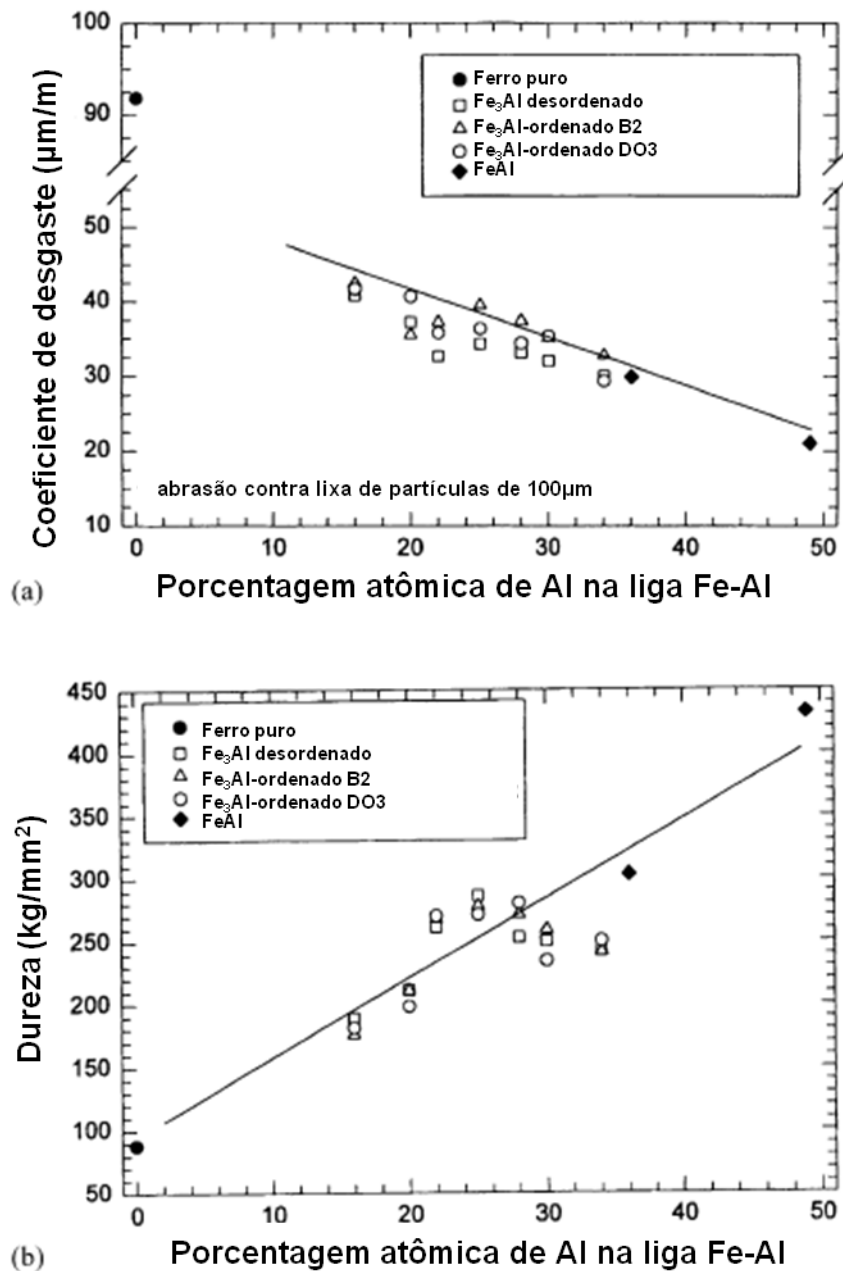


Figura 11 – Influência da quantidade de alumínio das ligas Fe-Al na taxa de desgaste abrasivo (a) e na dureza (b).

Fonte: adaptado de Alman et al (2001)

Foi verificado que as ligas de Fe₃Al (Fe-25 at.% Al e Fe-34 at.% Al) apresentaram taxas de desgaste aproximadamente um terço da do Fe puro, e são comparáveis em magnitude às dos aços 304 SS, 316 SS e AISI 4340 (endurecido a aproximadamente 450HV). A liga de Fe-Al contendo 36 at.% Al teve uma taxa de desgaste comparável à do Fe₃Al contendo 34 at% Al, enquanto que a liga de FeAl

contendo 49 at.% Al apresentou a menor taxa de desgaste dentre os intermetálicos Fe-Al ensaiados, sendo equivalente em magnitude ao aço com 12% de manganês. Os valores são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Taxas de desgaste de intermetálicos e aços abradados contra partículas abrasivas.

Material	Dureza Vickers (kg/mm ²)	Coefficiente de desgaste (µm/m)
Fe puro	71	91.8
Fe ₃ Al: (Fe ₇₅ Al ₂₅ ordenado DO3)	235	36.5
Fe ₃ Al: (Fe ₆₆ Al ₃₄ ordenado DO3)	245	29.1
FeAl: (FA385 Fe ₆₄ Al ₃₆)	306	29.9
304 SS	232	27.1
316 SS	160	33.9
AISI 4340	540	30.2
Aço 12% Mn	215	21.7

Fonte: adaptado de Alman et al (2001)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma da execução deste projeto de pesquisa, explicitando os métodos aplicados para o seu desenvolvimento, pode ser visualizado na Figura 12.

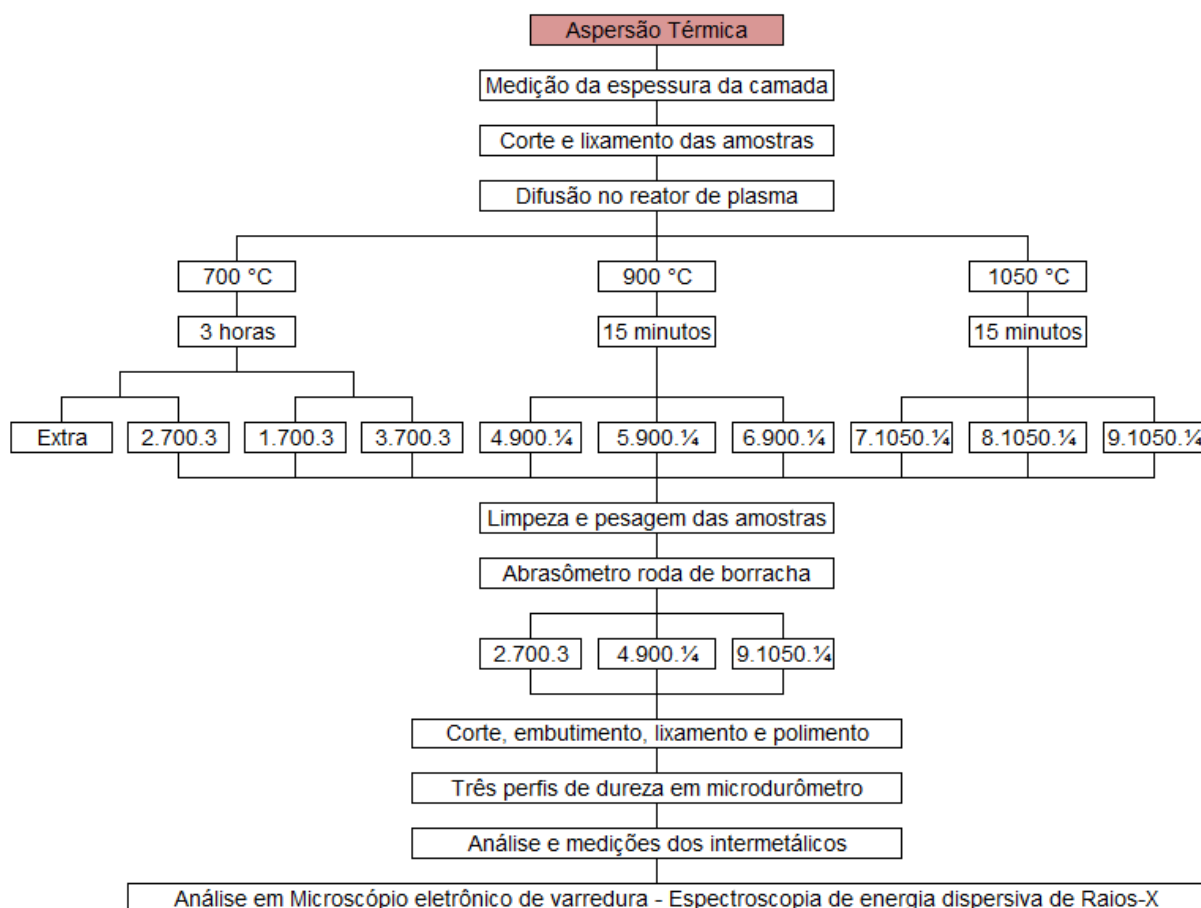


Figura 12 – Fluxograma da execução do projeto de pesquisa.

Na figura acima, o item em vermelho representa a atividade que não foi realizada pela equipe desenvolvedora do projeto.

3.1 Aspersão de alumínio em pó

Para a obtenção das amostras em estado de fornecimento, foram utilizadas 02 barras de aço ABNT 1020 de dimensão 25,4 mm x 6,35 mm x 1000 mm e alumínio em forma de arame. As barras utilizadas nesse trabalho foram do mesmo lote que

Erbesdobler (ERBESDOBLER,2010) utilizou na execução do seu projeto, conforme mostra a Figura 13.

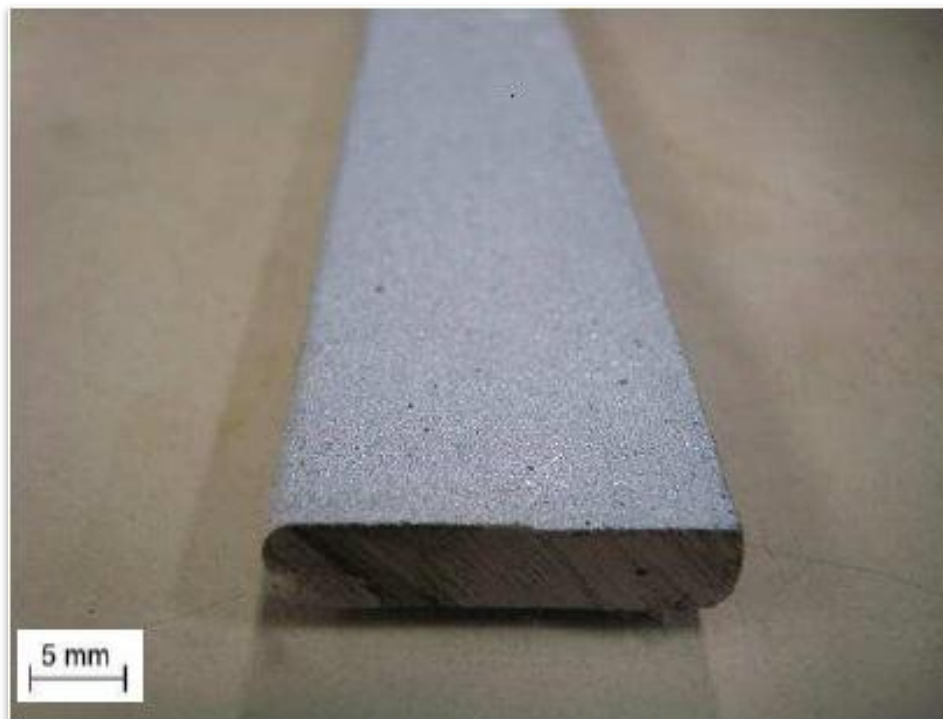


Figura 13 – Barra de aço com camada de alumínio aspergido (ERBESDOBLER, 2010)

Ambas as barras foram disponibilizadas previamente preparadas para a realização do projeto. Nesta preparação elas foram aspergidas com alumínio em forma de arame de 3,2 mm de diâmetro e 99% de pureza. A aplicação do arame sobre a barra de aço foi feita utilizando uma pistola de aspersão térmica a chama modelo 14E, da marca Sulzer Metco, em 14 passes. Além disso, previamente à deposição, foi jateado óxido de alumínio sobre a superfície da barra para garantir boa aderência do alumínio aspergido.

3.2 Preparação das amostras para tratamento de difusão

Todas as máquinas e recursos utilizados durante a preparação estavam disponíveis no Laboratório de Materiais da UTFPR.

3.2.1 Amostras no estado de fornecimento

Inicialmente, foram analisadas as camadas de depósito de alumínio nas duas barras. Com o intuito de conhecer as condições iniciais de uniformidade e espessura do depósito, foi retirada, utilizando a cortadeira de amostras metalográficas Arotec Arocor 60, uma parte de cada uma das duas barras.

Após embutimento, na embutidora a quente Struers Preedopress, e posterior lixamento e polimento das duas partes embutidas, foi feita análise dimensional da camada depositada. O esquema mostrado na Figura 14 foi utilizado na barra 01 e o na Figura 15, na barra 02.

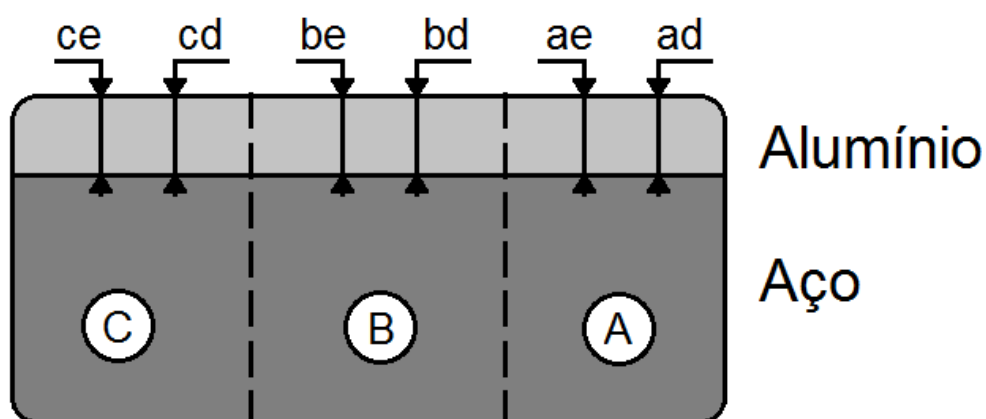


Figura 14 – Esquema para medição da camada na barra 01.

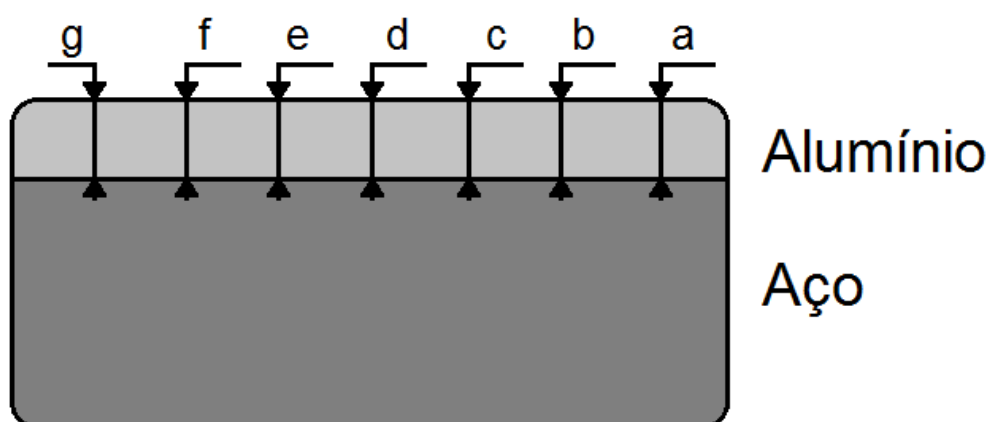


Figura 15 – Esquema para medição da camada na barra 02.

Os valores medidos utilizando microscópio ótico segundo os esquemas das Figuras 14 e 15 estão dispostos na Tabela 3. Com estes valores, a espessura média da camada depositada na barra 01 foi 287,5161 μm , e na barra 02 foi 395,8888 μm . Estes valores foram utilizados como referência para toda extensão das barras.

Para este estudo, devido aos resultados obtidos por Erbesdobler (2010), definiu-se como tamanho de espessura ideal da camada antes do tratamento térmico a faixa entre 230 μm e 270 μm . Isso significou que para cada amostra que fosse utilizada da barra 01, seria necessário retirar entre 18 μm e 58 μm (aproximadamente) em profundidade de alumínio e para a barra 02, era necessário diminuir a espessura da camada num valor aproximado entre 126 μm e 166 μm .

Tabela 3 - Valores medidos em estado de fornecimento.

Item	Dimensão (μm)	Item	Dimensão (μm)
ae	308,1169	a	409,5925
ad	328,4172	b	431,7327
ce	304,4325	c	422,5076
cd	297,0468	d	398,5267
be	241,6965	e	404,0575
bd	245,3865	f	383,7624
		g	321,0373

Fonte: Autoria própria

3.2.2 Controle das espessuras de depósito

Com as espessuras médias conhecidas para as duas barras, cortaram-se dez peças nas dimensões 25,4 mm x 6,35 mm x 76,2 utilizando a cortadeira de amostras metalográficas Struers Discotom, para que estas se adequassem ao tamanho do porta-amostra do reator de plasma e do abrasômetro tipo roda de borracha.

Como mostrou a Tabela 3, para obtermos a espessura ideal para o estudo, era necessário reduzir o tamanho das camadas. Para isto, foi utilizado o método de lixamento com lixas d'água de granulometria 140. As peças cortadas foram lixadas

repetidas vezes usando como controle medições com micrômetro digital a cada lixamento.

Antes de serem iniciados os lixamentos, as espessuras de cada uma das peças foram medidas em dez pontos diferentes, conforme ilustra a Figura 16.

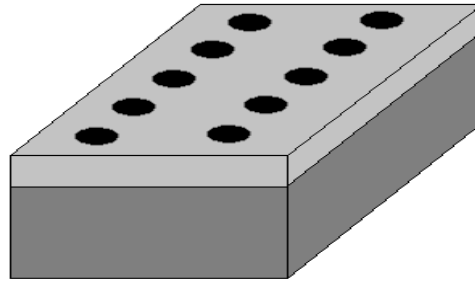


Figura 16 – Distribuição aproximada dos pontos de medição das espessuras.

Na sequência das medições o lixamento foi iniciado utilizando os procedimentos a seguir. Sobre as peças 1, 2, 3, 4 e 5 – oriundas da barra 01 – foram utilizadas pressões baixas e uniformes. A cada dez movimentos de ida e volta sobre a lixa d'água, o processo era interrompido e as espessuras eram medidas novamente até que elas diminuíssem $38 \pm 20 \mu\text{m}$, como explicado no item 3.2.1.

Para as peças 6, 7, 8 e 9 – oriundas da barra 02 – foram utilizadas pressões uniformes, porém maiores devido à grande quantidade de material que devia ser removido para atingir a espessura média ideal. Para estas quatro últimas amostras, foram feitos trinta movimentos de ida e volta sobre a lixa d'água em cada iteração. As medições seguiram o modelo aplicado às seis primeiras até que as respectivas espessuras medissem $250 \pm 20 \mu\text{m}$.

O Apêndice C mostra as espessuras em condições iniciais, as iterações, as espessuras médias parciais e a condição final aproximada de camada de alumínio, para os dez pontos apresentados na Figura 16, das peças 1 a 9.

3.3 Seleção de temperatura e tempo de tratamento de difusão

Para o tratamento de difusão no reator de plasma, foi escolhido tomar como base os ciclos de processamento das amostras que foram desenvolvidos por Erbesdobler (2010).

Em seu trabalho, foram utilizados tempos e temperaturas de tratamento da seguinte forma:

- 3 horas para temperatura de tratamento de 600°C;
- 3 e 6 horas para temperatura de tratamento de 700°C;
- 15 minutos, 1 e 3 horas para temperatura de tratamento de 1100°C.

Segundo Erbesdobler (2010), a temperatura de 600°C foi escolhida porque nela todas as reações ocorrem no estado sólido do alumínio. A temperatura de 700°C foi escolhida por ser próxima da temperatura de 600°C, assim pode-se comparar os resultados de difusão em estado sólido e difusão simulando uma imersão a quente, já que o alumínio funde a 660,5°C (ERBESDOBLER, 2010). A última temperatura, de 1100°C, foi escolhida por ter apresentado os melhores resultados no trabalho de Silva e Gmach (2008) se considerada a espessura da camada difundida.

