

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

**AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS RESISTENTES À CORROSÃO E
DESGASTE, APLICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA AO ARCO.**

UM ESTUDO PARA PROTEÇÃO DE PONTEIRAS DE "RISERS".

Dissertação submetida à

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

para a obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

JAIME FERNANDO VILLANUEVA AGUILA

Florianópolis, fevereiro de 2005.

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

**AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS RESISTENTES À CORROSÃO E
DESGASTE, APLICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA AO ARCO.**

UM ESTUDO PARA PROTEÇÃO DE PONTEIRAS DE "RISERS"

JAIME FERNANDO VILLANUEVA AGUILA

**Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA
sendo aprovada em sua forma final.**

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

Prof. Dr.-Eng. Ramón Cortés Paredes - Co-orientador.

José A. Bellini - Coordenador do curso

Banca Examinadora

Prof. Dr. Eng. Carlos Niño Borquez

Profa. PhD. Eng. Ana Sofia C. M. De Oliveira

Prof. Dr.-Eng. Carlos Augusto Silva de Oliveira

“O conhecimento é poder”.
Lady Di

A minha esposa, filhos, netos e genro.

Agradecimentos

À minha Alma Mater, a Universidad de Tarapacá, de Arica, Chile, por conceder a oportunidade de me manter no limite do conhecimento.

Ao CENPES/Petrobrás pelo interesse no desenvolvimento de tecnologia para suprir as necessidades nacionais, apoiando a pesquisa e trabalhando junto à UFSC.

Às Universidades Federais de Santa Catarina e de Paraná, por dispor de seus professores, equipamentos, experiência e recursos no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Augusto J. A. Buschinelli, pelo apoio nesta pós-graduação, que culmina neste mestrado.

Ao Prof. e amigo da infância Professor Ramon Cortes Paredes, por ser um dos motores que empurra o meu caminhar pelo mundo da pesquisa.

Ao Professor Juan Miguel Godoy Ramsay e à Empresária Ernestina Silva Villegas que depositaram a sua confiança na minha pessoa, arriscando o esforço de toda sua vida no meu desafio.

A Luis Galaz Mamani e a sua família, por ter-me acolhida e recebida como um mais da família.

A Victor Vergara Diaz, por seus sempre sábios e oportunos conselhos e sua amizade nascida ao calor das conversações de alto nível e de relaxamento no Restaurante da Nina.

A meus colegas da Equipe de Metalurgia da Soldagem e Processos Afins, Nilceu, Guver, Wilson, Ricardo, e todos aqueles que de uma ou outra forma colaboraram a terminar este meu desafio.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABELAS	iv
SIMBOLIGIA	vi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xx
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	4
2.1 Objetivos	4
2.2 Contribuições	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Principais Características dos processos de Aspersão Térmica	6
3.1.1 Características da camada	6
3.1.2 Características do Jato	8
3.1.3 Características da Fonte de Energia	8
3.1.4 Processo a Chama de alta velocidade –HVOF.	9
3.2 Processo de aspersão térmica por arco elétrico – ASP (Arc Spray Process)	10
3.3 Materiais resistentes ao desgaste, corrosão e trincas	12
3.4 Parâmetros de aspersão	16
3.5 Transformação de fases	17
3.6 Resistência ao Riscamento	18
3.6.1 A Técnica Esclerométrica	19
3.7 Comportamento à Corrosão Conhecendo o Potencial de Polarização	21
4 MÉTODOS, MATERIAIS, E EQUIPAMENTOS.	23
4.1 Metodologia	23
4.2 Identificação dos materiais	23
4.2.1 Composição química dos arames a depositar	24
4.3 Parâmetros de Aspersão	26
4.4 Equipamentos	26
4.4.1 Preparação dos corpos de prova	27
4.4.2 Aspersão	28
4.4.3 Preparação dos corpos de prova	30

4.4.3.1	Micro dureza	30
4.4.3.2	Desgaste Abrasivo	30
4.4.3.3	Ensaio de Aderência	30
4.4.3.4	Microscopia ótica	31
4.4.3.5	Porosidade	31
4.4.3.6	Riscamento	31
4.4.3.7	MEV	31
4.4.3.8	Polarização Potenciodinâmico	31
4.5	Microdureza	31
4.6	Desgaste abrasivo	31
4.7	Ensaio de aderência	33
4.8	Observação via microscopia ótica	34
4.9	Porosidade	35
4.10	Ensaio de riscamento	35
4.11	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).	36
4.12	Ensaio de polarização potenciodinâmico	36
5	RESULTADOS	38
5.1	Caracterização	38
5.2	Exemplo	38
5.2.1	Arame	38
5.2.2	Dureza	39
5.2.3	Ensaio de desgaste	39
5.2.4	Ensaio de tração	39
5.2.5	Porosidade	39
5.2.6	Riscamento	40
6	DISCUSSÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS	41
6.1	Resistência à aderência	41
6.2	Dureza	42
6.3	Desgaste abrasivo	44
6.4	Porosidade	48
6.5	Ensaio de polarização potenciodinâmico	50
6.6	Ensaio de riscamento linear	53
7	CONCLUSÕES	56
8	TRABALHOS FUTUROS	57

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

58

APÊNDICE 1

62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ponteira com riscos	1
Figura 2. Deslocamento da camada de Ni aspergido a chama	2
Figura 3. Características da formação da camada depositada por AT	5
Figura 4. Fluxograma ilustrativo dos processos de Aspersão Térmica.	6
Figura 5. Decoção pela aspersão de camadas de espessura maiores aos 0,5mm.	8
Figura 6. Diagrama esquemático do processo HVOF	10
Figura 7. Diagrama esquemático do processo de Aspersão Térmica ao Arco.	11
Figura 8. a) NiWCrSiFeBC menor dureza e b) WCCo-Cr maior dureza, nos dos	13
Figura 9. Vista transversal inclinada antes de fundir e longitudinal da ponta de um	15
Figura 10. Aparência das camadas de matriz martensítica com diferentes	16
Figura 11. Camadas aspergidas com os parâmetros da tabela 4	17
Figura 12. Mecanismos admitidos: (a)micro-sulcamento,(b) micro-corte, (c)	19
Figura 13. Diagrama esquemático do esclerómetro pendular (esquerda) e retilíneo	19
Figura 14. Esquema de funcionamento do esclerómetro fabricado no LABMAT	20
Figura 15. Geometria do indentador com as forças atuantes	20
Figura 16. Curva de polarização esquemática para o aço inoxidável austenítico em	22
Figura 17. Curva de polarização esquemática referente ao comportamento de aço	22
Figura 18. a e b arame AS751, c e d arame AS760, e e f arame AS761.(lixamento	25
Figura 19. Método para o polimento do arame tubular recheio	25
Figura 20. Jateadora com a câmara aberta.	27
Figura 21. Dimensões dos diferentes corpos de prova	27
Figura 22. a) Fonte de energia, cabeçote, alimentador e controles b) Pistola de	28
Figura 23. Processo de teste da tensão e corrente	28
Figura 24. Posição da pistola durante a aspersão térmica.	29
Figura 25. Aquecedor de propano. O bico misturador e feito de aço refratário.	29
Figura 26. Esquema de um porta conjunto corpo de prova-contrapino para cura	30
Figura 27. a) Vista geral do equipamento b) Detalhe do suporte do corpo de prova	31
Figura 28. Ensaio da grafite. Folia esquerda errada na parte superior e inferior,	32
Figura 29. a) Prensa com o corpo de prova. b) Detalhe das garras com o dispositivo	33
Figura 30. Falho tipo I , no adesivo, a peça de cor mais obscuro tem a cola e	34
Figura 31. Falho tipo II por coesão. A decoção se gera na interface camada/camada	34
Figura 32. Falho tipo II e III a descolagem acontece dentro da camada e na interface.	34

Figura 33. Rede usada para determinar a percentagem de porosidade.As manchas	35
Figura 34. a) Foto do esclerómetro retilíneo. B) Detalhe de risco de uma liga com	36
Figura 35 Preparação e montagem do corpo de prova.	37
Figura 36. Vista transversal da ligação da camada com o substrato. Pode-se	38
Figura 37. a) Vista transversal à camada, observa-se uma imperfeição na interfase	39
Figura 38. a Procedimento c (30 segundos) a camada a só foi desgastada em tanto	39
Figura 39. O risco é do tipo micro sulcamento, o indentador só provoco deformação	40
Figura 40. Representação da resistência à tração obtida	41
Figura 41. Dureza das camadas e partículas duras	43
Figura: 42. Micrografia no MEV	44
Figura 43. Relacionamento entre a densidade das estruturas e a composição	44
Figura 44. Comparando os procedimentos B e C na perda de massa.	45
Figura 45. Ensaio de desgaste procedimento C e figura 42b, procedimento B	46
Figura 46. a)Vista perpendicular do 2AS761B as partículas brancas correspondem	47
Figura 47. Estruturas de WC/W2C fundidas de formas amorfas abundantes e poucos	47
Figura 48. Mostra a grande diferencia de perda de massa, em mg, que existe entre...	48
Figura 49. Material 1AS760B. As manchas pretas alongadas podem apresentar	49
Figura 50. A menor porosidade é apresentada no corpo de prova de verificação	50
Figura 51. Fotomicrografia no MEV que permite verificar a pequena quantidade de	50
Figura 52a. Material 4AS761A, o de maior porosidade e 56b material de verificação	51
Figura 53a. Material 2AS761B menor perda de material por desgastes e 57b	51
Figura 54a camadas de WC-10Co-4Cr aspergidos com HVOF pistola JP5000 e 58b	52
Figura 55a. Camadas aspergidas pelo processo HVOF de NiWCrSiFeBC menor	53
Figura 56. Micrografias, sem ataque. Com os resultados do ensaio de riscamento	54
Figura 57 a Camada aspergida com 2AS761B sob a pressão do indentador deforma	55
Figura 58 a Arame 4AS751B mostra lascas incipientes e figura 62b,arame	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação dos resultados com diferentes processos de aspersão térmica	11
Tabela 2. Ligas utilizadas pelos processos HVOF com pistolas DJ2700(M)	13
Tabela 3. Parâmetros fornecidos pelo fabricante do equipamento.	17
Tabela 4. Parâmetros de aspersão recomendados pelo fabricante para equipamento	17
Tabela 5. Características técnicas obtidas nas camadas, fornecidas pelo fabricante.	17
Tabela 6. Durezas de algumas fases que poderiam estar presentes nas ligas	18
Tabela 7 Composição química dos arames a caracterizar.	23
Tabela 8. Parâmetros usados na aspersão dos corpos de prova.	26
Tabela 9. Resistência à aderência e tipo de falha.	41
Tabela 10. Resultado das micro-durezas baseado em dez medições.	42
Tabela 11 . Perda de massa segundo procedimento B(10 min) e C(30 seg)	45
Tabela 12. Medição da Porosidade segundo ASTM E 562	49