Quanto aos tempos escolhidos, Erbesdobler (2010) explicou que a difusão seria satisfatória nos tempos determinados, se baseando nos tempos de tratamento e resultados da difusão do alumínio no aço mostrados por Silva e Gmach (2008).

Tendo estas informações em mãos, determinou-se para este trabalho as seguintes temperaturas e tempos de tratamento no reator de plasma para difusão:

- 3 horas para tratamento de 700°C;
- 15 minutos para tratamento de 900°C;
- 15 minutos para tratamento de 1050°C.

3.4 Nomenclatura das amostras

A denominação das amostras foi feita indicando os seguintes dados:

- Numeração da amostra, que foi definida na ordem em que elas foram cortadas e preparadas para o tratamento – número 1 a 5, oriundas da barra 01, e número 6 a 9, da barra 02.
- Um ponto e a temperatura de tratamento – 700°C, 900°C e 1050°C;
- Um ponto e o tempo de tratamento, em horas – ¼ de hora e 3 horas.

Os dados dos dois primeiros itens já seriam suficientes para identificar todas as amostras, visto que para cada temperatura diferente, só existe um tempo de tratamento. Porém, no intuito de facilitar as relações entre temperatura e tempo, optou-se incluir também à nomenclatura o último item.

Sendo assim, as amostras utilizadas foram renomeadas da seguinte maneira:

- Peças 1 a 3: amostras 1.700.3, 2.700.3 e 3.700.3;
- Peças 4 a 6: amostras 4.900.¼, 5.900.¼ e 6.900.¼;
- Peças 7 a 9: amostras 7.1050.¼, 8.1050.¼ e 9.1050.¼,.

3.5 Tratamento térmico de difusão no reator de plasma

Os tratamentos térmicos para difusão foram realizados no reator de plasma disponível no Laboratório de Plasma da UTFPR (Figura 17).

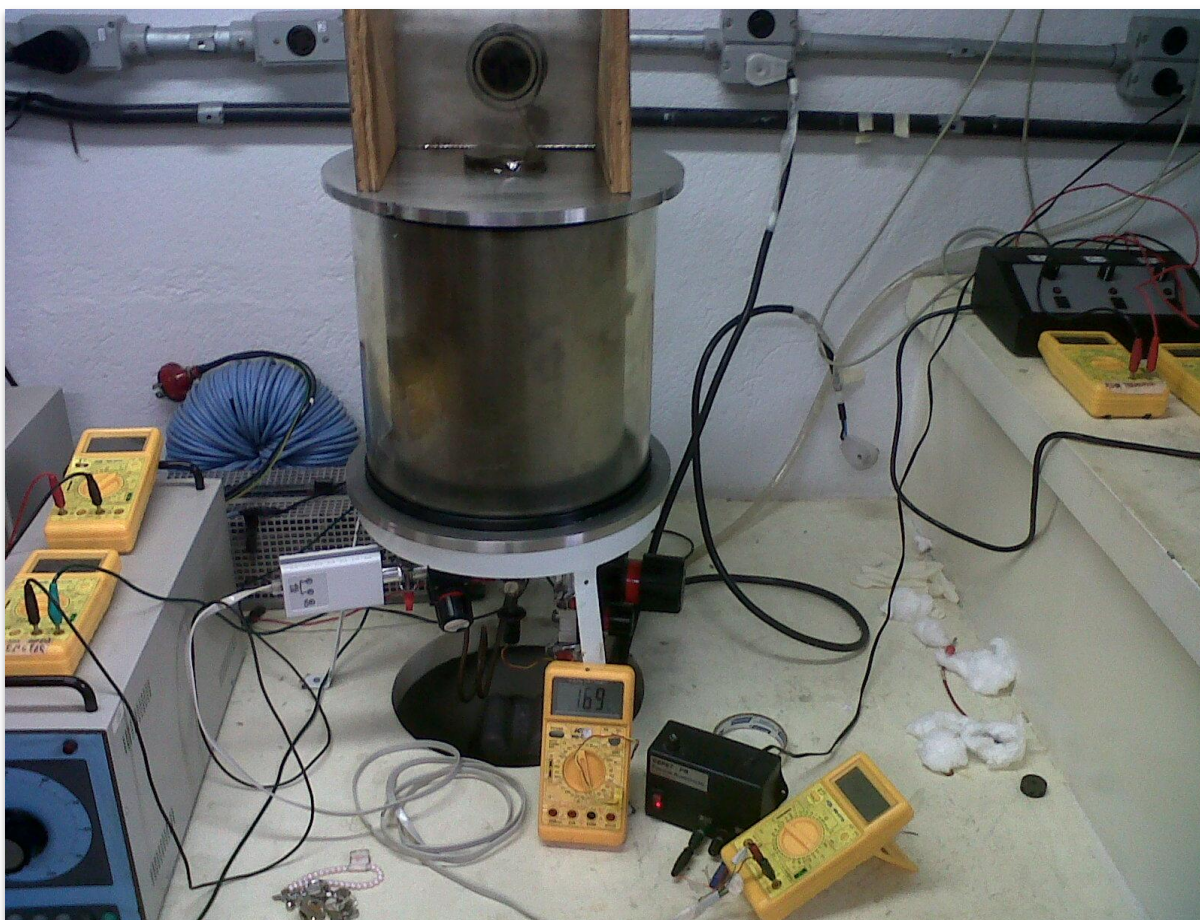


Figura 17 – Reator de plasma (ERBESDOBLER, 2010).

O equipamento é constituído basicamente de câmara de vácuo, feita de borosilicato, com diâmetro de 297 mm e altura de 300 mm, de duas tampas – inferior e superior – ambas de aço inoxidável ABNT 304, por anéis de borracha para vedação, pelo sistema de alimentação de gases, por uma fonte de tensão – pelo sistema que produz o vácuo – uma bomba mecânica capaz de proporcionar ao sistema uma pressão final de 0,01 Torr e medidores e válvulas de pressão. (ITAL, 2008).

Neste reator, segundo Ital (2008), a entrada da mistura de gases é realizada por uma válvula e controlada através de fluxímetros, e uma fonte de tensão constante, com limites operacionais de 650 Volts e 5 Ampères, a qual aplicará entre os eletrodos (amostra e paredes da câmara) a diferença de potencial suficiente para manter a alimentação/manutenção da descarga elétrica.

3.5.1 Preparação para os tratamentos

Erbesdobler (2010) evidenciou durante a execução dos tratamentos térmicos em suas amostras iniciais, que a exposição direta das mesmas às descargas elétricas geravam superfícies descontínuadas, com muito vales e picos que não existiam na camada de alumínio antes do tratamento. Segundo ele ainda, isso possivelmente foi provocado pela formação de descargas do tipo arco elétrico diretamente na superfície da camada intermetálica que estava se formando.

Portanto, assim como para os tratamentos de Erbesdobler (2010), para os tratamentos térmicos deste trabalho foram fabricados um suporte com entrada para encaixe do termopar e dois recipientes e suas respectivas tampas, para portar as amostras durante os tratamentos térmicos. Um dos recipientes – utilizado para os tratamentos das amostras 1.700.3, 2.700.3 e 3.700.3 – tinha capacidade para comportar duas amostras por vez, conforme mostra a Figura 18, e o outro recipiente – utilizado para os tratamentos das amostras 4.900.¼, 5.900.¼ e 6.900.¼ e das amostras 7.1050.¼, 8.1050.¼ e 9.1050.¼ – comportava apenas uma amostra por tratamento, conforme mostra a Figura 19. Os desenhos dos suportes e dos dois recipientes estão mostrados no Apêndice D.

No caso do primeiro recipiente citado, foi necessário cortar uma amostra extra para que existissem dois pares a serem tratados a 700 °C. Dessa maneira, não haveria espaços vazios dentro do recipiente em nenhum dos tratamentos, e instabilidades na descarga elétrica seriam evitadas.

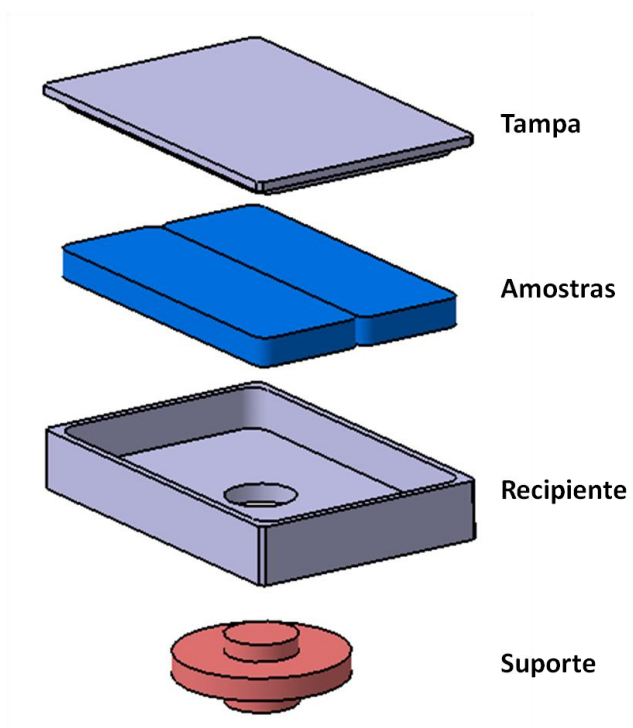


Figura 18 – Vista explodida do conjunto formado pelo suporte, recipiente, amostras e tampa para os tratamentos térmicos a 700°C.

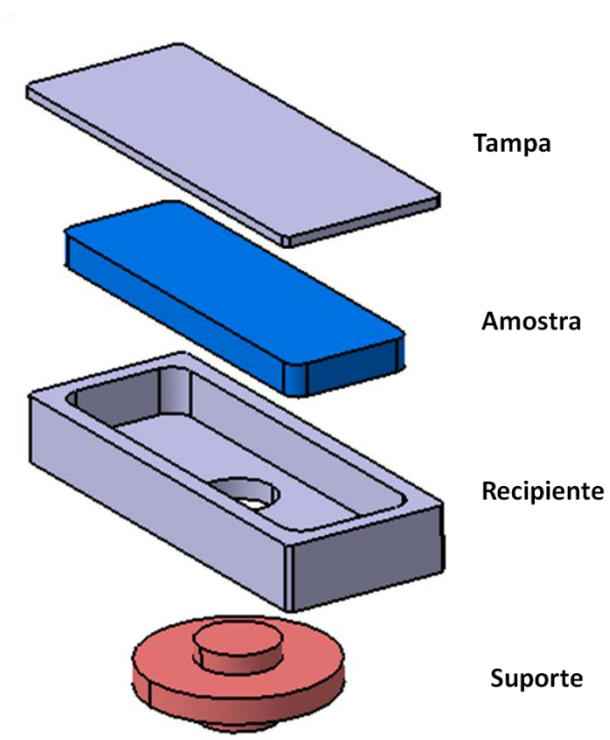


Figura 19 – Vista explodida do conjunto formado pelo suporte, recipiente, amostra e tampa para os tratamentos térmicos a 900°C e 1050°C.

Após limpeza dos componentes presentes no interior do reator de plasma, verificação dos gases Argônio e Hidrogênio nos cilindros, da funcionalidade da bomba mecânica, das válvulas e dos leitores de temperatura (°C), tensão (V), pressão (V) e corrente (A), os tratamentos foram iniciados.

A indicação da pressão era lida em Volts: para obtenção do valor em Torr utiliza-se a seguinte relação:

$$P = 10^{(V-6,125)} \quad \text{Equação 1}$$

3.5.2 Ordem de tratamento

As duas primeiras amostras a serem tratadas foram as 1.700.3 e 3.700.3, seguidas da amostra 2.700.3 em conjunto com a amostra extra.

Foram então realizados os tratamentos individuais das amostras 6.900.¼, 4.900.¼, 5.900.¼, 8.1050.¼, 7.1050.¼ e 9.1050.¼.

3.5.3 Processo utilizado durante os tratamentos

Após a montagem dos conjuntos conforme as Figuras 18 e 19, a câmara foi vedada e em seu interior, criada vácuo.

O tratamento efetivo iniciava ao forçar a diferença de potencial entre o cátodo (conjunto montado com recipiente, tampa e suporte) e o ânodo (paredes do reator) do sistema, em conjunto com a regulagem da pressão – através dos fluxímetros de entrada dos gases – e da regulagem da temperatura medida por meio do termopar inserido dentro do suporte do recipiente. A Figura 20 mostra o aspecto do conjunto quando em tratamento dentro do reator.



Figura 20 – Aspecto do conjunto dentro do reator durante o tratamento térmico.

Durante todos os tratamentos, os valores mostrados nos leitores de temperatura, tensão, corrente aplicada, e pressão no interior da câmara eram anotados em intervalos de 5 minutos, e sempre que atingidas as temperaturas estabelecidas anteriormente – neste momento, a manutenção da temperatura era controlada através da pressão mantida em 12 Torr (7,21 Volts no leitor) e ajustando-se a diferença de potencial entre cátodo e ânodo. O fluxímetro era mantido em 0,8 V para um fluxo de 80 sccm de gás H_2 e em 2,28 V para um fluxo de 320 sccm de gás argônio, de forma a obter uma mistura gasosa de 20% de gás hidrogênio e 80% de gás argônio.

O Apêndice E mostra as tabelas preenchidas para acompanhamento durante os tratamentos de difusão.

3.6 Ensaios de desgaste

3.6.1 Preparação pós-tratamento térmico

Para avaliação efetiva da resistência ao desgaste abrasivo, as amostras foram limpas utilizando a limpadora de amostras por ultrassom Struers Metason 60 T, ilustrada na Figura 21 (a). A limpeza de cada amostra foi feita durante 05 minutos, seguida da secagem através de fluxo de ar quente, proveniente da secadora metalográfica Struers Drybox-2, ilustrado na Figura 21 (b).

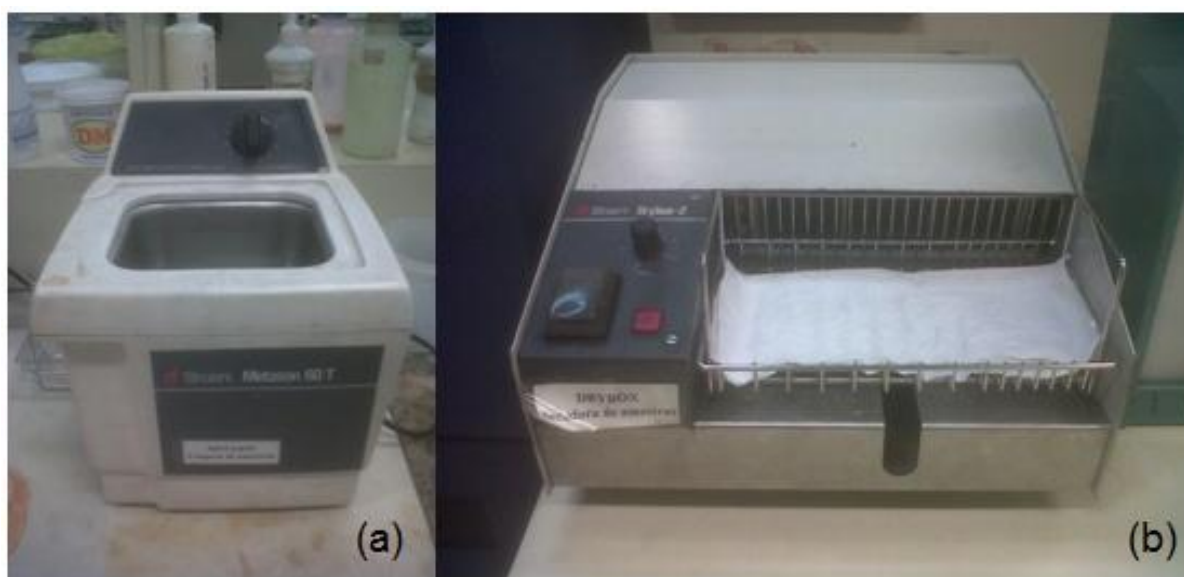


Figura 21 – (a) Limpadora de amostras Struers Metason 60 T e (b) secadora metalográfica Struers Drybox-2.

Em seguida, as amostras foram pesadas utilizando a balança de alta precisão Shimadzu AUY220, que possui resolução de 0,2 mg.

Para garantir a pesagem, cada amostra foi pesada três vezes, num ambiente isolado de perturbações. As repetições geraram um valor médio que foi usado como referência para avaliação da perda de massa, e são mostrados no Apêndice F.

3.6.2 Execução dos ensaios de desgaste abrasivo

As amostras foram ensaiadas utilizando abrasômetro tipo roda de borracha, disponível no Laboratório de Soldagem da UTFPR, que está ilustrado na Figura 22.



Figura 22 – Abrasômetro tipo roda de borracha.

O ensaio para avaliar desgaste utilizando roda de borracha, segundo a norma regente ASTM Internacional G65 – 04 (Reaprovada em 2010), deve envolver abrasivos de tamanho e composição controlados, tipificados pela areia AFS 50/70, e parâmetros de ensaio definidos.

Para os ensaios, foi utilizada areia normalizada segundo a NBR – 7214 média fina, com abertura nominal próxima à definida pela norma – 0,6 a 0,3 mm. Quanto aos parâmetros, usou-se como base o procedimento C definido pela norma ASTM Internacional G65 – 04 (Reaprovada em 2010), recomendada para materiais metálicos com revestimentos finos. Os parâmetros deste procedimento e dos ensaios realizados podem ser comparados na Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação entre os parâmetros de ensaio de desgaste adotados e da norma regente.

Procedimento	Duração do ensaio (segundos)	Rotação da roda (rpm)	Força contra amostra (Newton)
C (ASTM Int. G65 - 04)	30	200	130
Ensaio realizado	60	200	130

Fonte: Autoria própria

Os dados extraídos via software durante os ensaios das amostras, como o coeficiente de atrito instantâneo entre roda de borracha e amostra e as forças tangenciais e normais aplicadas, podem ser vistos nas tabelas no Apêndice G.

Após cada ensaio, as amostras foram novamente limpas para posterior pesagem, seguindo o mesmo procedimento adotado antes dos ensaios.

3.7 Preparação das amostras para análise metalográfica e microdureza

Na sequência, as amostras 2.700.3, 4.900.¼ e 9.1050.¼ foram escolhidas para análise metalográfica e microdureza.

A sequência de corte, executada na cortadeira de amostras metalográficas Arotec Arocor 60, é a mostrada na Figura 23 e foi realizada para medir a diferença entre as espessuras de intermetálicos antes e depois do desgaste, no ponto mais profundo (centro da amostra).

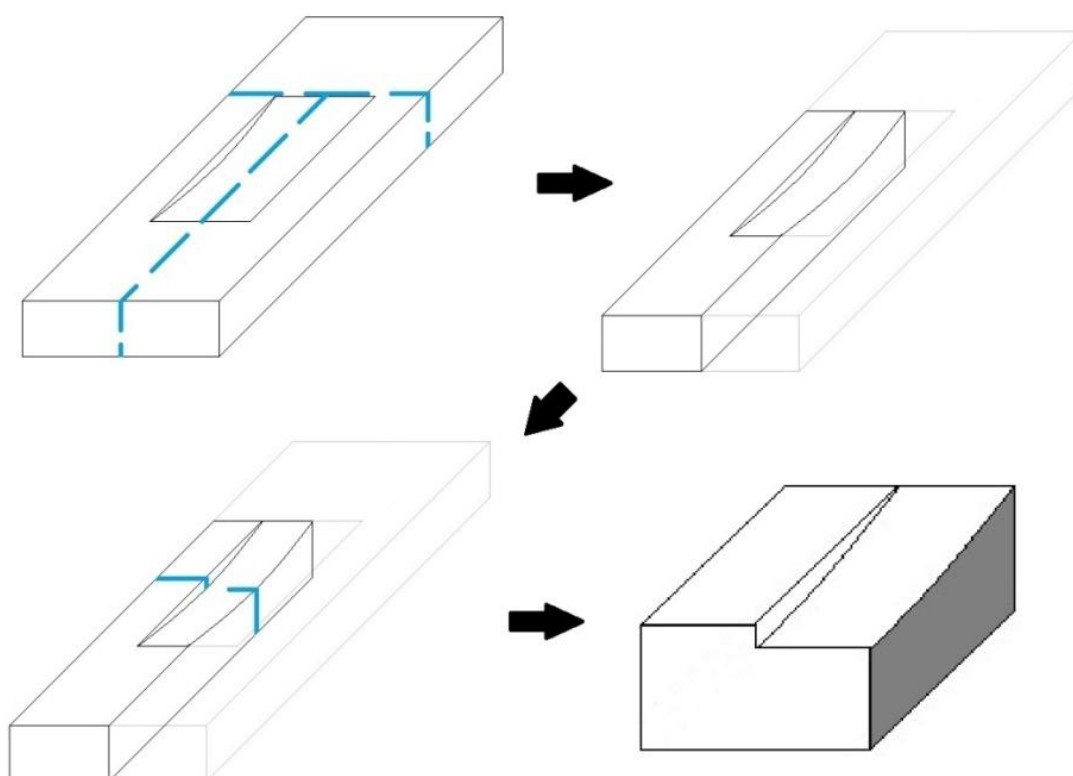


Figura 23 – Sequência de corte para análise das espessuras de intermetálicos.