RESUMO

AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS RESISTENTES À CORROSÃO E DESGASTE, APLICADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA AO ARCO.

UM ESTUDO PARA PROTEÇÃO DE PONTEIRAS DE "RISERS"

Através da Aspersão Térmica (AT) aplicam-se barreiras de materiais na forma de camadas com alta resistência à abrasão e à corrosão, que envolvem partículas de alta dureza. Conforme a literatura, na proteção de ponteiras de risers, fabricadas em aço AISI 4130, sujeitas ao riscamento na montagem e à corrosão pela água do mar nas plataformas off-shore. Foram testados níquel químico e diferentes pós de metais duros, tais como: WC-Co, WC-Co-Cr, Cr₃C₂-NiCr, (WC-12Co) + NiCrFeSiBC diferentes pós de metais duros, tais como: WC-Co, WC-Co-Cr, Cr₃C₂-NiCr, (WC-12Co) + NiCrFeSiBC usando o processo AT de HVOF. Os resultados até então foram parcialmente positivos, em particular, as camadas aspergidas excessivamente duras apresentaram micro-trincas no ensaio de riscamento. O objetivo deste trabalho é apresentar resultados da AT por arco elétrico de arames tubulares a base de Ni com adições de B e Si e alternativamente ricos em carbonetos finos de tungstênio. Foram avaliadas a microestrutura (grau de dispersão de carbonetos e porosidade), a dureza, aderência e resistência ao desgaste dos revestimentos, para diferentes condições de AT. Além disso, foram verificados o comportamento ao riscamento e à corrosão mediante ensaio de polarização potenciodinâmico. As análises mostraram uma camada matriz com dureza variando numa faixa entre 350 a 600 HV, e carbonetos de tungstênio finos, concentrados como triturados por impacto (~1µm), com durezas superiores 1200HV, bem como escassas partículas mais grosseiras (~50 µm), não fragmentadas, com durezas na faixa de 2000 a 2800 HV. A dureza da camada matriz, inferior aquela de camadas de revestimentos de metal duro aplicados com HVOF, reportada na literatura, e a natureza do comportamento ao desgaste e ao riscamento, revelam uma maior ductilidade das camadas.

O melhor desempenho ao desgaste, trincas e maior potencial de resistência à corrosão está na camada com menor quantidade de Cr. As demais camadas estudadas apresentam um bom potencial com vistas ao seu uso no revestimento de ponteiras de risers, sendo o preaquecimento um fator de melhoria das camadas aspergidas.

ABSTRACT

ANTIWEAR AND ANTICORROSION COATS EVALUATION, SPREAD THROUGH ARC THERMAL SPRAY.

A STUDY FOR THE PROTECTION OF THE “RISER” TIPS.

Through the thermal spray process, materials with high hardness particles are spread to produce coats of materials anti-wear and anti-corrosion,. According with the literature, the protection of the “risers” tips, made of AISI 4130, under assembly scratch out risks and sea water corrosion on OFF SHORE platforms, have been protected with chemical nickel and HVOF thermal aspersions, using different powders of WC-Co, WC-Co-Cr, Cr₃C₂-NiCr, (WC-12Co) + NiCrFeSiBC alloys. The results had been partially positives, however the coats extremely hard ,still presents small crack deep into the scratch. The objective of this work is to present results of the arc spray (ASP) coats using Ni base alloys with B and Si additions and alternatively rich in FTC. Were evaluated the microstructures (carbides and porosity dispersion degree), wear and adherence resistance, hardness and abrasion degree using different spray parameters. Additionally, scratch and corrosion, through the potenciodynamic scan test, were carried out. The analyses shows a matrix coat with hardness varying between 350 and 600 HV, and fine tungsten carbides particles, concentrated as triturated for impact (~1µm), with hardness over 1200HV, as well as scarce coarser particles (~50 µm), not broken out, with hardness between 2000 and 2800 HV. The matrix hardness, lower than that sprayed with the HVOF process informed by the literature, and the wear and scratch behavior, assures a coat with better ductility.

The best performance to waste and crack into the scratch and high corrosion resistance potential was found in the coat with smaller amount of Cr. The other studied coats present a good potential with sights to its use in riser tips covering, being the preheating a factor of sprayed layers improvement.

CAPITULO 1 INTRODUÇÃO

Os “risers” são tubos, que podem ser rígidos usados para ferramentas de perfuração ou flexíveis quando usados para transportar fluidos entre plataformas “offshore” e a boca de um poço petrolífero submarino, estes últimos usados para a extração de gás/óleo no segmento “off shore” oceano, transportando uma produção de cerca de 700.000 barris de óleo/dia (US\$ 8 bilhões/ano) (Paes, 2000). A perda da estanqueidade da ligação é um sério problema que acontece devido à deterioração por desgaste [metal/metal, metal/areia] das ponteiras. Os componentes críticos são as ponteiras (fig. 1), que tem como função conectar os tubos rígidos entre si pelo sistema caixa-pino. Neste processo pode acontecer riscamento da ponteira e pode-se perder a estanqueidade na conexão com o vazamento de fluido sob os “O” ringes durante o teste hidrostático da coluna de “risers” em uma tensão até 20,7 MPa (3000 Psi.). Se acontecer riscamento sem perda de estanqueidade, o vazamento pode acontecer em serviço se existir camadas de Ni e trincas que atingem o substrato. Esta falha em qualquer uma das ponteiras determina a retirada de toda a coluna de “risers” lançada ao mar, para a verificação de qual delas está com problema e substituir seu respectivo “riser”, com um custo que pode alcançar cerca de US\$ 50.000/dia (Paes, 2000). Os danos das ponteiras durante o encaixe são riscos com profundidades de até 200 μm (para um aço inox 17-4 PH). O encaixe não é sempre direto e suave, ocorrendo choques, esforços por torção e uma eventual presença de partículas duras do ambiente, como areia e limalhas. A corrosão também ataca o metal base de aço ferrítico das ponteiras, alternativamente fabricadas em aço AISI 4130 e normalmente revestidas com níquel químico, que estão constantemente expostas à atmosfera salina.

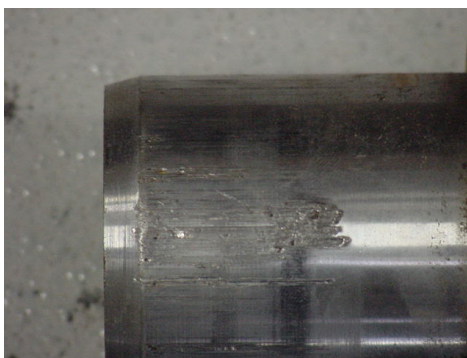


Figura 1 Ponteira com riscos

Havendo qualquer riscamento do revestimento ou poros passantes nas camadas, a corrosão do substrato é imediata devido ao fato do níquel ser catódico em relação ao aço. Para solucionar esse problema foram alternativamente empregados revestimentos tipo ligas

autofluxantes de níquel, depositadas por aspersão térmica à chama convencional e Ni químico. Essas camadas aspergidas nem sempre apresentam desempenho satisfatório, pois os riscos cuja profundidade atinge ao substrato, inicia a corrosão galvânica mencionada anteriormente e sendo os produtos da corrosão de maior volume que os metais base, a camada de Ni sofre deslocamento (figura 2).

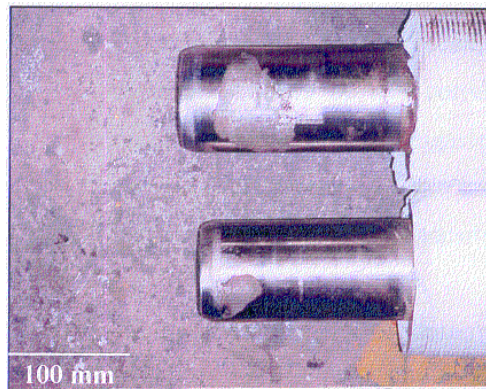


Figura 2. Deslocamento da camada de Ni aspergido a chama (Freire, 2002).