Em seguida, as amostras foram embutidas na embutidora à quente Struers Predopress, para que a face acinzentada mostrada na Figura 20 fosse analisada futuramente.

Além das três amostras preparadas, foram também cortadas outras 03 áreas destas mesmas amostras, com o objetivo de analisar as camadas formadas na face acinzentada mostrada na Figura 24, em cada condição de tratamento, incluindo medição de microdureza e composição química das camadas através de análise de espectroscopia de energia dispersiva de Raios-X (EDX) em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

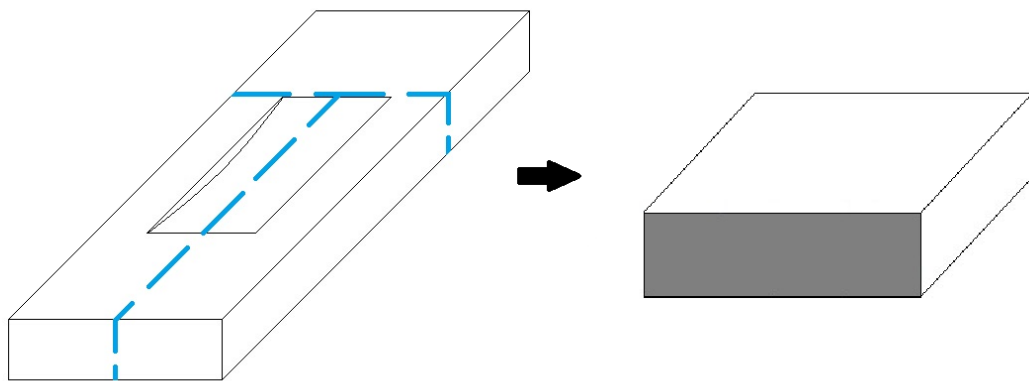


Figura 24 – Corte para medição de microdureza e análise da composição dos intermetálicos.

Após a análise de EDX, foi escolhido um ponto situado na camada e calculada a porcentagem de alumínio presente, através da equação:

$$\%Al = \frac{Al}{Al+Fe} \quad \text{Equação 2}$$

Os valores encontrados foram as premissas utilizadas para a determinação de qual intermetálico foi formado para cada condição, utilizando o diagrama de fases da liga Fe-AL – Figura 6.

As seis peças resultantes dos cortes foram embutidas, lixadas e polidas.

Os lixamentos e polimentos foram realizados pela Buehler AutoMet 250, que tem capacidade de executá-los com seis amostras simultaneamente, conforme mostra a Figura 25.



**Porta
amostras
para 06
unidades**

**Base para
disco rígido
ou pano**

Figura 25 – Lixadeira/Politriz automática Buehler AutoMet 250.

O lixamento automático se deu em três etapas:

1. Superfície de disco Apex DGD, com abrasivos de diamante de 45 μm , durante 5 minutos, com carga de 20 N na direção vertical para baixo, velocidade do disco de 300 rpm e velocidade do porta amostras de 30 rpm no mesmo sentido.
2. Superfície de disco rígido ApexHercules H, com abrasivos MetalDi Supreme de diamante em suspensão de 9 μm , durante 10 minutos, com carga de 20 N na direção vertical para baixo, velocidade do disco de 150 rpm e velocidade do porta amostras de 30 rpm no mesmo sentido.
3. Superfície de pano/tecido TriDent, com abrasivos MetalDi Supreme de diamante em suspensão de 3 μm , durante 15 minutos, com carga de 40

N na direção vertical para baixo, velocidade do disco de 150 rpm e velocidade do porta amostras de 30 rpm no mesmo sentido.

Após o lixamento, as seis amostras foram polidas utilizando micro pano/tecido Vellex, com alumina MasterPrep de 0,05 μm , durante 5 minutos, com carga de 30 N na direção vertical para baixo, velocidade de disco de 120 rpm e velocidade de 30 rpm no sentido oposto.

Os procedimentos utilizados para lixamento e polimento na Buehler AutoMet 250, foram baseados nas informações contidas no manual do equipamento.

3.8 Análise metalográfica e microdureza

A análise metalográfica foi realizada utilizando microscópio ótico Olympus BX51M com câmera CCD CoolSNAP-Pro, utilizando aumentos de 100, 200 e 500 vezes para as análises.

Dentre elas, foram realizadas, como previstas no item 3.7, as medições das camadas desgastadas. Utilizando o software Image-Pro Plus, calculou-se a área delimitada por linhas desenhadas nas extremidades das camadas intermetálicas. Com o valor obtido, encontrou-se a espessura média da camada na região analisada dividindo este valor pelo comprimento da camada na mesma região, conforme mostra a Figura 26.

Esta análise foi feita na área acinzentada mostrada na Figura 23, com o objetivo de concluir qual foi a profundidade máxima atingida durante os ensaios de desgaste nas três amostras escolhidas – uma de cada condição de tempo e temperatura de tratamento de difusão.

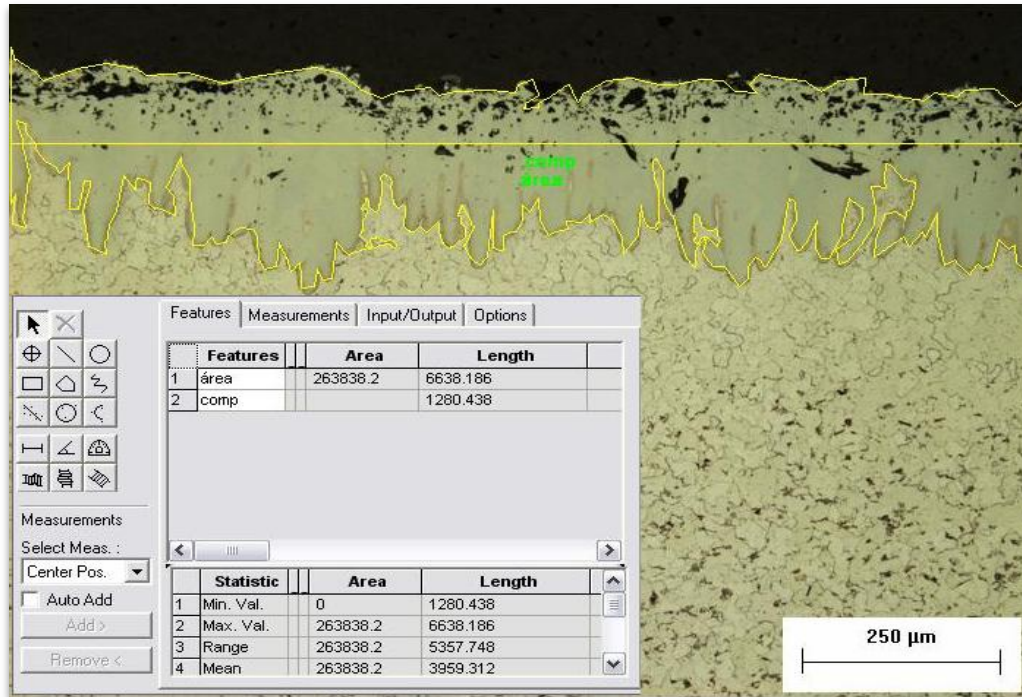


Figura 26 – Método para medir a espessura média da camada na amostra 2.700.3

Em paralelo, foram realizadas medições de microdureza no microdurômetro Shimadzu HMV, utilizando carga de 0,1 kgf e tempo de penetração de aplicação de 10 segundos.

Foram realizados três perfis de microdureza (lado direito, centro e lado esquerdo, conforme Figura 27), com impressões a cada 50 μm a partir da superfície da amostra cortada, conforme a Figura 24.

Foi utilizada escala de dureza Vickers, que pode ser calculada segundo a equação abaixo:

$$HV = \frac{1,854 \times F}{d^2} \quad \text{Equação 3}$$

onde:

F: carga aplicada, em kgf;

d: média das duas diagonais geradas pela impressão, em mm.

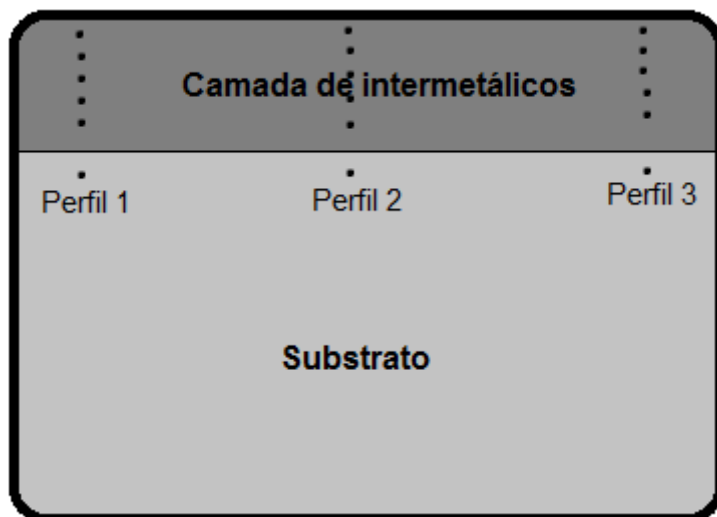


Figura 27 – Representação dos perfis de microdureza realizados nas amostras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Ensaio de desgaste abrasivo

Após os ensaios, o aspecto superficial das amostras são os que se seguem na Figura 28. Na imagem, o sentido do desgaste pelas partículas abrasivas em conjunto com a roda de borracha de borracha foi de cima para baixo.



Figura 28 – Amostras desgastadas, tratadas a 700°C, 900°C e 1050°C (da esquerda para a direita)

Durante o ensaio da amostra 6.900.1/4 constatou-se que a célula de carga do aparato não reduziu a carga exercida sobre a amostra após o tempo programado para ensaio. Essa amostra foi, portanto, desconsiderada do estudo.

Para análise da resistência, a norma ASTM G65 – 04 (Reaprovada em 2010) sugere que os resultados do desgaste abrasivo devem ser reportados como perda de volume em mm^3 , enquanto que a perda de massa deve ser usada somente “internamente”, para comparar materiais de densidade semelhante.

Para tanto, a norma indica que seja utilizada a seguinte fórmula para conversão de perda de massa em perda de volume:

$$\text{Perda de Volume, mm}^3 = \frac{\text{Perda de massa, g}}{\text{Densidade, g/cm}^3} \times 1000 \quad \text{Equação 4}$$

Após esta conversão, se faz necessário o ajuste da perda de volume. Segundo a norma que rege o ensaio, isso é mandatório devido à redução de diâmetro da roda de borracha que causa redução proporcional à abrasão desenvolvida no decorrer dos ensaios: comparando-se duas rodas com diâmetros diferentes, mas que possuem revoluções iguais (e.g. 100 rpm) e que rotacionam por tempos iguais, a abrasão linear (distância linear percorrida por um ponto na roda de borracha) é levemente maior para aquela que possui o maior diâmetro. E, por consequência, a comparação dos volumes perdidos não faria sentido.

Sendo assim, a ASTM G65 – 04 (R. 2010) sugere o cálculo da “Perda de Volume Ajustada” (AVL, do inglês, *Adjusted Volume Loss*), que indica a perda que a amostra em questão teria devido ao desgaste abrasivo produzido por uma roda de diâmetro 228,6 mm:

$$\text{AVL} = \text{Perda de Volume} \times \frac{228,6 \text{ mm}}{\text{Diâmetro da roda após o uso, mm}} \quad \text{Equação 5}$$

No caso estudado nesse trabalho, as densidades são assumidas com valores próximos, sendo desnecessária a conversão. Assim sendo, a AVL não é aplicável, mas é necessário fazer conversão semelhante para a massa perdida, pelos mesmos motivos supracitados.

Assim sendo, a perda de massa ajustada (AML, do inglês, *Adjusted Mass Loss*) indica a massa perdida de uma amostra que foi submetida a ensaio de desgaste

abrasivo usando roda de borracha de diâmetro 228,6 mm e é calculada através da equação:

$$AML = Perda\ de\ Massa \times \frac{228,6\ mm}{Diâmetro\ da\ roda\ após\ o\ uso,mm} \quad \text{Equação 6}$$

A perda de massa ajustada e os desvio padrão para cada condição ensaiada é apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Perda de massa média das amostras ensaiadas.

Temperatura de tratamento (°C)	AML médio (mg)	Desvio Padrão (mg)
700	50,8	0,7
900	60,1	3,6
1050	42,9	3,3

Fonte: Autoria própria

A perda de massa, portanto, foi maior nas amostras tratadas a 900°C, seguida das amostras tratadas termicamente a 700°C, e por último, das amostras que foram tratadas a 1050°C.

4.2 Cálculo do tamanho das espessuras

Como explicado no item 3.8, as espessuras das camadas foram medidas e os resultados são os que se seguem na Tabela 6.

Tabela 6 – Tamanho das espessuras das camadas originais e desgastadas

Amostra	Camada	Área (μm^2)	Comprimento (μm)	Espessura Média (μm)	Profundidade média no centro da marca de desgaste (μm)
2.700.3	original	263838,200	1280,438	206,053	67,636
	vale	148887,100	1075,642	138,417	
4.900.¼	original	353979,600	1276,753	277,250	92,044
	vale	237146,900	1280,450	185,206	
9.1050.¼	original	452697,500	1280,450	353,546	79,216
	vale	261168,500	952,026	274,329	

Fonte: Autoria própria

4.3 Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDX)

As Figuras 29, 31 e 33, ilustram a linha base de análise realizada pelo microscópio eletrônico de varredura sobre as camadas formadas pelos tratamentos a 700°C, 900°C e 1050°C, respectivamente.

Os resultados das análises de EDX são apresentados na Figura 30 para a amostra 2.700.3, Figura 32 para a amostra 4.900.¼ e Figura 34 para a amostra 9.1050.¼. Nestas três figuras o resultado exemplificado mostra quantidades atômicas existentes de Fe e Al exatamente sobre o ponto onde a passa a linha preta nos gráficos (e.g. a relação atômica de “124 Al” para “60 Fe” está a 185,15 μm do início da análise na amostra 2.700.3).

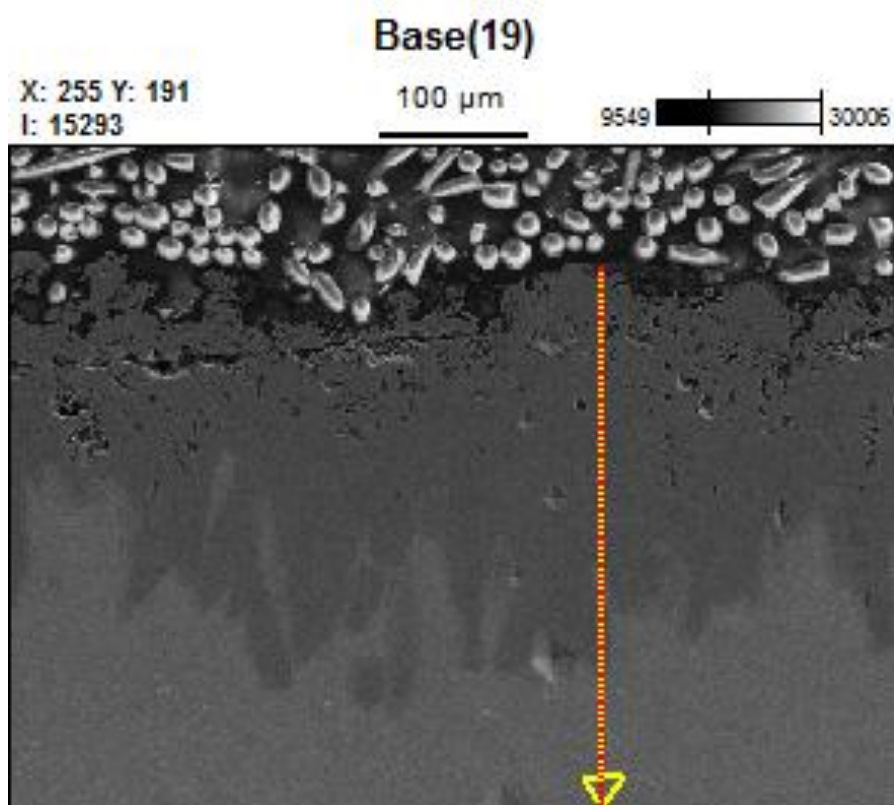


Figura 29 – Foto e linha base para a análise de EDX da amostra 2.700.3.

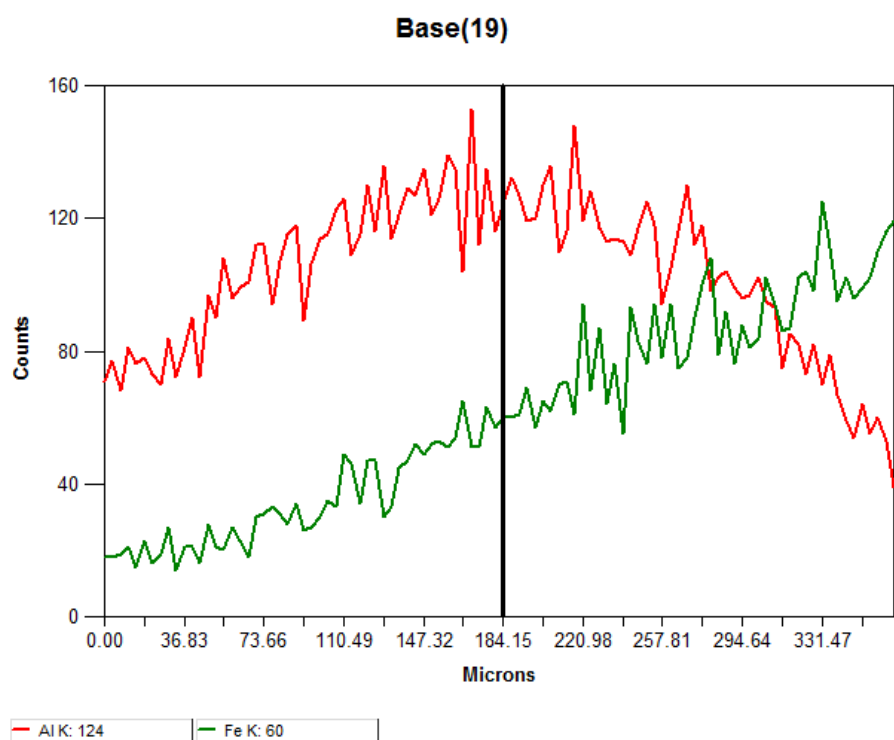


Figura 30 – Resultado da análise de EDX da amostra 2.700.3.

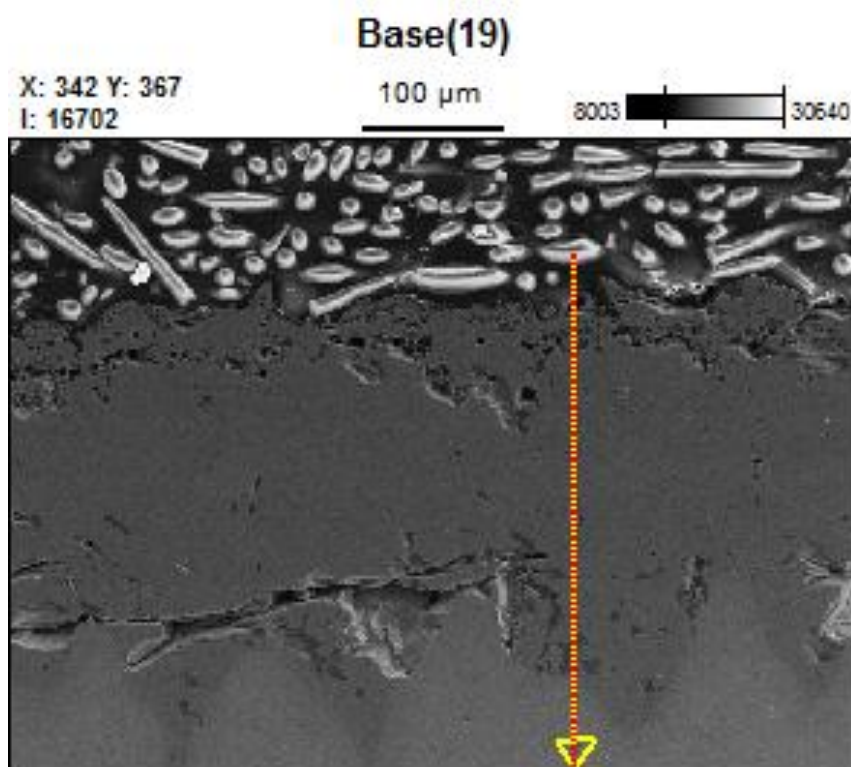


Figura 31 – Foto e linha base para a análise de EDX da amostra 4.900.1%.