Para diminuir o riscamento dessas camadas procura-se alta dureza, obtendo-se nas camadas de Ni-químico até 1000 HV com tratamento térmico (Fages, 2004) e no caso de ligas autofluxantes aspergidas a chama, as maiores durezas medidas foram 770 HV_{0,3} apresentando-se nos dois casos uma alta fragilidade nas camadas (Freire, 2002). Este fato, e a baixa aderência das camadas de Ni-químico (0,34 a 0,44 MPa) e das ligas autofluxantes aspergidas a chama (<8 MPa)(Alldearn, 2004) onde esta última mostrou excessiva porosidade, facilita o deslocamento e compromete a proteção contra a corrosão pela probabilidade de aparecimento de poros passantes e trincas, expondo o substrato ao meio corrosivo salino (Freire, 2002).

Freire(2002) realizou um estudo detalhado da qualidade de revestimentos aplicados pelo sistema de aspersão térmica HVOF com as pistolas de última geração (maior pressão e menor temperatura) a querosene(JP5000) e a gás propano (DJ2700), para uma série de pós “cermets” e ligas autofluxantes. Nesse trabalho buscou-se otimizar procedimentos de aspersão para cada material/sistema, através da caracterização das propriedades dos revestimentos (dureza, microestrutura, desgaste abrasivo e riscamento), obtidos em duas series de aspersões, bem como verificando a influência das variáveis de aspersão nas transformações sofridas pelo pó aspergido em um deposito de água.

O trabalho estabeleceu diretrizes para procedimentos de aspersão térmica (AT) para revestimentos de ponteiros de “risers”, com camadas resistentes ao desgaste, bem como

elevada aderência ao substrato, adequadas para esse tipo de aplicação. As principais conclusões obtidas foram:

- i) Os metais duros WC-Co e WC-Co-Cr aplicados nos sistemas HVOF (DJ 2700 e JP5000) mostraram o melhor desempenho ao desgaste abrasivo, porém pela alta dureza trincou no ensaio de riscamento.
- ii) O uso de mistura metal duro/liga autofluxante melhora a resistência ao desgaste abrasivo da liga autofluxante pela introdução de partículas de carboneto na camada.
- iii) Para proteção contra corrosão e riscamento das ponteiras, o material WC-Co-Cr seria o mais indicado com ambas pistolas, porém ocorre o surgimento de trincas nos sulcos do ensaio de riscamento, concluiu-se que o material da camada seria muito frágil para aplicação desejada.

Diante dos problemas apresentados pelas ligas aspergidas pelo processo HVOF, foi desenvolvida a presente pesquisa utilizando o processo de aspersão térmica ao arco com diferentes arames tubulares com ligas autofluxantes, visando obter camadas mais dúcteis e com porosidades baixas que garantissem sua impermeabilidade.

CAPITULO 2

OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

2.1 OBJETIVOS

Dadas às propriedades e características do processo de aspersão térmica ao arco (ASP), o objetivo é avaliar o desempenho de três revestimentos de arames tubulares de ligas autofluxantes especialmente produzidos para ASP e determinar os parâmetros que forneçam maior aderência, menor porosidade, maior ductilidade e a maior resistência ao desgaste, mantendo aderidas tanto as partículas duras fornecidas no interior do arame, quanto as geradas durante a aplicação do revestimento, e comparar estes resultados com os obtidos com pó aspergidos pelo processo HVOF usando as pistolas JP5000 e DJ2700 (Freire, 2002).

Para lograr este objetivo, se realizará a aspersão variando a distância de deposição recomendada pela literatura com o intuito de avaliar o tamanho das partículas duras formadas durante a aspersão, num caso mantendo os parâmetros de deposição em substrato com e sem pré-aquecimento. Além disso, serão pesquisados num substrato, diferentes parâmetros para depositar uma mesma liga. Tudo isto, visando obter elevada ductilidade e resistência ao desgaste.

2.2 Contribuições

Esta pesquisa da continuidade ao projeto CTPETRO 2001-2002 e conta com o apoio do CENPES/Petrobrás interessados no melhoramento de desempenho de ponteiros utilizadas na exploração e extração do petróleo brasileiro.

Portanto, o fato de ter a oportunidade de dar continuidade à procura de novos materiais resistentes à abrasão, ao riscamento e procedimentos de deposição mais adequados, já representa uma contribuição à pesquisa na área de petróleo. De forma mais específica também é uma importante contribuição participar da consolidação da tecnologia de Aspersão Térmica como ferramenta de recuperação de componentes desgastados ou corroídos, em componentes da indústria.

Junto com o anterior, os resultados da pesquisa proposta permitirão disponibilizar ao mercado de manutenção, novas ligas em forma de arame tubular resistentes ao desgaste e/ou corrosão.

Com os resultados deste estudo, espera-se também contribuir com dados que permitam reduzir os custos econômicos, representados pela perda da estanqueidade no processo de

ligação das ponteiros dos “risers” no trabalho de extração de petróleo e armazenamento com o mínimo risco de deterioração por corrosão.

CAPITULO 3

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Aspersão Térmica é um processo por meio do qual se deposita, sobre uma superfície previamente preparada, camada de materiais metálicos ou não metálicos. Os materiais de deposição são aquecidos com uma fonte de calor gerada no bico de uma pistola apropriada por meio de combustão de gases, de arco elétrico ou por plasma. Imediatamente após o aquecimento, o material é finamente atomizado e acelerado por gases sob pressão contra a superfície a ser revestida, atingindo-a no estado fundido ou semifundido. Ao se chocarem contra esta, as partículas achatam-se e aderem ao material base e na seqüência sobre as partículas já existentes, originando-se assim uma camada de estrutura típica e diferente de qualquer outra forma metalúrgica. Essas camadas são constituídas de pequenas panquecas achatadas em direção paralela ao substrato, com estrutura típica lamelar contendo inclusões de óxidos, vazios e porosidade (figura 3).

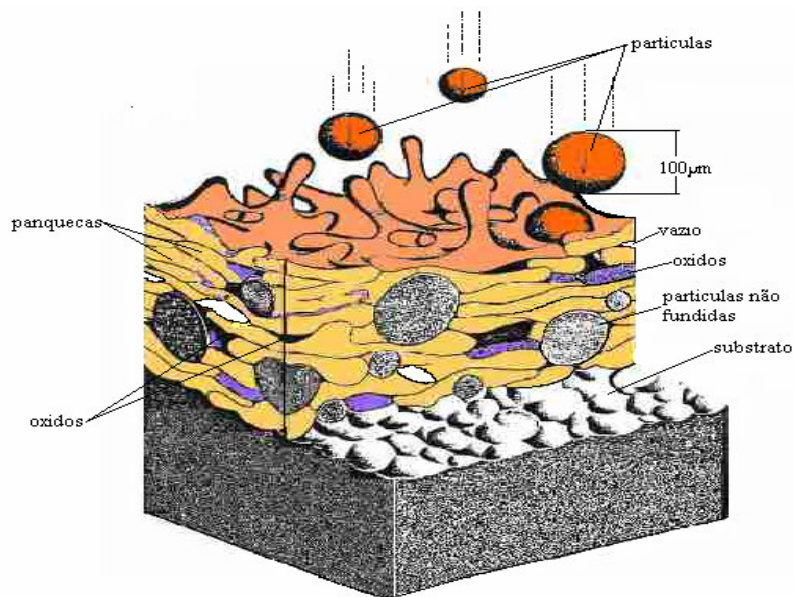


Figura 3. Características da formação da camada depositada por AT (Gordon, 2004).

Com base no meio de aquecimento e tipo de material de deposição empregado, a figura 4 mostra uma classificação dos principais processos de aspersão térmica. Para efeito de simplificação, uma nomenclatura baseada em siglas é usada em substituição às denominações por extenso dos processos (Schiefler, 2004). A identificação de cada uma das siglas é a seguinte:

- **FS= Flame Spraying** (aspersão a chama oxigás com material de alimentação na forma de pó ou arame);

- **AS** = *Arc Spraying* (aspersão a arco elétrico);
- **HVOF** = *High Velocity Oxi-Fuel Spraying* (aspersão a chama oxigás de alta velocidade com material em forma de pó);
- **HVCW** = *High Velocity Combustion Wire Spraying* (aspersão a chama oxigás de alta velocidade com material de alimentação na forma de arame);
- **PS** = *Plasma Spraying* (aspersão a plasma);
- **D-gunTM** = *Detonation-Gun Spraying* (aspersão por detonação);
- **LS** = *Laser Spraying* (aspersão a laser)
- **CS** = *Cold Spraying* (aspersão a frio).

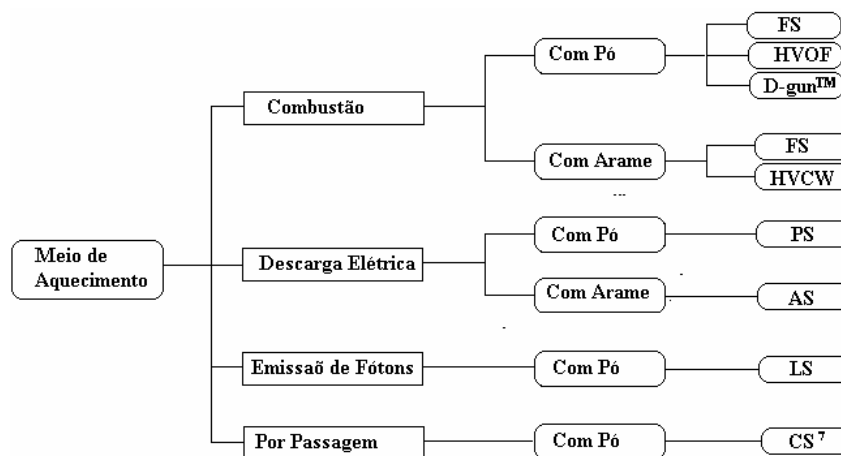


Figura 4. Fluxograma ilustrativo dos processos de Aspersão Térmica (Schiefler, 2004).