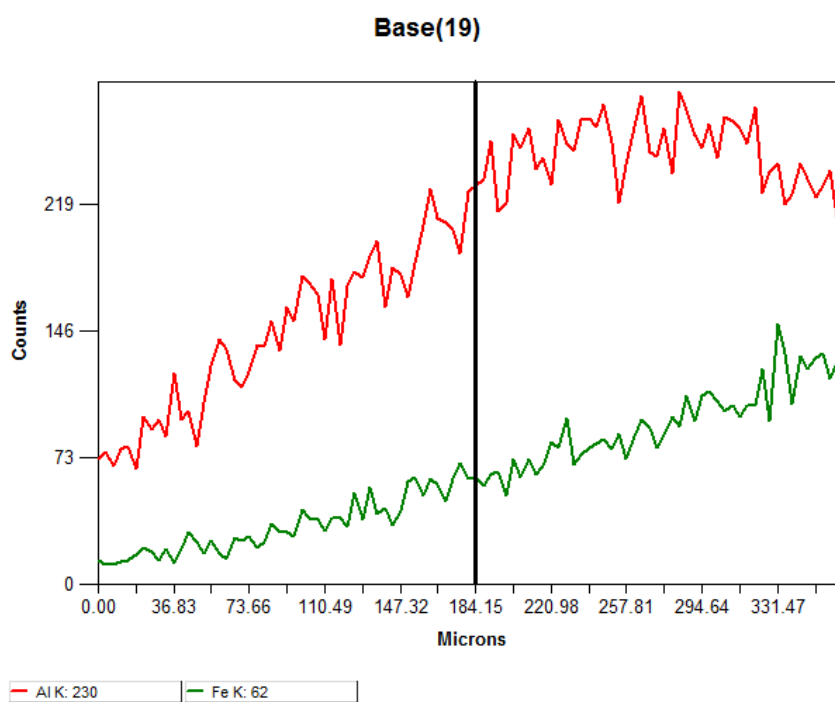


Figura 32 – Resultado da análise de EDX da amostra 4.900.1%.

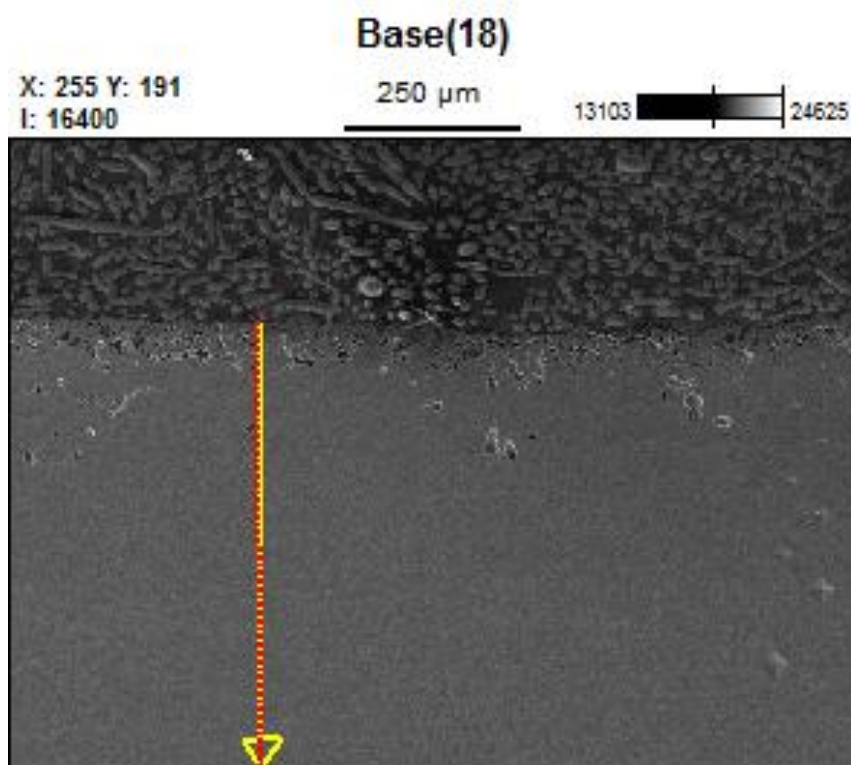


Figura 33 – Foto e linha base para a análise de EDX da amostra 9.1050.¼

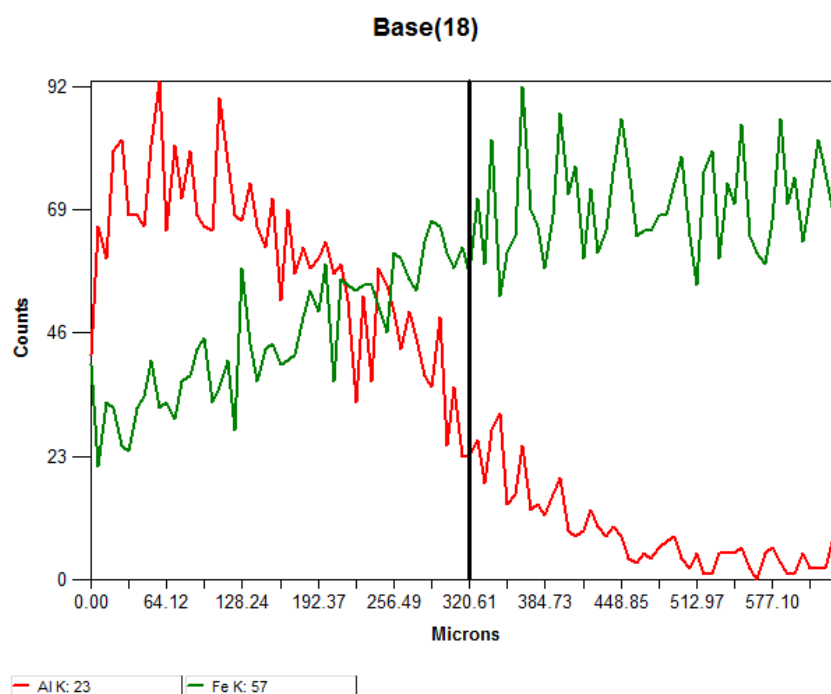


Figura 34 – Resultado da análise de EDX da amostra 9.1050.¼.

Através da análise de EDX realizada pelo MEV foi possível a identificação das camadas intermetálicas formadas nas três condições de tratamento térmico. Para a amostra 2.700.3, no ponto situado a 17 μm da superfície, concluiu-se existir a relação de 68 unidades atômicas de alumínio para 23 unidades atômicas de ferro, o que resulta, através da Equação 2, em 74,73%Al.

Repetindo-se o procedimento no ponto situado a 40 μm para a amostra 4.900.¼, concluiu-se existir a relação de 90 unidades atômicas de alumínio para 24 unidades atômicas de ferro, que resulta em 78,77%Al.

Ambas os pontos analisados estão situados em distâncias menores que as profundidades máximas desgastadas, ou seja, a análise feita foi sobre as camadas atingidas pelo desgaste abrasivo.

No caso da amostra 9.1050.¼, foi necessário analisar três pontos, devido à formação de três camadas distintas durante o tratamento de difusão, como mostra a Figura 41. A 39 μm da superfície – distância onde se encontra a parcela da única camada ensaiada no abrasômetro – concluiu-se existir a relação de 73 unidades atômicas de alumínio para 31 unidades atômicas de ferro, o que, através da Equação 2, resulta em 70,19%Al. Analisando também um ponto a 160 μm da superfície, local onde encontra-se a segunda camada, concluiu-se existir a relação de 66 unidades atômicas de alumínio para 40 unidades atômicas de ferro, o que, segundo a Equação 2, resulta em 62,26%Al. Por fim, analisou-se um ponto a 320 μm da superfície – distância entre superfície e a terceira camada intermetálica formada - e concluiu-se que quantidade de unidades atômicas de Ferro foi maior que a de alumínio, numa proporção de 57 para 23, o que resultou em 28,75%Al, segundo a Equação 2.

A análise das três amostras indicou, através do diagrama de fases Ferro-Alumínio (Figura 6), que todas as camadas formadas, com exceção da terceira camada na amostra 9.1050.¼, são compostas de uma mistura de alumínio puro e do intermetálico FeAl_3 .

Todas as camadas apresentaram também porosidade: a amostra tratada a 900°C apresentou os poros com maior tamanho, se comparado às outras duas amostras que se formaram com poros de tamanhos/diâmetros próximos.

4.4 Análise metalográfica e microdureza

Para a análise metalográfica e medições das microdureza foi escolhido uma amostra para cada condição: 2.700.3, 4.900.¼ e 9.1050.¼. Conforme dito no item 3.7, as microdurezas foram medidas na área acinzentada da Figura 24, conforme esquema mostrado na Figura 27.

4.4.1 Amostras tratadas a 700°C

As Figuras 35 e 36 mostram as camadas sem e com desgaste, respectivamente, para a amostra 2.700.3, e a Figura 37 mostra, para a mesma amostra, o perfil 2 de microdureza.

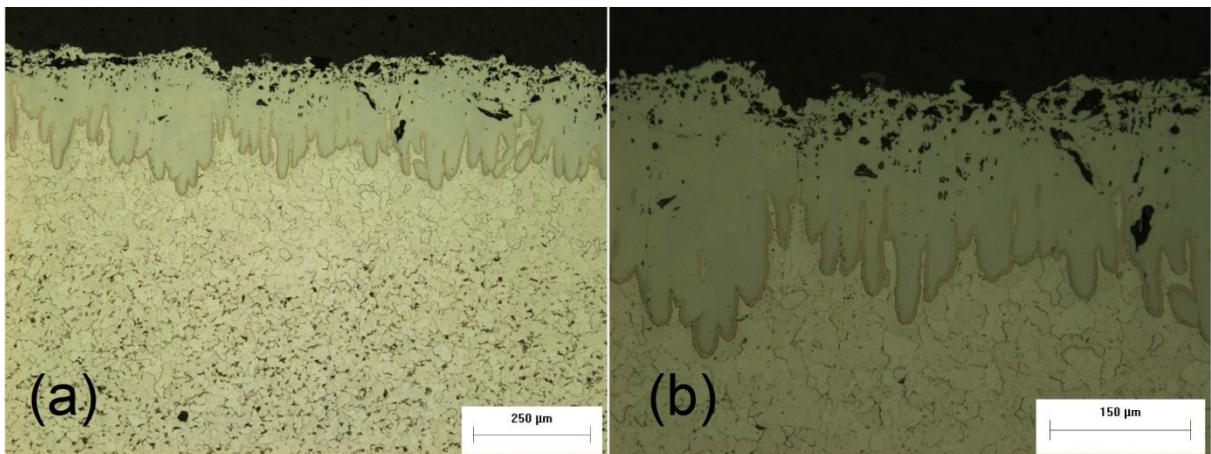


Figura 35 – Camada de intermetálico Fe-Al original (sem desgaste), com aumento de (a) 100x e de (b) 200x, para a amostra 2.700.3.

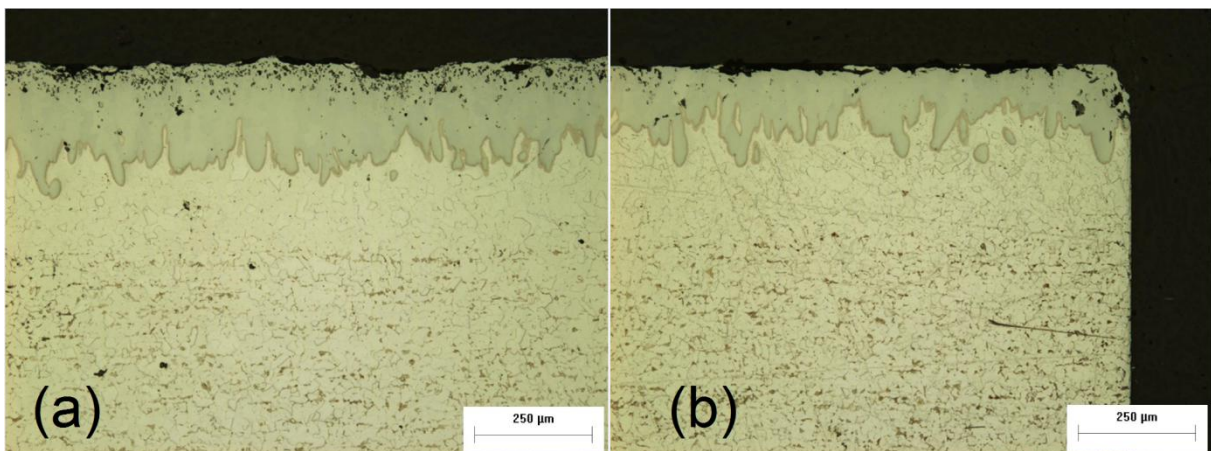


Figura 36 – (a) Camada com desgaste menos profundo e (b) camada com desgaste mais profundo (vale), com aumento de 100x, para a amostra 2.700.3.

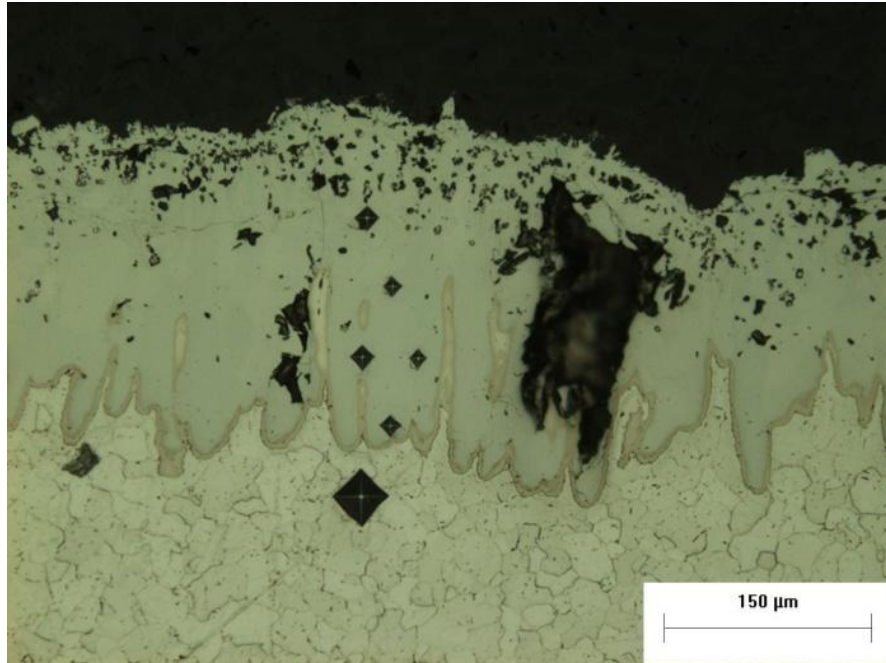


Figura 37 – Impressões de microdureza no perfil 2 da amostra 2.700.3.

Os valores encontrados nas medições de microdurezas Vickers para a amostra 2.700.3 estão dispostos na Tabela 7. Os perfis 1 e 3 da amostra em questão podem ser visualizado no Apêndice H, na Figura 53.

Tabela 7 – Microdurezas medidas para cada perfil da amostra 2.700.3.

Distância da borda (μm)	Perfil 1 (HV)	Perfil 2 (HV)	Perfil 3 (HV)
50	575	588	870
100	873	943	976
150	746	954	816
200	733	712	169
250	193	-	-
350	102	110	107

Fonte: Autoria própria

Nota-se através da análise das três imagens dos perfis de dureza desta amostra que a camada formada apresentou fragilidade, evidenciada em todas as impressões das microdurezas, que resultaram na propagação de pequenas trincas.

4.4.2 Amostras tratadas a 900°C

As Figuras 38 e 39 mostram as camadas sem e com desgaste, respectivamente, para a amostra 4.900.1/4, e a Figura 40 mostra, para a mesma amostra, o perfil 2 de microdureza.

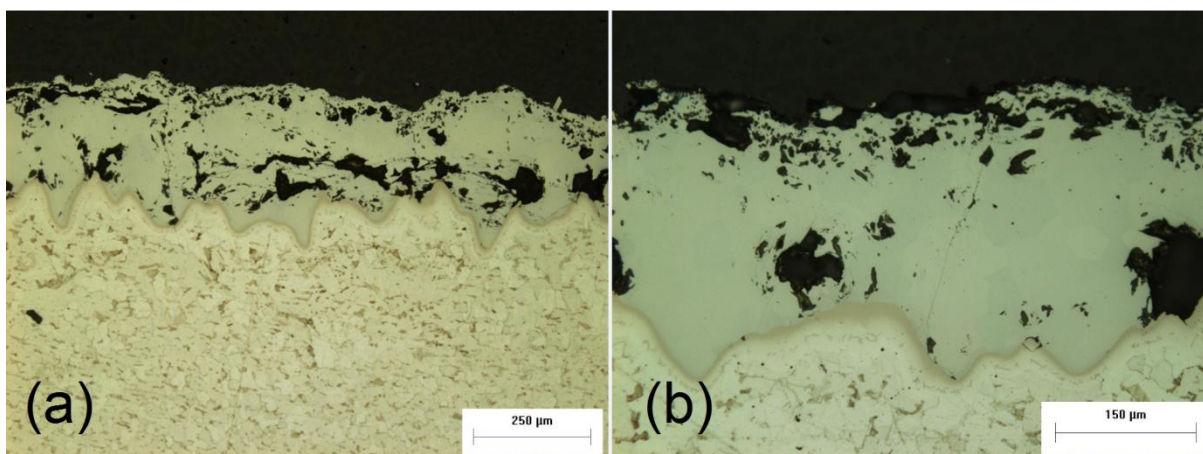


Figura 38 – Camada de intermetálico Fe-Al original (sem desgaste), com aumento de (a) 100x e de (b) 200x, para a amostra 4.900.1/4.

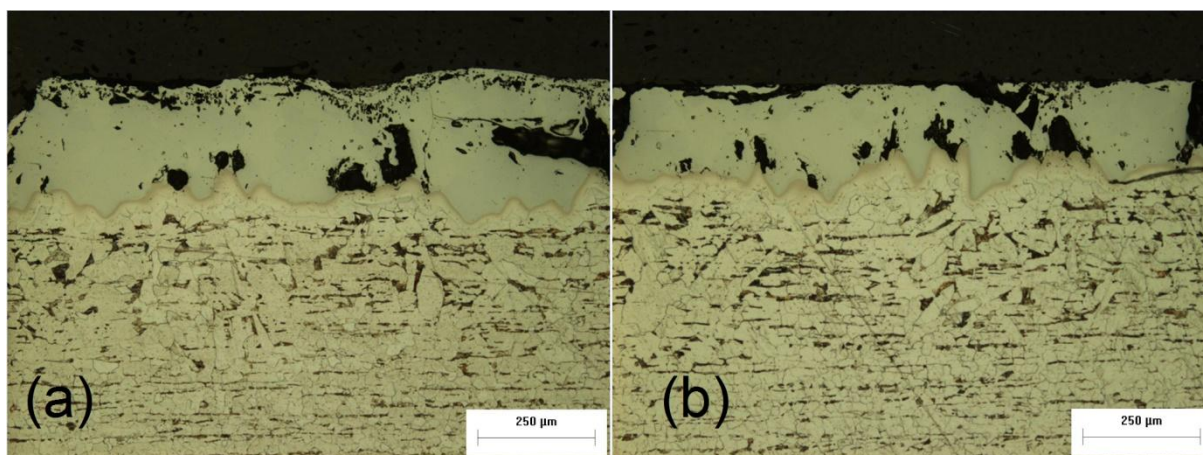


Figura 39 – (a) Camada com desgaste menos profundo e (b) camada com desgaste mais profundo (vale), com aumento de 100x, para a amostra 4.900.1/4.