3.1 Principais Características dos processos de Aspersão Térmica.

Estes processos constam de 3 partes principais, existindo algumas que podem ser agregadas para lograr efeitos específicos. As partes são: Camada, Jato e Fonte de Energia.

3.1.1. Características da camada

- **Aderência:** é resistência mecânica de um revestimento a ser destacado por solicitações externas.

Três mecanismos de aderência podem ser atuantes: Ancoramento mecânico, químico (compartilhamento de elétrons de valência) e físico (Forças de Van der Waals)(Bunshah, 2000). Estes dependem da energia cinética e temperatura das partículas e do acabamento superficial do substrato. Ao chocar contra a superfície, as partículas achatam-se e aderem ao material base e na seqüência sobre as partículas já existentes. Em geral, o substrato deve estar preparado com acabamento superficial Ry (distância entre a saliência mais pronunciada e a reentrância mas profunda numa distancia dada do acabamento superficial de um material)

entre 50 μ m e 70 μ m para camadas de Al. Com o pré-aquecimento do substrato tem-se obtido melhoras significativas devido ao maior molhamento do substrato. Cortes (2001) analisou os efeitos do gradiente térmico partícula de Al –superfície concluindo que a maior molhamento evita os respingos (salpicos) e com isso reduz o teor de óxidos na camada. O pré-aquecimento e a transformação de energia cinética em calor diminui a desintegração das partículas que impactam o substrato, obtendo-se lamelas de maior tamanho e mais regulares, melhorando a superfície onde subsequentemente atingiram outras lamelas (Camello e Trevisan, 2004). Sim a rugosidade é muito alta, a maior temperatura de pré-aquecimento, obtém - se lamelas mais regulares e a menor quantidade de salpicos que sem pré-aquecer. Como os salpicos têm uma fraca aderência, recomendasse a menor rugosidade com a menor temperatura de pré-aquecimento para evitar salpicos e afeitar à aderência. Acabamentos com rugosidades menores ou maiores não permitem aderência de resistência satisfatória (Cortes, 2001). Como uma lamela típica tem um diâmetro na faixa de 50 a 100 μ m (Camello e Trevisan, 2004), esta recomendação pode ser considerada para qualquer liga.

- **Óxidos.** Se a atmosfera é oxidante, oxidação acontecerá no momento que as partículas são fundidas ou superaquecidas no bico das pistolas. As fontes de oxidação são: a fonte de calor, o gás de transporte, o ar do meio ambiente na transferência e nas camadas já ancoradas ao substrato. Em alguns casos, os óxidos não prejudicam a aderência (Rodriguez, 2003).

- **Porosidade** Consiste em cavidades isoladas ou interconectadas. Afeta diretamente propriedades físicas como condutividade elétrica e térmica, diminui a coesão das camadas e sua aderência ao substrato. Quando contínua e interconectada ao substrato, é indesejável em revestimentos que visam a proteção contra a corrosão quando a camada é catódica.

A formação das porosidades está relacionada com os parâmetros de cada processo de AT, tais como: temperatura da chama ou arco elétrico, gás de transporte, velocidade das partículas, distância pistola/substrato, rugosidade e limpeza do substrato a ser revestido.

- **Espessura** Esta depende da quantidade de passes do jato, mas numa deposição não é recomendável superar 500 μ m dado que o substrato permanece numa temperatura baixa e as partículas fundidas ou semifundidas formam uma camada onde o efeito de contração térmica pode gerar trincas ou destacamento da camada (Figura 5).

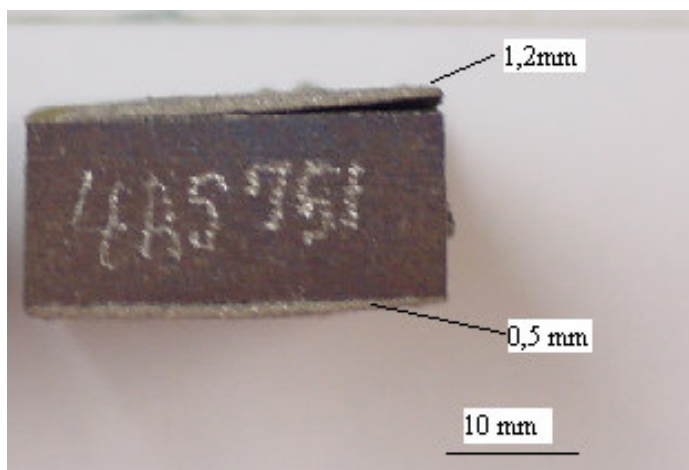


Figura 5. Decoção pela aspersão de camadas de espessura maiores aos 0,5mm.