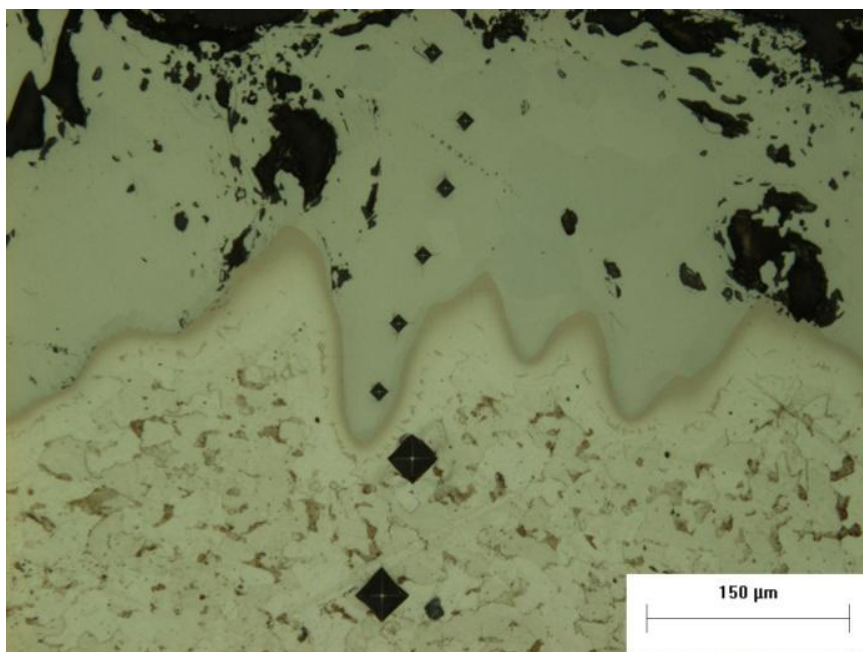


Figura 40 – Impressões de microdureza no perfil 2 da amostra 4.900.1/4.

Os valores encontrados nas medições de microdurezas Vickers para a amostra 4.900.1/4 estão dispostos na Tabela 8. Os perfis 1 e 3 da amostra em questão podem ser visualizado no Apêndice H, na Figura 54.

Tabela 8 – Microdurezas medidas para cada perfil da amostra 4.900.1/4.

Distância da borda (μm)	Perfil 1 (HV)	Perfil 2 (HV)	Perfil 3 (HV)
50	792	883	833
100	930	937	888
150	890	888	873
200	893	938	928
250	755	925	594
300	174	887	113
350	-	134	-
450	115	113	123

Fonte: Autoria própria

Assim como na amostra 2.700.3, a camada formada no tratamento a 900°C também se mostrou ser frágil. Todas as impressões de microdureza geraram trincas na camada, sendo estas maiores que a da amostra tratada a 700°C.

4.4.3 Amostras tratadas a 1050°C

As Figuras 41 e 42 mostram as camadas sem e com desgaste, respectivamente, para a amostra 9.1050.¼, e a Figura 43 mostra, para a mesma amostra, o perfil 2 de microdureza.

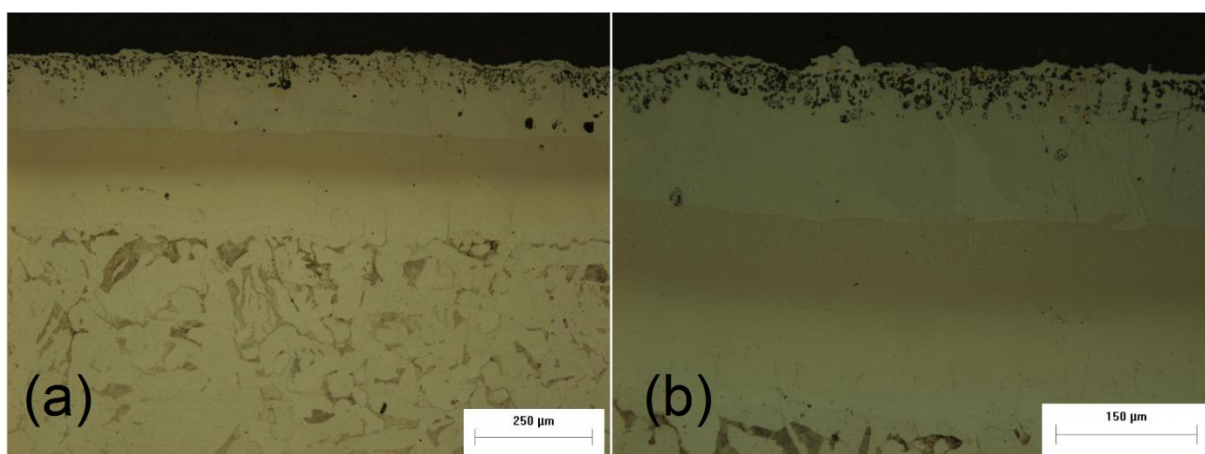


Figura 41 – Camada de intermetálico Fe-Al original (sem desgaste), com aumento de (a) 100x e de (b) 200x, para a amostra 9.1050.¼.

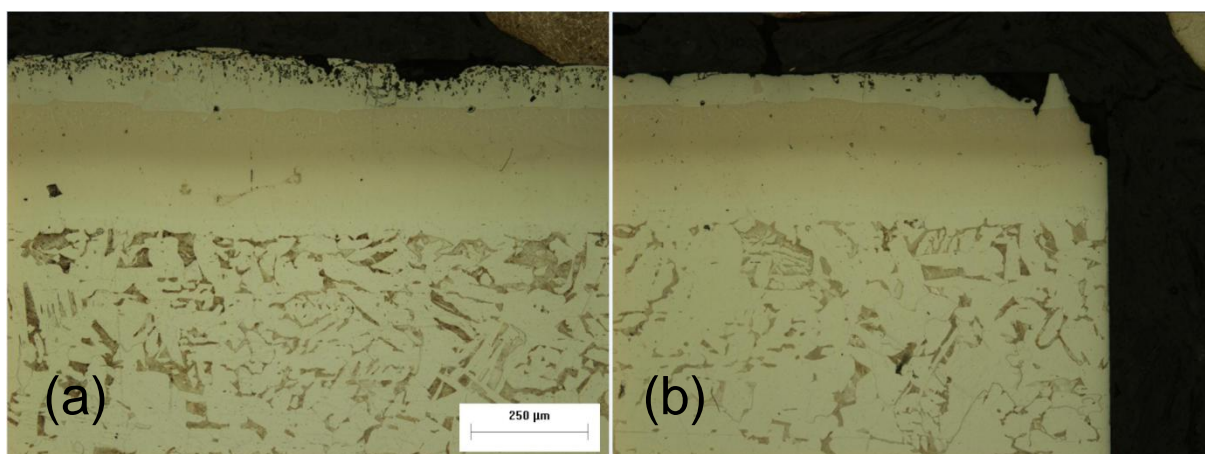


Figura 42 – (a) Camada com desgaste menos profundo e (b) camada com desgaste mais profundo (vale), com aumento de 100x, para a amostra 9.1050.¼.

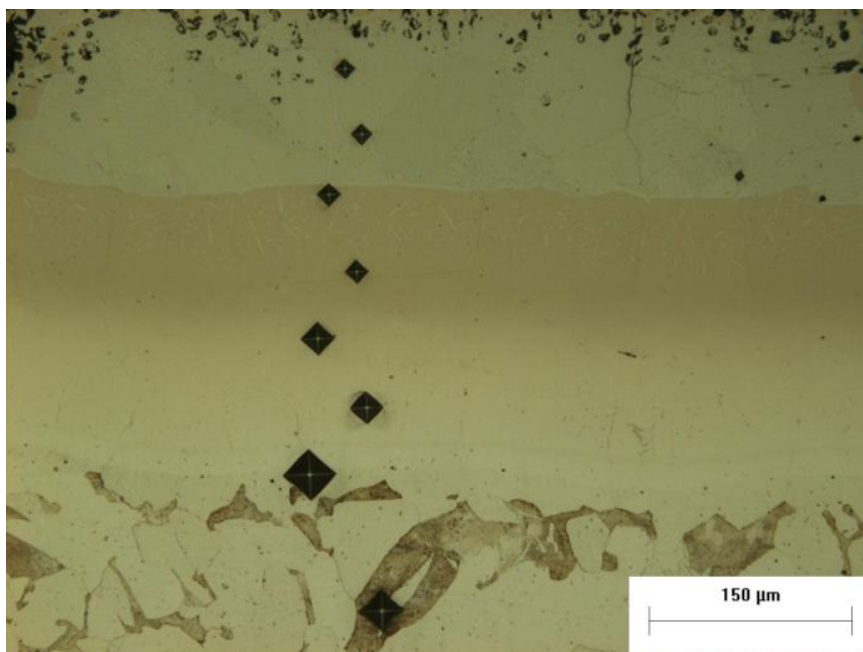


Figura 43 – Impressões microdureza no perfil 2 da amostra 9.1050.¼.

Os valores encontrados nas medições de microdurezas Vickers para a amostra 9.1050.¼ estão dispostos na Tabela 9. Os perfis 1 e 3 da amostra em questão podem ser visualizado no Apêndice H, na Figura 55.

Tabela 9 – Microdurezas medidas para cada perfil da amostra 9.1050.¼.

Distância da borda (μm)	Perfil 1 (HV)	Perfil 2 (HV)	Perfil 3 (HV)
50	670	745	767
100	693	681	735
150	584	565	569
200	526	543	469
250	277	293	227
300	301	323	254
350	130	125	130
450	121	168	121

Fonte: Autoria própria

As três camadas formadas nesta condição não apresentaram qualquer indício de fragilidade. Todas as impressões de microdureza, nos perfis 1, 2 e 3, não geraram trincas.

Os perfis de microdureza nas três amostras selecionadas podem ser comparados no gráfico mostrado na Figura 44.

No gráfico, a primeira linha tracejada, indicada em aproximadamente 180 μm , mostra a distância da superfície até a interface com o substrato para a amostra 2.700.3, as linhas seguintes, indicadas em aproximadamente 280 μm e 345 μm , mostram as distâncias da superfície até a interface com o substrato para as amostras 4.900.¼ e 9.1050.¼, respectivamente.

Sobre a curva resultante das microdurezas na amostra 2.700.3, nota-se que a primeira medida apresentou grande desvio padrão. Isso aconteceu em função dos pontos onde as microdurezas foram medidas: para os perfis 1 e 2, o penetrador foi forçado contra regiões próximas a poros. Isto influenciou para uma medição abaixo da real, que seria próxima da medição no perfil 3, 870 HV.

A maior dureza medida nesta amostra foi no perfil 3, 976 HV a 100 μm , e a média a 50 μm (região que sofreu desgaste durante o ensaio no abrasômetro) foi 678 HV.

Por outro lado, na curva resultante das microdurezas na amostra 4.900.¼, o desvio padrão foi pequeno nos pontos analisados até a distância 200 μm . Porém, em 250 μm , as medidas resultaram em grande desvio padrão, devido ao ponto no qual o penetrador atingiu no perfil 3, que em função da descontinuidade da interface, estava próximo ao substrato. A maior dureza medida nesta amostra foi 938 HV a 200 μm , e a média a 50 μm (região que também foi desgastada durante o ensaio) foi 836 HV.

Na curva resultante das microdurezas na amostra 9.1050.¼, onde são visíveis três camadas distintas, nota-se a existência de três patamares de dureza. As medidas não resultaram em grande desvio padrão, se comparado às outras duas amostras. A dureza média a 50 μm – onde houve desgaste – foi 727 HV, e nesta distância encontrou-se também a maior dureza para nesta amostra: 767 HV.

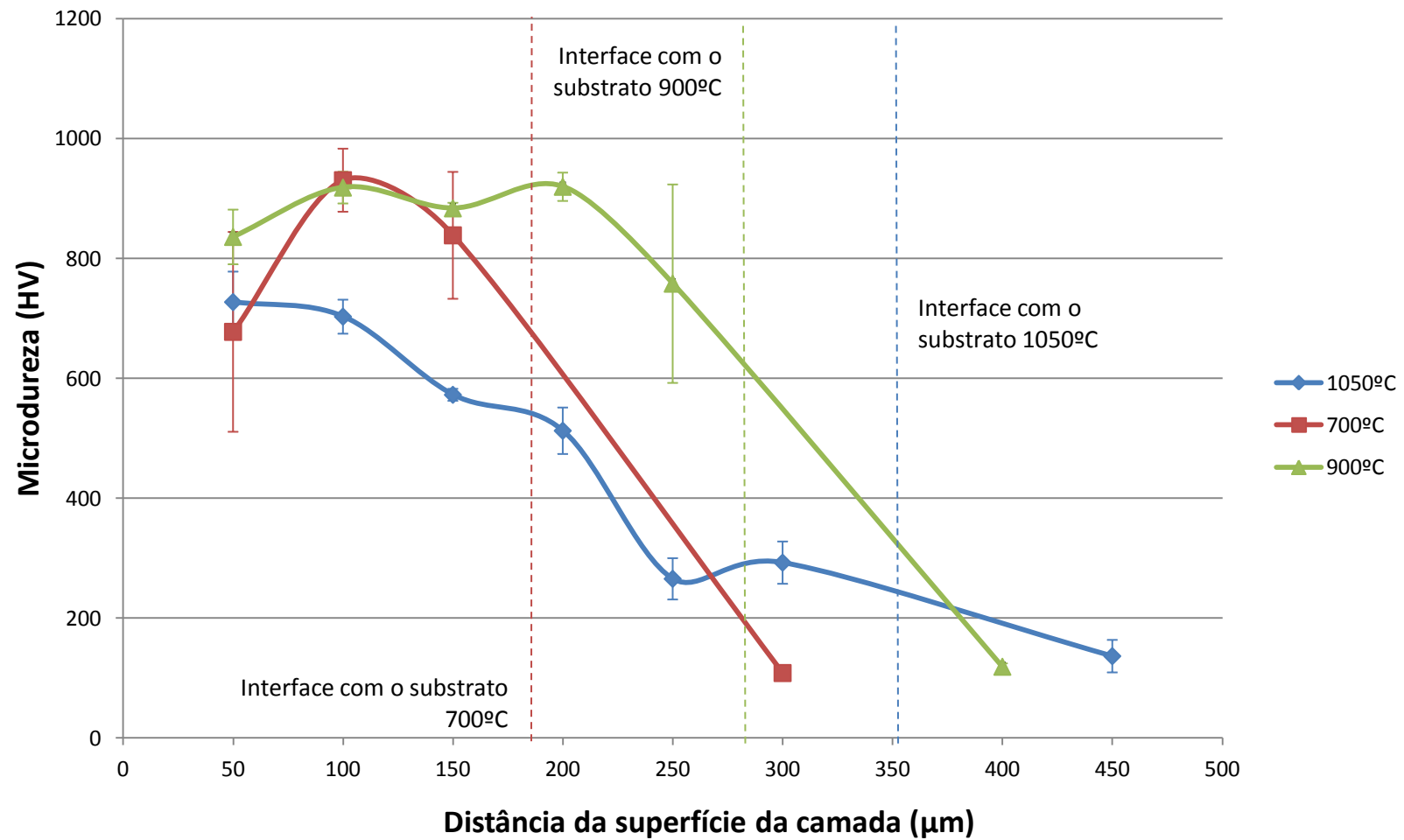


Figura 44 – Microdurezas para as amostras 2.700.3, 4.900.1/4 e 9.1050.1/4, e seus respectivos desvios padrões por ponto de análise.

5 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos no ensaio em roda de borracha, e nas análises das microdurezas e microestruturas, conclui-se que as camadas formadas em tratamento de difusão em reator de plasma na temperatura de 1050°C são as que possuem a melhor resistência ao desgaste abrasivo: elas apresentaram as menores perdas de massa. A pior resistência ao desgaste abrasivo foi da camada formada no tratamento a 900°C.

A resistência ao desgaste abrasivo, analisada através da perda de massa, foi governada pela dureza das camadas ao longo da profundidade que a roda de borracha atingiu, aliada à fragilidade, que foi evidente nas amostras tratadas nas duas menores temperaturas.

Para as camadas de FeAl_3 formadas a 700°C e a 900°C – que apresentaram trincas em função das impressões e microdurezas médias próximas, a resistência ao desgaste abrasivo passou a ser governado pelos tamanhos dos poros, evidentemente maiores na amostra na pior condição.

6 REFERÊNCIAS

ABNT. **Areia Normal para ensaio de cimento**. NBR-7214. Fev/1982.

AHMED, Nadir A.G. **Ion plating technology**. New York, Wiley, 1987.

ALMAN, D. E.; HAWK, J. A.; TYLCZAK J.H.; DOGAN, C. P.; WILSON, R. D. **Wear of iron-aluminide intermetallic-based alloys and composites by hard particles**. Wear 251, Elsevier Science S.A., 2001, pp. 875-884.

ASM Handbook, "**Alloy Phase Diagrams**", Vol. 3, 2007.

_____. **Friction, lubrication, and wear technology**, Vol. 18, 1992.

ASTM International. **Measuring abrasion using the dry sand/rubber wheel apparatus**. Designation: G65 – 04 (Reapproved 2010).

CAPRA, André R. **Desenvolvimento de intermetálicos Fe/Al através de aspersão térmica e tratamento posterior**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFPR, Curitiba, 2005.

CHAPMAN, Brian N. **Glow discharge processes: sputtering and plasma etching**. John Wiley & Sons, New York, 1980.

COZZA, Ronaldo C. **Estudo do desgaste e atrito em ensaios micro-abrasivos por esfera rotativa fixa em condições de força normal constante e pressão constante**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica de Projeto de Fabricação) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

_____; Tanaka, D. K.; Souza, R. M.; **Friction coefficient and abrasive wear modes in ball-bratering tests conducted at constant normal force and constant pressure – preliminary results**. Wear 267, Elsevier Science S.A., 2009, pp. 61-70.

ERBESDOBLER, Eduardo. **Obtenção de intermetálico Fe-Al a partir de depósito de alumínio sobre aço e avaliação de dureza**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Industrial Mecânica – UTFPR, Curitiba, 2010.

EYRE, T. S. **Wear characteristics of metals**. Tribol. Int. 10, 1976, pp. 203-212.

FRANCHIN, Cleverton M.; BARATIERI, Guilherme; MOLETTA, Maicow A. **Projeto e construção de um abrasômetro tipo roda de borracha**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Industrial Mecânica – UTFPR, Curitiba, 2009.

IPP – Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Assoziation. Disponível em: <<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/index.html>>. Acesso em: 12 de outubro de 2011.

ITAL, T. C. “**Processo de enriquecimento de nitrogênio e seu efeito na microestrutura e dureza do aço inoxidável 15 – 5PH**”. Dissertação de Mestrado – Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação – UTFPR, Curitiba, 2008.

JUNIOR, Clodomiro A. **NITRETAÇÃO A PLASMA: Fundamentos e Aplicações**. Extraído de <<http://www.labplasma.ct.ufrn.br/>>. Acesso em: 12 de outubro de 2011, pp. 16-17.

KOBAYASHI, S.; YAKOU, T. **Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment**. Materials Science and Engineering A 338, Elsevier Science S.A., 2002, pp. 44-53.

MA X.; LIU R.; LI D. Y. “**Abrasive wear behavior of D2 tool steel with respect to load and sliding speed und dry sand/rubber wheel abrasion condition**”. Wear 241, Elsevier Science S.A., 2000, pp. 79-85.

NAHVI, S. M.; SHIPWAY, Philip H.; McCARTNEY D. G. **Particle motion and modes of wear in the dry sand-rubber wheel abrasion test.** Wear 267, Elsevier Science S.A., 2009, pp. 2083-2091.

PAREDES, Ramón C.; D'OLIVEIRA, Ana S. C. M.; CAPRA, André R. **Caracterização de aços alonizados utilizados na indústria do petróleo.** 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Curitiba, 2001.

PAREDES, R. C.; RODRIGUEZ, R. M. P. H.; BOND, D.; SILVA, P. S. C. P. da; CAPRA, A.; LIMA, D. F. B. **Comparação da obtenção de intermetálicos FeAl através de aspersão térmica com alumínio e alonização.** 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, Rio de Janeiro, 2003.

PERIN, Leonardo L.; BINDER, Cristiano; KLEIN, Aloísio N. **Extração do polipropileno via plasma em peças cerâmicas.** XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia & VI Feira de Protótipos – UFSC, Florianópolis, 2006.

SASSAKI, Tokio; OKAMURA, Kenjiro. **The Cutting Mechanism of Abrasive Grain.** Bull. Jpn. Soc. Mech. Eng., Vol. 12, 1960, p 547.

SEDRICKS, A. J.; MULHEARN, T. O. **The Effect of Work-Hardening on the Mechanics of Cutting in Simulated Abrasive Processes.** Wear, Vol. 7, 1964, p. 451.

SENDEROWSKI, C.; BOJAR, Z.; WOLCZYNSKI, W.; PAWLOWSKI, A. **Microstructure characterization of D-gun sprayed Fe-Al intermetallic coatings.** Intermetallics 18, Elsevier Science S.A., 2010, pp. 1405-1409.

SHARMA, G.; LIMAYE, P. K.; RAMANUJAN, R. V.; SUNDARARAMAN, M.; PRABHU, N. **Dry-sliding wear studies of Fe₃Al-ordered intermetallic alloy**. Materials Science and Engineering A 386, Elsevier Science S.A., 2004, pp. 403-414.

SILVA, André M. A. da; GMACH, Fábio A. **Determinação da espessura de camadas do intermetálico Fe-Al**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Industrial Mecânica – UTFPR, Curitiba, 2008.

SMALLMAN, Robert E.; BISHOP, Roland J. **Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering**. Butterworth-Heinemann, 1999.

SOEMANTRI, Satryo; McGEE, A. C.; FINNIE, Iain. **Some aspects of abrasive wear at elevated temperatures**. Proceedings of the International Conference on Wear of Materials, American Society of Engineers, 1985.

STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W. **Engineering Tribology**. Butterworth-Heinemann, EUA, 2011, pp. 483-508.

TREZONA, R. I.; ALLSOPP, D. N.; Hutchings, I. M. **Transitions between two-body and three-body abrasive wear: influence of test conditions in the microscale abrasive wear test**. Wear 225-229, Elsevier Science S.A., 1999, pp. 205-214.

VAN VLACK, Lawrence H. **Princípios de ciência e tecnologia dos materiais**. Campus, 4^a ed. 1984.

WIROJANUPATUMP, Sittichai; SHIPWAY Philip H. **Abrasion of mild steel in wet and dry conditions with the rubber and steel wheel abrasion apparatus**. Wear 239, Elsevier Science S.A., 2000, pp. 91-101.

APÊNDICE A – CRONOGRAMA DO PROJETO

Atividade	ago/11		set/11		out/11		nov/11		dez/11		jan/12		fev/12		mar/12		abr/12		mai/12		jun/12		jul/12		ago/12		set/12		out/12	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
PLANO de Proj. Pesquisa																														
EXECUÇÃO do Proj. Pesquisa																														
Termo de Abertura			x																											
Estruturação da PPP			x																											
Reuniões com o PO	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x	x	x		x		x		x		x	x	x	x	x	x	
Pesquisa da Rev. Bib.		x	x	x	x																									
Definição da metodologia da pesq.				x																										
Elaboração da PPP			x	x	x																									
Entrega do relatório da PPP						x																								
Elaboração da apresentação da PPP						x	x																							
Apresentação da PPP parcial							x																							
Entrega da versão final da PPP								x																						
Preparação das amostras (corte, lixamento)										x																				
Fabricação de dispositivos para tratamento em atm. Controlada										x	x																			
Tratamento em atmosfera controlada												x	x																	
Ensaio de desgaste abrasivo																					x	x								
Análises dos resultados																					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Caracterização das camadas																						x	x	x	x	x	x	x		
Elaboração do texto																						x	x	x	x	x	x	x		
Elaboração de Artigo Cient.																														x
(*) Entrega do texto da EPP																														x
(*) Elaboração da apresentação da EPP																													x	
(*) Apresentação da EPP																														x
(*) Entrega da versão final da EPP																														x

Quadro 1 – Cronograma do projeto

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE B – ORÇAMENTO DO PROJETO

Tabela 10 – Orçamento do projeto.

Item	Unidade de consumo	Quantidade estimada	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)	Fonte
Amostras	kg	2	4,00	8,00	Material de consumo UTFPR
Deposição de Al (aspersão térmica)	Hora	1	200,00	200,00	Doação
Fabricação dos dispositivos (trat. térmico)	Peça	2	50,00	100,00	UTFPR
Energia elétrica - Plasma (100 W)	kWh	1	0,26	0,28	UTFPR
Energia elétrica - Bomba (trat. térmico)	kWh	8	0,26	2,09	UTFPR
Gás	m ³	0	120,00	38,70	Material de consumo UTFPR
Saco de Areia de 50 kg	Unidade	1	50,00	50,00	Doação
Energia elétrica - Motor (ensaio abrasômetro)	kWh	2	0,26	0,48	UTFPR
Disco de corte usual	Unidade	1	10,00	10,00	
Pano de polimento usual	Unidade	1	10,00	10,00	
Lixas d'água usual	Unidade	20	0,50	10,00	
Disco de desbaste APEX DGD	Unidade	1/50	910,67	18,21	
Pano de polimento MICROCLOTH	Unidade	1/10	26,99	2,70	Material de consumo UTFPR
Solução Metal DiSupreme (diamante 9 µm)	ml	50	0,55	27,32	
Solução diamante 3 µm	ml	50	0,55	27,74	
Análise MEV	Hora	2	180,00	360,00	PPGEM
Impressões e encadernações	Unidade	600	0,10	60,00	Alunos
TOTAL	-	-	-	925,52	-
TOTAL EQUIPE	-	-	-	60,00	-

Fonte: Autoria Própria

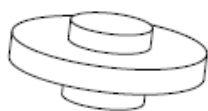
APÊNDICE C – ESPESSURAS EM CONDIÇÕES INICIAIS, ITERAÇÕES, ESPESSURAS MÉDIAS PARCIAIS E A CONDIÇÃO FINAL APROXIMADA DA CAMADA DE ALUMÍNIO

Amostra	Iteração	Ponto 1 (mm)	Ponto 2 (mm)	Ponto 3 (mm)	Ponto 4 (mm)	Ponto 5 (mm)	Ponto 6 (mm)	Ponto 7 (mm)	Ponto 8 (mm)	Ponto 9 (mm)	Ponto 10 (mm)	Tamanho médio da amostra (mm)	Varição média da camada (µm)	Tamanho médio da camada (µm)
1.700.3	0	6,853	6,876	6,875	6,847	6,858	6,851	6,839	6,834	6,860	6,850	6,8543	0,0	287,5
	1	6,840	6,853	6,839	6,827	6,830	6,820	6,825	6,813	6,833	6,829	6,8309	23,4	264,1
	2	6,817	6,830	6,821	6,806	6,820	6,800	6,829	6,803	6,843	6,836	6,8205	33,8	253,7
	3	6,831	6,819	6,827	6,811	6,817	6,805	6,826	6,816	6,840	6,828	6,8220	32,3	255,2
	4	6,832	6,838	6,817	6,830	6,805	6,819	6,805	6,814	6,815	6,825	6,8200	34,3	253,2
3.700.3	0	6,802	6,848	6,805	6,840	6,809	6,837	6,804	6,833	6,802	6,825	6,8205	0,0	287,5
	1	6,796	6,783	6,808	6,789	6,816	6,793	6,817	6,789	6,818	6,793	6,8002	20,3	267,2
	2	6,796	6,777	6,803	6,786	6,811	6,788	6,809	6,786	6,808	6,782	6,7946	25,9	261,6
	3	6,795	6,773	6,802	6,783	6,807	6,785	6,805	6,782	6,804	6,779	6,7915	29,0	258,5
	4	6,775	6,803	6,787	6,804	6,788	6,805	6,785	6,798	6,778	6,788	6,7911	29,4	258,1
5	6,783	6,764	6,791	6,777	6,800	6,778	6,797	6,776	6,780	6,771	6,7817	38,8	248,7	
8.1050.¼	0	6,901	6,855	6,901	6,860	6,915	6,888	6,925	6,878	6,932	6,894	6,8949	0,0	287,5
	1	6,887	6,919	6,863	6,905	6,852	6,881	6,851	6,885	6,861	6,886	6,8790	15,9	271,6
	2	6,874	6,914	6,868	6,899	6,848	6,868	6,844	6,866	6,852	6,873	6,8706	24,3	263,2
	3	6,881	6,912	6,864	6,896	6,845	6,865	6,838	6,865	6,846	6,869	6,8681	26,8	260,7
	4	6,630	6,833	6,860	6,832	6,857	6,836	6,884	6,851	6,911	6,877	6,8371	57,8	229,7
2.700.3	0	6,860	6,889	6,855	6,882	6,859	6,882	6,849	6,896	6,845	6,880	6,8697	0,0	287,5
	1	6,848	6,876	6,839	6,867	6,824	6,855	6,825	6,852	6,834	6,857	6,8477	22,0	265,5
	2	6,843	6,871	6,832	6,864	6,824	6,851	6,815	6,846	6,824	6,852	6,8422	27,5	260,0
	3	6,852	6,821	6,843	6,817	6,846	6,821	6,849	6,821	6,854	6,831	6,8355	34,2	253,3
	4	6,830	6,851	6,820	6,845	6,821	6,841	6,817	6,842	6,823	6,849	6,8339	35,8	251,7
6.900.¼	0	6,801	6,825	6,808	6,826	6,807	6,817	6,824	6,836	6,833	6,852	6,8229	0,0	287,5
	1	6,816	6,795	6,823	6,806	6,818	6,804	6,818	6,800	6,810	6,792	6,8082	14,7	272,8
	2	6,771	6,791	6,785	6,811	6,802	6,811	6,799	6,817	6,789	6,813	6,7989	24,0	263,5
	3	6,773	6,795	6,788	6,811	6,791	6,808	6,794	6,814	6,784	6,806	6,7964	26,5	261,0
	4	6,796	6,777	6,806	6,791	6,802	6,790	6,801	6,782	6,792	6,768	6,7905	32,4	255,1
5	6,759	6,783	6,773	6,798	6,781	6,798	6,787	6,805	6,784	6,799	6,7867	36,2	251,3	
7.1050.¼	0	6,918	6,948	6,910	6,943	6,901	6,944	6,918	6,943	6,905	6,952	6,9282	0	395,9
	1	6,871	6,914	6,858	6,893	6,855	6,885	6,872	6,892	6,871	6,889	6,8800	48,2	347,7
	2	6,870	6,906	6,845	6,880	6,844	6,876	6,853	6,883	6,846	6,877	6,8680	60,2	335,7
	3	6,850	6,879	6,827	6,858	6,838	6,865	6,844	6,872	6,835	6,869	6,8537	74,5	321,4
	4	6,837	6,866	6,809	6,837	6,817	6,842	6,834	6,854	6,831	6,854	6,8381	90,1	305,8
	5	6,826	6,854	6,795	6,828	6,797	6,827	6,809	6,834	6,809	6,836	6,8215	106,7	289,2
	6	6,821	6,846	6,784	6,818	6,786	6,814	6,800	6,823	6,797	6,820	6,8109	117,3	278,6
7	6,809	6,835	6,765	6,798	6,761	6,798	6,771	6,799	6,770	6,794	6,7900	138,2	257,7	
4.900.¼	0	7,004	6,963	6,989	6,963	6,983	6,943	6,986	6,958	6,988	6,946	6,9723	0	395,9
	1	6,940	6,912	6,939	6,905	6,935	6,913	6,926	6,905	6,921	6,887	6,9183	54,0	341,9
	2	6,927	6,893	6,926	6,896	6,926	6,902	6,916	6,892	6,908	6,876	6,9062	66,1	329,8
	3	6,863	6,886	6,871	6,898	6,886	6,908	6,878	6,906	6,873	6,903	6,8872	85,1	310,8
	4	6,893	6,860	6,898	6,873	6,904	6,885	6,896	6,875	6,887	6,864	6,8835	88,8	307,1
	4	6,888	6,854	6,887	6,853	6,890	6,859	6,880	6,855	6,866	6,846	6,8678	104,5	291,4
	5	6,883	6,842	6,877	6,849	6,878	6,852	6,867	6,836	6,852	6,829	6,8565	115,8	280,1
	6	6,877	6,829	6,870	6,834	6,871	6,836	6,856	6,829	6,842	6,817	6,8461	126,2	269,7
	8	6,871	6,827	6,863	6,822	6,861	6,830	6,846	6,817	6,828	6,798	6,8363	136,0	259,9
7	6,793	6,818	6,806	6,836	6,822	6,848	6,821	6,858	6,827	6,862	6,8291	143,2	252,7	
5.900.¼	0	6,927	6,973	6,907	6,961	6,908	6,948	6,920	6,957	6,929	6,954	6,9384	0	395,9
	1	6,909	6,948	6,888	6,926	6,865	6,867	6,873	6,895	6,893	6,914	6,8978	40,6	355,3
	2	6,900	6,925	6,873	6,895	6,840	6,861	6,848	6,867	6,881	6,901	6,8791	59,3	336,6
	3	6,866	6,894	6,828	6,863	6,803	6,830	6,812	6,839	6,848	6,868	6,8451	93,3	302,6
	4	6,853	6,880	6,820	6,849	6,792	6,811	6,808	6,831	6,840	6,867	6,8351	103,3	292,6
	5	6,836	6,870	6,806	6,831	6,770	6,793	6,785	6,805	6,826	6,844	6,8166	121,8	274,1
6	6,831	6,852	6,792	6,811	6,754	6,778	6,761	6,788	6,803	6,819	6,7989	139,5	256,4	
9.1050.¼	0	7,007	7,029	7,024	7,025	7,019	7,043	6,993	7,015	6,990	7,013	7,0158	0	395,9
	1	6,949	6,968	6,961	6,985	6,968	6,996	6,953	6,961	6,918	6,929	6,959	57,0	338,9
	2	6,938	6,958	6,951	6,977	6,956	6,976	6,930	6,950	6,908	6,926	6,947	68,8	327,1
	3	6,917	6,940	6,933	6,952	6,935	6,966	6,906	6,932	6,876	6,900	6,926	90,1	305,8
	4	6,895	6,905	6,907	6,923	6,913	6,926	6,887	6,902	6,853	6,868	6,898	117,9	278,0
5	6,872	6,891	6,888	6,907	6,895	6,916	6,866	6,893	6,833	6,851	6,8812	134,6	261,3	

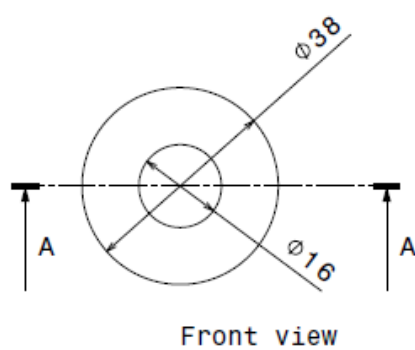
Quadro 2 – Espessuras iniciais, iterações, espessuras médias parciais e condição final aproximada da camada de Al após preparação para os tratamentos térmicos de difusão

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE D – SUPORTE PARA O TERMOPAR E RECIPIENTES PARA O TRATAMENTO TÉRMICO NO REATOR DE PLASMA

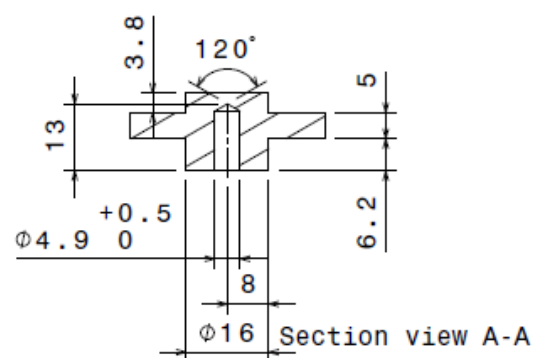


Isometric view



Front view

CORTE A-A



Section view A-A

Figura 45 – Desenho do suporte para o termopar e recipientes (unidade: mm).

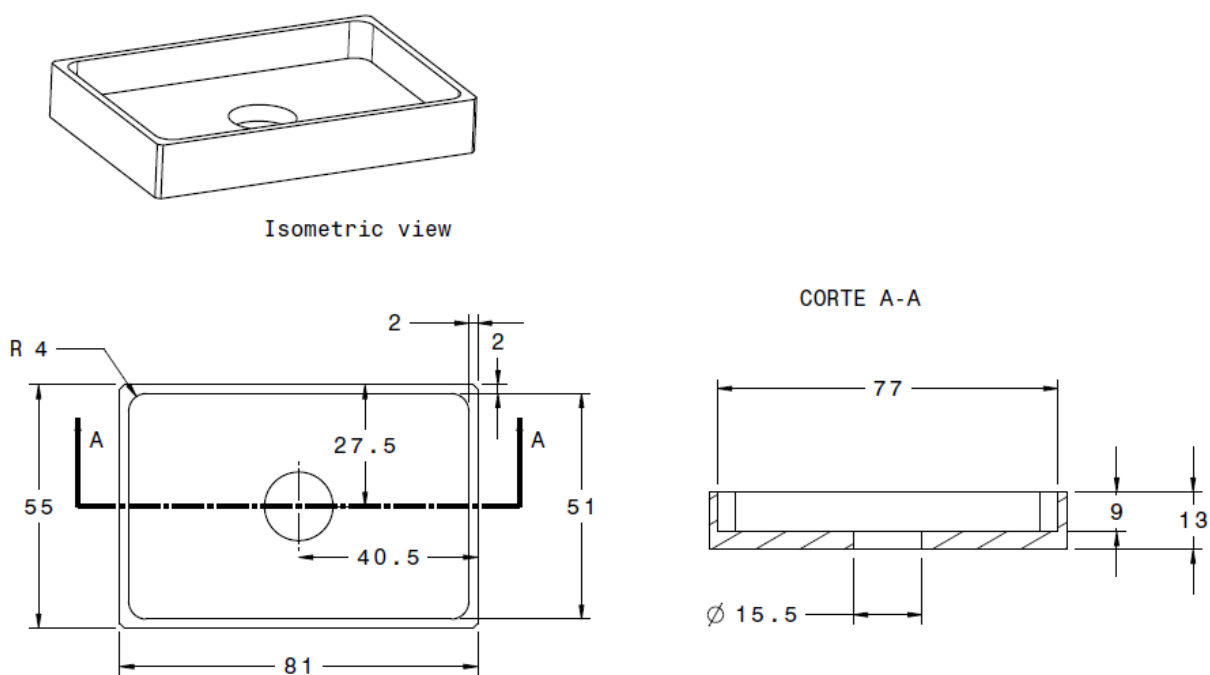


Figura 46 – Recipiente para tratamentos das amostras a 700°C (unidade: mm).

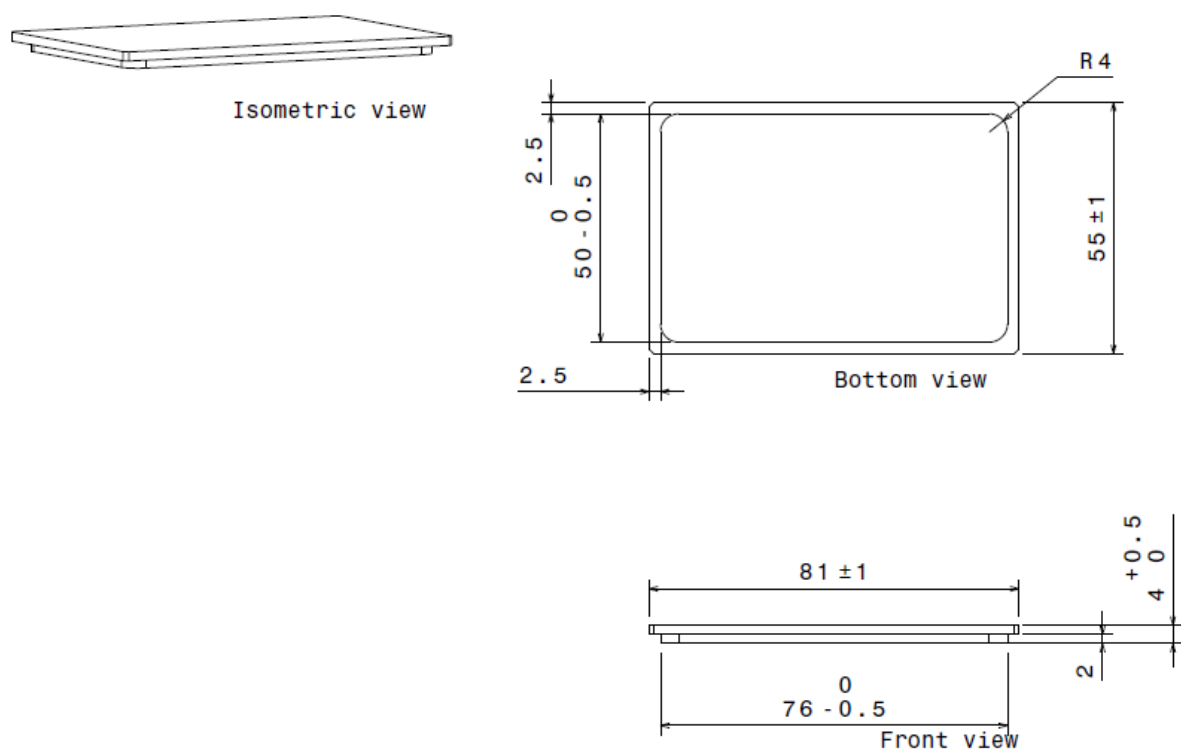
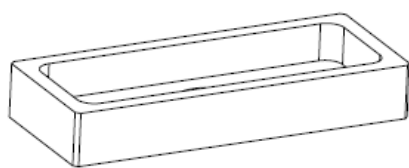
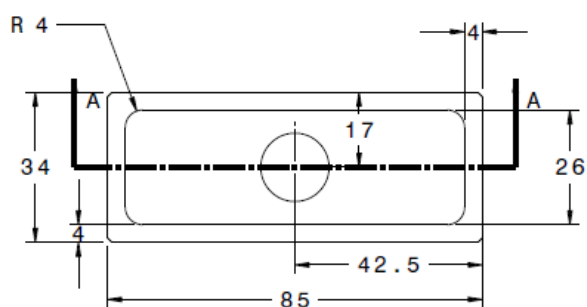


Figura 47 – Tampa do recipiente para tratamentos das amostras a 700°C (unidade: mm).

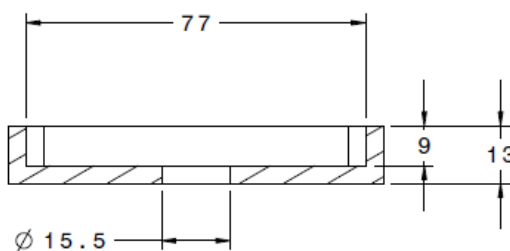


Isometric view



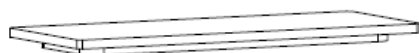
Front view

CORTE A-A

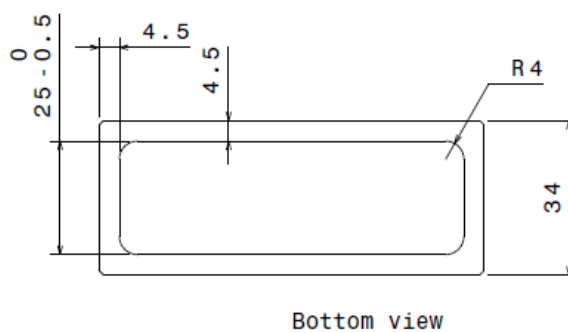


Section view A-A

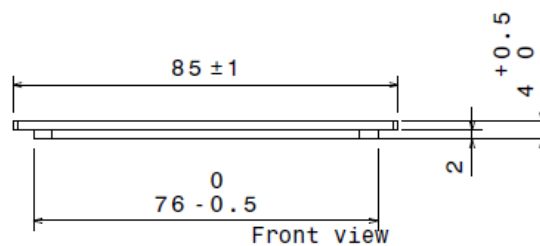
Figura 48 – Recipiente para tratamentos das amostras a 900°C e 1050°C (unidades: mm).



Isometric view



Bottom view



Front view

Figura 49 – Tampa do recipiente para tratamentos das amostras a 900°C e 1050°C (unidades: mm)

APÊNDICE E – TABELAS DE AQUECIMENTOS DAS AMOSTRAS DURANTE OS TRATAMENTOS TÉRMICOS

Projeto Final II - Heloise N. Okura e Bruno F. Luzzi - Engenharia Ind. Mecânica Aquecimento no reator de plasma					
Data:		05/01/2012		Amostras:	1.700.3 e 3.700.3
Condições:		Temperatura:	700°C		
		Tempo:	3h		
		Pressão:	12 Torr		
Gás	Mistura gasosa (%)	Fluxo (sccm)	Fluxímetro (Volts)		
H ₂	20	80	0,8		
Ar	80	320	2,28		
Hora	I (A)	(V)	(°C)	P (V)*	
11:18	Início da descarga usando somente H ₂ : 350 sccm - 3,5 Volts				
11:32	Início do aquecimento usando 20% H ₂ e 80% Ar				
	0,03	364	50	6,14	
11:37	0,13	230	60	6,11	
11:42	0,14	245	89	6,11	
11:47	1,4	275	201	7,2	
11:52	1,25	263	357	7,23	
11:57	1,46	212	550	7,25	
12:02	1,68	206	596	7,21	
12:07	2,38	209	672	7,2	
12:10	Atingimento da temperatura de tratamento				
12:12	1,05	196	706	7,2	
12:17	1,04	199	703	7,2	
12:22	1,14	204	697	7,2	
12:30	1,22	204	696	7,21	
12:45	1,25	205	704	7,22	
13:00	1,19	210	707	7,2	
13:15	1,1	218	700	7,21	
13:30	1,07	2,23	701	7,22	
13:45	1,02	226	692	7,18	
14:00	1,05	229	709	7,18	
14:15	1,13	235	696	7,21	
14:30	1,1	235	701	7,21	
14:45	1,1	237	699	7,21	
15:00	1,12	239	698	7,22	
15:10	1,12	239	697	7,22	
	Fim do tratamento				

Projeto Final II - Heloise N. Okura e Bruno F. Luzzi - Engenharia Ind. Mecânica
Aquecimento no reator de plasma

Data: 05/01/2012 Amostras: 2.700.3 e amostra extra

Condições: Temperatura: 700°C
Tempo: 3h
Pressão: 12 Torr

Gás	Mistura gasosa (%)	Fluxo (sccm)	Fluxímetro (Volts)
H ₂	20	80	0,8
Ar	80	320	2,28

Hora	I (A)	(V)	(°C)	P (V)*
17:08	Início da descarga usando somente H ₂ : 350 sccm - 3,5 Volts			
17:23	Início do aquecimento usando 20% H ₂ e 80% Ar			
	0,14	252	82	6,04
17:28	0,52	234	140	6,86
17:33	1,5	260	215	7,21
17:38	2,05	270	431	7,22
17:43	1,69	241	535	7,21
17:48	1,55	227	574	7,21
17:53	2,29	229	635	7,22
17:58	2,17	246	687	7,22
18:00	Atingimento da temperatura de tratamento			
	1,76	243	700	7,22
18:05	1,37	239	708	7,22
18:10	1,19	248	704	7,19
18:15	1,08	250	699	7,21
18:30	1,17	256	704	7,21
18:45	1,19	262	699	7,2
19:00	1,15	260	708	7,2
19:15	1,13	262	694	7,2
19:30	1,21	266	700	7,2
19:45	1,16	265	699	7,21
20:00	1,17	266	698	7,2
20:15	1,18	267	698	7,2
20:30	1,17	267	697	7,21
20:45	1,18	267	697	7,21
21:00	1,18	267	697	7,21
	Fim do tratamento			

Projeto Final II - Heloise N. Okura e Bruno F. Luzzi - Engenharia Ind. Mecânica Aquecimento no reator de plasma				
Data:	12/02/2012	Amostras:	6.900.¼	
Condições:	Temperatura:	900°C		
	Tempo:	15 min		
	Pressão:	12 Torr		
Gás	Mistura gasosa (%)	Fluxo (sccm)	Fluxímetro (Volts)	
H ₂	20	80	0,8	
Ar	80	320	2,28	
Hora	I (A)	(V)	(°C)	P (V)*
14:08	Início da descarga usando somente H ₂ : 350 sccm - 3,5 Volts			
	0,03	353	31	6,13
14:21	Início do aquecimento usando 20% H ₂ e 80% Ar			
	0,22	282	65	6,01
14:26	0,45	245	98	7,21
14:31	1,77	251	420	7,19
14:36	2,4	281	738	7,22
14:39	Atingimento da temperatura de tratamento			
	1,45	314	911	7,23
14:44	1,55	309	899	7,22
14:49	1,44	307	904	7,23
14:54	Fim do tratamento			

Projeto Final II - Heloise N. Okura e Bruno F. Luzzi - Engenharia Ind. Mecânica Aquecimento no reator de plasma					
Data:		12/02/2012		Amostras:	4.900.¼
Condições:		Temperatura:	900°C		
		Tempo:	15 min		
		Pressão:	12 Torr		
Gás	Mistura gasosa (%)	Fluxo (sccm)	Fluxímetro (Volts)		
H ₂	20	80	0,8		
Ar	80	320	2,28		
Hora	I (A)	(V)	(°C)	P (V)*	
16:00	Início da descarga usando somente H ₂ : 350 sccm - 3,5 Volts				
	0,01	330	141	6,16	
16:09	Início do aquecimento usando 20% H ₂ e 80% Ar				
	0,33	278	179	7,26	
16:14	0,45	336	268	7,24	
16:19	1,04	293	468	7,22	
16:24	1,56	306	629	7,23	
16:28	Atingimento da temperatura de tratamento				
	1,74	301	900	7,24	
16:33	1,55	302	901	7,24	
16:38	1,45	299	905	7,24	
16:43	Fim do tratamento				

Projeto Final II - Heloise N. Okura e Bruno F. Luzzi - Engenharia Ind. Mecânica Aquecimento no reator de plasma				
Data:	12/02/2012		Amostras:	5.900.¼
Condições:	Temperatura:	900°C		
	Tempo:	15 min		
	Pressão:	12 Torr		
Gás	Mistura gasosa (%)	Fluxo (sccm)	Fluxímetro (Volts)	
H ₂	20	80	0,8	
Ar	80	320	2,28	
Hora	I (A)	(V)	(°C)	P (V)*
19:12	Início da descarga usando somente H ₂ : 350 sccm - 3,5 Volts			
	0,01	291	34	6,13
19:22	Início do aquecimento usando 20% H ₂ e 80% Ar			
	0,36	220	77	6,97
19:27	1,64	246	340	7,19
19:32	2,9	229	565	7,2
19:37	Atingimento da temperatura de tratamento			
	1,71	305	906	7,21
19:42	1,4	299	900	7,21
19:47	1,41	305	900	7,2
19:52	Fim do tratamento			
	1,36	306	898	7,2

Projeto Final II - Heloise N. Okura e Bruno F. Luzzi - Engenharia Ind. Mecânica Aquecimento no reator de plasma					
Data:		14/02/2012		Amostras:	8.1050.¼
Condições:		Temperatura:		1050°C	
		Tempo:		15 min	
		Pressão:		12 Torr	
Gás	Mistura gasosa (%)	Fluxo (sccm)	Fluxímetro (Volts)		
H ₂	20	80	0,8		
Ar	80	320	2,28		
Hora	I (A)	(V)	(°C)	P (V)*	
09:19	Início da descarga usando somente H2: 350 sccm - 3,5 Volts				
	0,01	326	28	6,12	
09:25	Início do aquecimento usando 20% H2 e 80% Ar				
	0,61	260	80	6,65	
09:30	1,57	284	385	7,23	
09:35	1,8	309	655	7,19	
09:40	2,06	296	830	7,21	
09:45	2,34	350	1023	7,21	
09:50	1,64	270	1001	7,41	
09:55	0,82	575	988	7,22	
10:00	2,46	325	1068	7,19	
10:01	Atingimento da temperatura de tratamento				
	2,46	308	1050	7,19	
10:06	2,21	308	1051	7,23	
10:11	2,17	302	1052	7,24	
10:14	Fim do tratamento				
	2,18	297	1049	7,23	

Projeto Final II - Heloise N. Okura e Bruno F. Luzzi - Engenharia Ind. Mecânica
Aquecimento no reator de plasma

Data: 14/02/2012 Amostras: 7.1050.¼

Condições: Temperatura: 1050°C
Tempo: 15 min
Pressão: 12 Torr

Gás	Mistura gasosa (%)	Fluxo (sccm)	Fluxímetro (Volts)
H ₂	20	80	0,8
Ar	80	320	2,28

Hora	I (A)	(V)	(°C)	P (V)*
12:31	Início da descarga usando somente H ₂ : 350 sccm - 3,5 Volts			
	0,02	305	32	6,15
12:35	Início do aquecimento usando 20% H ₂ e 80% Ar			
	0,12	226	45	6,21
12:40	0,58	237	131	6,82
12:45	1,01	236	361	7,24
12:50	1,78	220	510	7,21
12:55	1,96	238	723	7,23
13:00	2,01	236	852	7,23
13:05	2,22	313	965	7,23
13:09	Atingimento da temperatura de tratamento			
	2,45	335	1050	7,23
13:14	2,06	315	1051	7,23
13:19	2,15	313	1051	7,23
13:24	Fim do tratamento			
	2,13	309	1050	7,23

Projeto Final II - Heloise N. Okura e Bruno F. Luzzi - Engenharia Ind. Mecânica Aquecimento no reator de plasma				
Data:	19/04/2012		Amostras:	9.1050.¼
Condições:	Temperatura:	1050°C		
	Tempo:	15 min		
	Pressão:	12 Torr		
Gás	Mistura gasosa (%)	Fluxo (sccm)	Fluxímetro (Volts)	
H ₂	20	80	0,8	
Ar	80	320	2,28	
Hora	I (A)	(V)	(°C)	P (V)*
19:09	Início da descarga usando somente H ₂ : 350 sccm - 3,5 Volts			
	0,08	396	17	6,24
19:30	Início do aquecimento usando 20% H ₂ e 80% Ar			
	0,39	352	100	5,93
19:36	1,05	307	209	6,6
19:41	0,93	339	457	6,64
19:51	1,75	254	681	7,29
19:56	1,75	254	739	7,21
20:01	1,94	279	816	7,22
20:06	2,2	310	931	7,37
20:16	2,54	329	909	7,93
20:21	3,26	292	1039	7,94
20:22	Atingimento da temperatura de tratamento			
20:27	3,09	266	1048	7,96
20:32	3,08	260	1051	7,97
20:37	Fim do tratamento			

APÊNDICE F – VALORES MEDIDOS NA PESAGEM DAS AMOSTRAS ANTES E DEPOIS DOS ENSAIOS DE DESGASTE

Tabela 11 – Valores medidos na pesagem das amostras antes do ensaio de desgaste abrasivo

Amostra	Medida 1 (gramas)	Medida 2 (gramas)	Medida 3 (gramas)	Massa média (gramas)
1.700.3	95,5300	95,5300	95,5299	95,5300
2.700.3	96,7791	96,7791	96,7789	96,7790
3.700.3	95,7518	95,7520	95,7520	95,7519
4.900.¼	95,6774	95,6776	95,6777	95,6776
5.900.¼	95,6031	95,6032	95,6032	95,6032
6.900.¼	95,4252	95,4253	95,4252	95,4252
7.1050.¼	95,3361	95,3360	95,3360	95,3360
8.1050.¼	94,6018	94,6019	94,6019	94,6019
9.1050.¼	92,8442	92,8442	92,8442	92,8442

Fonte: Autoria própria

Tabela 12 – Valores medidos na pesagem das amostras após os ensaios de desgaste abrasivo

Amostra	Medida 1 (gramas)	Medida 2 (gramas)	Medida 3 (gramas)	Massa média (gramas)
1.700.3	95,4811	95,4813	95,4813	95,4812
2.700.3	96,7296	96,7294	96,7295	96,7295
3.700.3	95,7019	95,7020	95,7019	95,7019
4.900.¼	95,6216	95,6217	95,6215	95,6216
5.900.¼	95,5423	95,5422	95,5423	95,5423
6.900.¼	AMOSTRA PERDIDA			
7.1050.¼	95,2940	95,2942	95,2941	95,2941
8.1050.¼	94,5634	94,5635	94,5633	94,5634
9.1050.¼	92,7993	92,7993	92,7994	92,7993

Fonte: Autoria própria

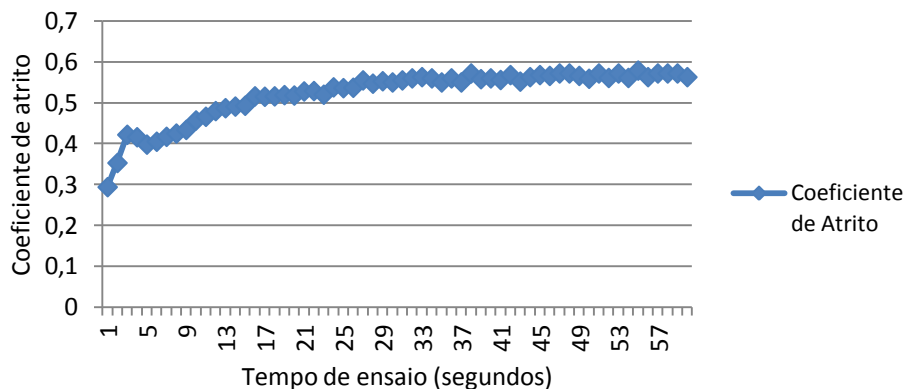
**APÊNDICE G – COEFICIENTES DE ATRITO INSTANTÂNEOS
ENTRE RODA DE BORRACHA E AMOSTRAS 2.700.3, 4.900.1/4 E
9.1050.1/4, E FORÇAS NORMAIS E TANGENCIAIS DA CÉLULA DE
CARGA DURANTE OS ENSAIOS DE DESGASTE**

Tabela 13 – Tabela com forças normais e tangenciais e coeficiente de atrito durante ensaio de desgaste da amostra 2.700.3.

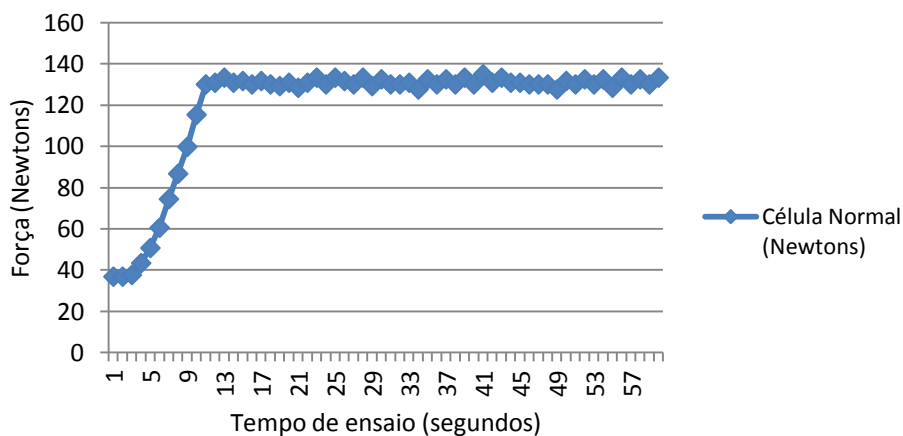
Tempo (segundos)	Célula Normal (Newtons)	Célula Tangente (Newtons)	Coeficiente de Atrito
1	36,788	12,984	0,353
3	43,328	18,033	0,416
5	60,495	24,525	0,405
7	86,655	36,788	0,425
9	115,268	52,657	0,457
11	130,8	62,755	0,48
13	130,8	64,198	0,491
15	129,983	67,083	0,516
17	129,983	67,083	0,516
19	130,8	67,804	0,518
21	130,8	69,247	0,529
23	129,983	69,968	0,538
25	131,618	70,69	0,537
27	133,252	72,854	0,547
29	132,435	72,854	0,55
31	129,983	72,854	0,56
33	127,53	71,411	0,56
35	129,983	72,854	0,56
37	129,983	74,296	0,572
39	129,983	72,854	0,56
41	130,8	74,296	0,568
43	130,8	73,575	0,563
45	129,983	73,575	0,566
47	129,983	74,296	0,572
49	131,618	73,575	0,559
51	132,435	74,296	0,561
53	132,435	74,296	0,561
55	133,252	75,018	0,563
57	132,435	75,739	0,572
59	133,252	75,018	0,563

Fonte: Autoria própria.

Coeficiente de Atrito



Célula Normal



Célula Tangente

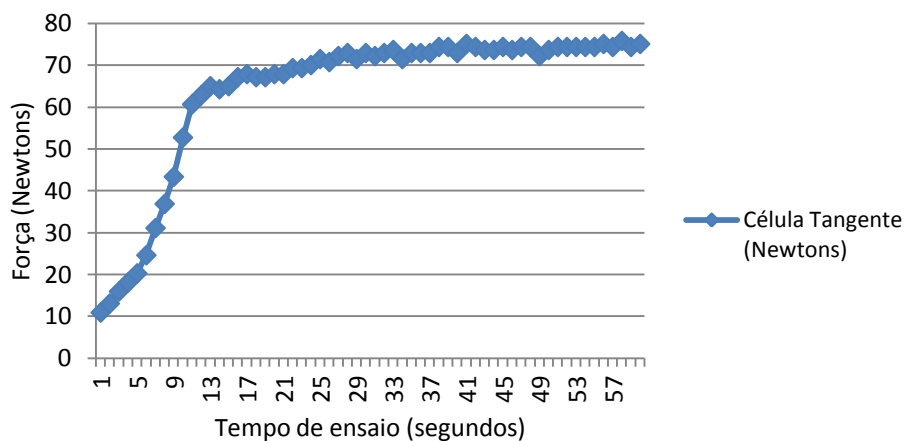


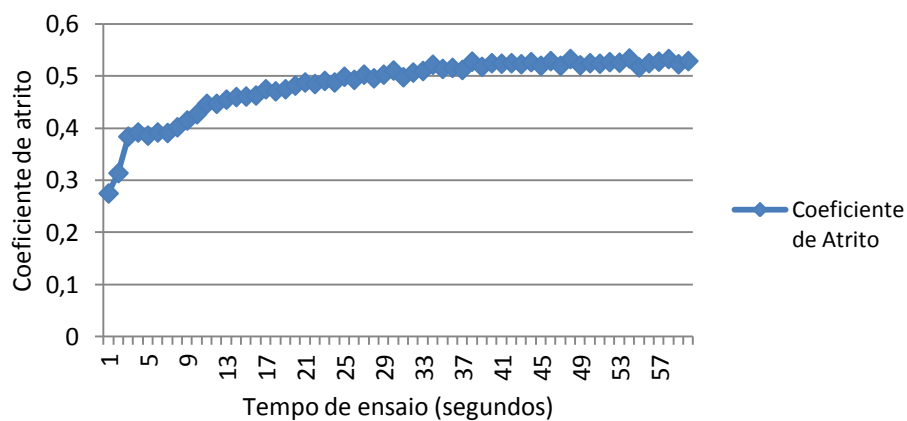
Figura 50 – Gráficos do coeficiente de atrito e das forças normais e tangenciais durante o ensaio de desgaste da amostra 2.700.3.

Tabela 14 – Forças normais e tangenciais e coeficiente de atrito durante ensaio de desgaste da amostra 2.700.3.

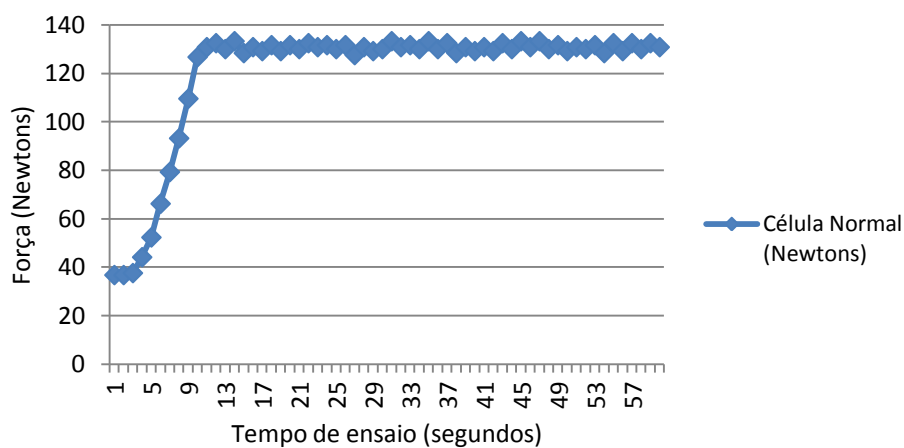
Tempo (segundos)	Célula Normal (Newtons)	Célula Tangente (Newtons)	Coeficiente de Atrito
1	36,788	11,541	0,314
3	44,145	17,312	0,392
5	66,218	25,968	0,392
7	93,195	37,509	0,402
9	126,712	54,099	0,427
11	132,435	59,149	0,447
13	133,252	61,312	0,46
15	130,8	60,591	0,463
17	131,618	62,034	0,471
19	131,618	63,476	0,482
21	132,435	64,198	0,485
23	131,618	64,198	0,488
25	131,618	64,919	0,493
27	130,8	64,919	0,496
29	129,983	66,362	0,511
31	130,8	66,362	0,507
33	129,983	67,804	0,522
35	129,983	67,083	0,516
37	128,348	67,804	0,528
39	129,165	67,804	0,525
41	129,165	67,804	0,525
43	129,983	68,526	0,527
45	130,8	69,247	0,529
47	129,983	69,247	0,533
49	129,165	67,804	0,525
51	129,983	68,526	0,527
53	128,348	68,526	0,534
55	129,165	67,804	0,525
57	129,983	69,247	0,533
59	130,8	69,247	0,529

Fonte: Aatoria própria

Coeficiente de Atrito



Célula Normal



Célula Tangente

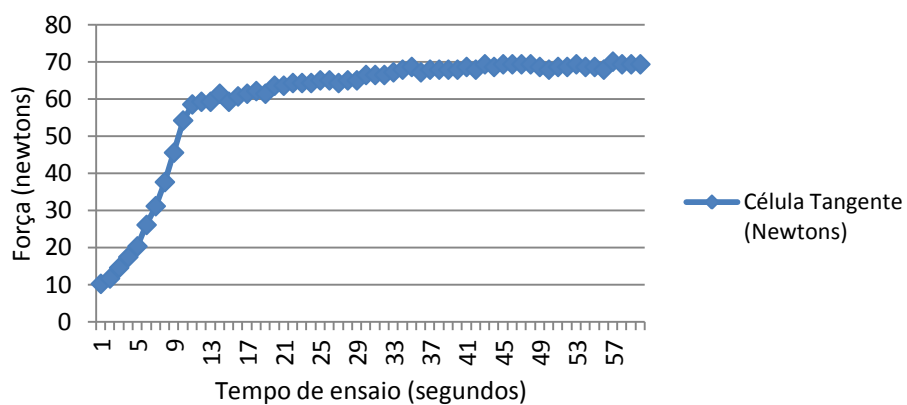


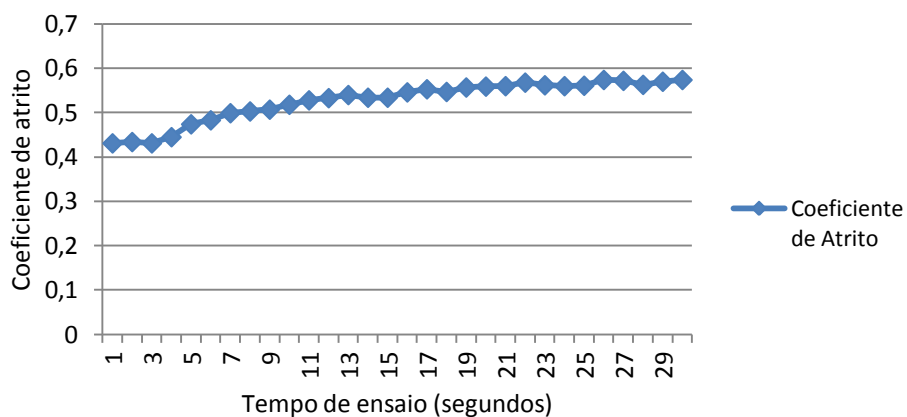
Figura 51 – Gráficos do coeficiente de atrito e das forças normais e tangenciais durante o ensaio de desgaste da amostra 4.900.1/4.

Tabela 15 – Forças normais e tangenciais e coeficiente de atrito durante ensaio de desgaste da amostra 9.1050.¼.

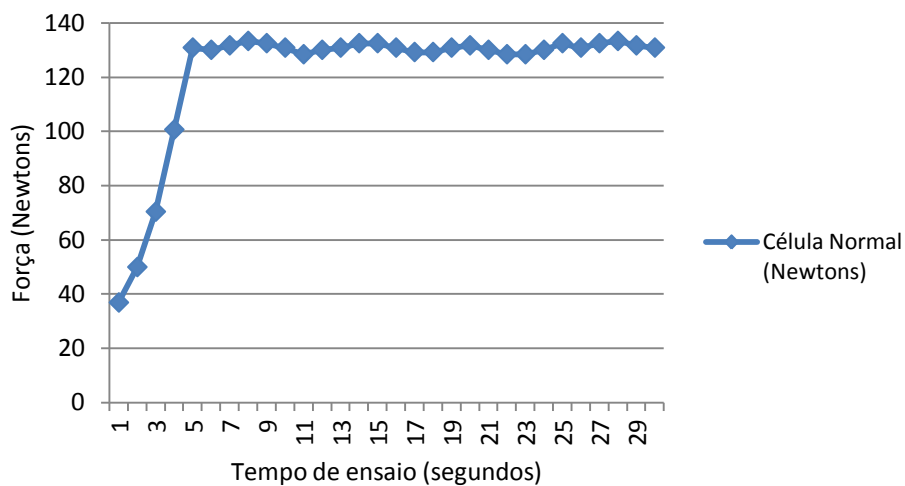
Tempo (segundos)	Célula Normal (Newtons)	Célula Tangente (Newtons)	Coeficiente de Atrito
1	36,788	15,869	0,431
3	49,868	21,64	0,434
5	70,305	30,296	0,431
7	100,553	44,722	0,445
9	130,8	62,034	0,474
11	129,983	62,755	0,483
13	131,618	65,64	0,499
15	133,252	67,083	0,503
17	132,435	67,083	0,507
19	130,8	67,804	0,518
21	128,348	67,804	0,528
23	129,983	69,247	0,533
25	130,8	70,69	0,54
27	132,435	70,69	0,534
29	132,435	70,69	0,534
31	130,8	71,411	0,546
33	129,165	71,411	0,553
35	129,165	70,69	0,547
37	130,8	72,854	0,557
39	131,618	73,575	0,559
41	129,983	72,854	0,56
43	128,348	72,854	0,568
45	128,348	72,132	0,562
47	129,983	72,854	0,56
49	132,435	74,296	0,561
51	130,8	75,018	0,574
53	132,435	75,739	0,572
55	133,252	75,018	0,563
57	131,618	75,018	0,57
59	130,8	75,018	0,574

Fonte: Autoria própria.

Coeficiente de Atrito



Célula Normal



Célula Tangente

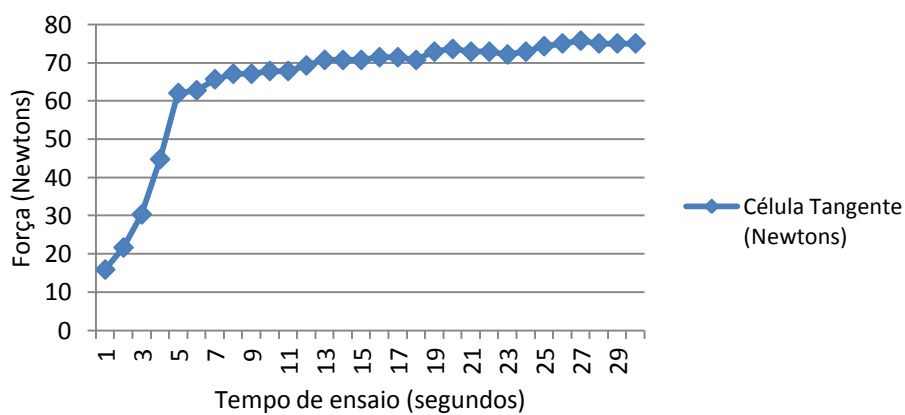


Figura 52 – Gráficos do coeficiente de atrito e das forças normais e tangenciais durante o ensaio de desgaste da amostra 9.1050.1%.

**APÊNDICE H – PERFIS 1 E 3 DE DUREZA NAS AMOSTRAS
2.700.3, 4.900.¼ E 9.1050.¼**

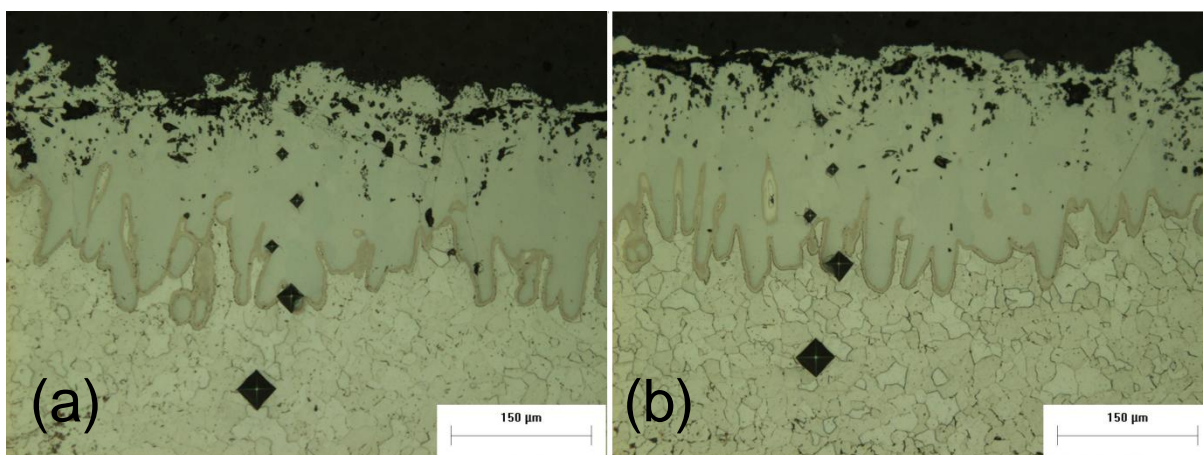


Figura 53 – Impressões de microdureza no perfil 1 (a) e perfil 3 (b) da amostra 2.700.3.

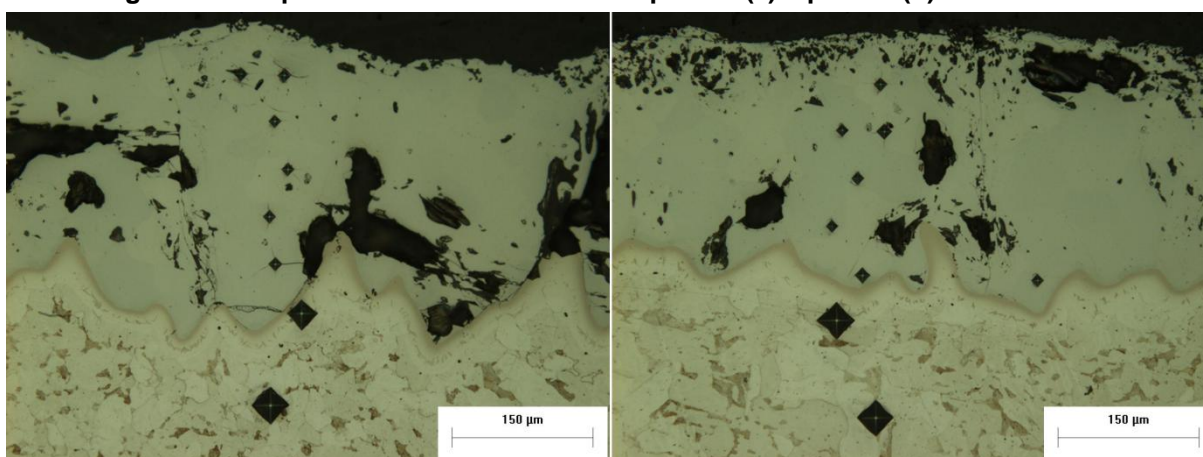


Figura 54 – Impressões de microdureza no perfil 1 (a) e perfil 3 (b) da amostra 4.900.¼.

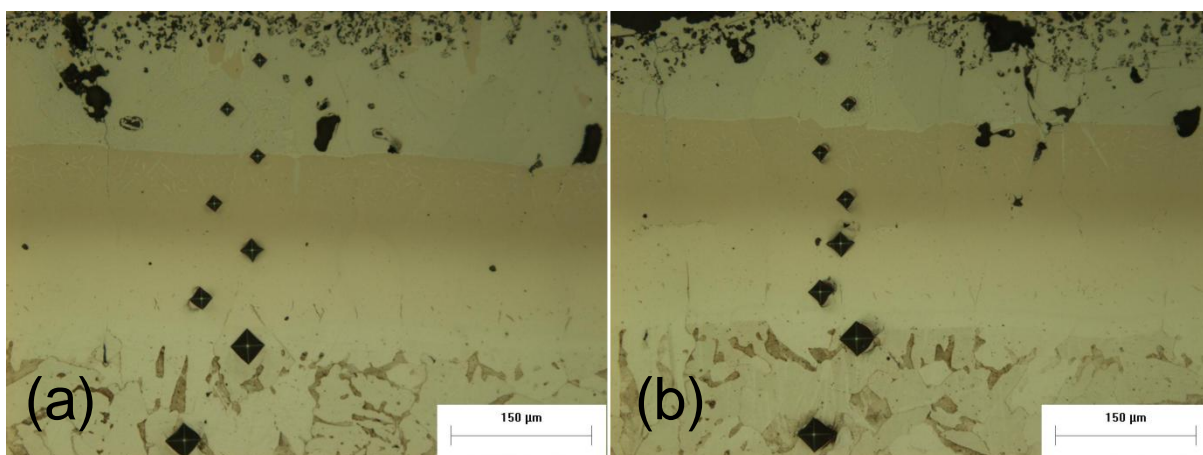


Figura 55 – Impressões de microdureza no perfil 1 (a) e perfil 3 (b) da amostra 9.1050.¼.

APÊNDICE I - DIFERENÇAS EM MASSA, DIÂMETRO DA RODA DE BORRACHA APÓS O USO, PERDA DE MASSA AJUSTADA, PERDA DE MASSA MÉDIA E DESVIO PADRÃO EM CADA CONDIÇÃO DO TRATAMENTO DE DIFUSÃO

Tabela 16 – Resultados dos ensaios para amostras tratadas a 700°C.

Amostra	Massa (g)	Delta (mg)	Diâmetro da Roda (mm)	AML (mg)	AML médio (mg)	Desvio padrão (mg)
1.700.3	Antes	95,5300	222,56	50,1		
	Depois	95,4812				
2.700.3	Antes	96,7790	222,40	50,9	50,8	0,7
	Depois	96,7295				
3.700.3	Antes	95,7519	222,50	51,4		
	Depois	95,7019				

Fonte: autoria própria

Tabela 17 – Resultados dos ensaios para amostras tratadas a 900°C.

Amostra	Massa (g)	Delta (mg)	Diâmetro da Roda (mm)	AML (mg)	AML médio (mg)	Desvio padrão (mg)
4.900.¼	Antes	95,6776	222,46	0,0575		
	Depois	95,6216				
5.900.¼	Antes	95,6032	222,36	0,0626	60,1	3,6
	Depois	95,5423				

Fonte: autoria própria

Como já foi dito no item 4.1, a amostra 6.900.¼ foi desconsiderada do estudo.

Tabela 18 – Resultados dos ensaios para amostras tratadas a 1050°C.

Amostra	Massa (g)	Delta (mg)	Diâmetro da Roda (mm)	AML (mg)	AML médio (mg)	Desvio padrão (mg)
7.1050.¼	Antes	95,3360	222,52	43,1		
	Depois	95,2941				
8.1050.¼	Antes	94,6019	222,42	39,5	42,9	3,3
	Depois	94,5634				
9.1050.¼	Antes	92,8442	222,26	46,1		
	Depois	92,7993				

Fonte: autoria própria