3.1.2 Características do Jato.

-Atomização Quando o material é em forma de arame, ele é fundido e pulverizado em pequenas partículas pela ação de um gás a pressão e de um bico adequado. No caso de material em forma de pó, este é fundido parcial ou totalmente pela chama ou plasma e pulverizado pelo jato de ar comprimido ou dos gases da combustão. Neste caso, a pulverização produzida fora do processo, permite misturar os pós em proporções variadas e assim obter camada com diferentes propriedades.

-Gás de transporte das partículas. O gás de transporte é responsável pela energia cinética que adquire a partícula e pela possibilidade de formação de óxidos. Ele pode ser parte da fonte de energia ou externo a ela. O comprimento do jato é característico de cada processo.

3.1.3 Características da Fonte de Energia.

A fonte deve entregar o calor de fusão ou aquecimento, e as reações geradas para produzir-lo, em frações de segundos e não influir no processo em forma negativa ou ser controlado por influir em forma positiva no resultado final do material aspergido. Algumas fontes de energia utilizadas são descritas a seguir:

- **Combustão ou detonação de gases ou líquidos:** mistura de combustíveis (Propano, butano, kerosene, acetileno, etileno, hidrogênio) com oxigênio e calor, entre eles se acham: processo a chama. HVOF. Detonation Gun, Ultrasonic, etc. Na câmara de combustão atinge temperaturas perto de 3100 °C.

- **Eletricidade:** mediante a geração de um arco elétrico (temperaturas do arco na faixa de 4000 a 6000°C)(Cortes, 2001) ou plasma, neste último caso o arco é gerado no bico da pistola e ao passar o gás (Argon, Helio, Hidrogênio, argônio) gera-se o plasma. Que podem atingir temperaturas perto de 20.400 °C (Linde, 2000).

- **Raio Laser:** neste caso um feixe de alta energia luminosa concentrada é a fonte de calor que funde o material. Graças à sua coerência, (propagação monocromática) e colimação quase perfeita, é que os feixes de laser podem ser focalizados, por meio de lentes ou de espelhos, em escalas espaciais muito pequenas. Em seguida, a fração absorvida dessa energia eletromagnética é rapidamente convertida em energia térmica no próprio interior do material. Conforme as características do material e o período de interação entre esse material e o feixe, pode-se provocar uma transformação termomecânica do material em um tempo muito curto; por exemplo, pode-se atingir o ponto de fusão ou até mesmo a temperatura de vaporização (Welding H.vol.3, 1998). Disso decorre a maioria das aplicações em fabricação como aspergir o material e fundi-lo com o feixe de energia luminosa.que no foco atingem-se temperaturas até 10.000°C (Linde,2000).

3.1.4. Processo a Chama de Alta Velocidade – HVOF (High Velocity Oxygen Fuel).

Este processo, não sendo utilizado nesta pesquisa, será brevemente explicado pela importância dos resultados estabelecidos nos objetivos, já que os inconvenientes da pesquisa realizada por Freire (2002) são alvos a melhorar neste trabalho.

A fonte de calor, gerada neste processo, é a combustão da mistura de O₂ com gases combustíveis (propileno, propano ou querosene). A chama atinge temperaturas na faixa entre 2700 e 3100 °C, como indicado na figura 6. O material de deposição é pó e a sua alimentação é feita de forma concêntrica ao bico da pistola, utilizando gás nitrogênio para transferir o pó, inclusive no trajeto até o bico o pó é atomizado no passo por uma câmara quente tipo venturi, sendo, por tanto, além de aquecido o pó, aumentado sua velocidade. Logo atravessa com elevada velocidade à chama. O pó não funde, devido ao curto tempo que estas ficam na fonte de calor, apenas são aquecidas, permitindo com isto um aumento significativo da energia cinética das partículas, logo, no momento do impacto contra o substrato, estas transferem elevada energia que é transformada em calor.

As camadas obtidas com este processo se caracterizam por ter a menor porosidade e a maior aderência da maioria dos processos, pelo fato de as partículas atingir em substrato em estado sólido só amolecidas pelo calor e a energia do impacto. As velocidades dos gases que transferem as partículas podem atingir até 1200m/s sendo que as mais modernas atingem velocidades na faixa entre 3200 e 5000 m/s.

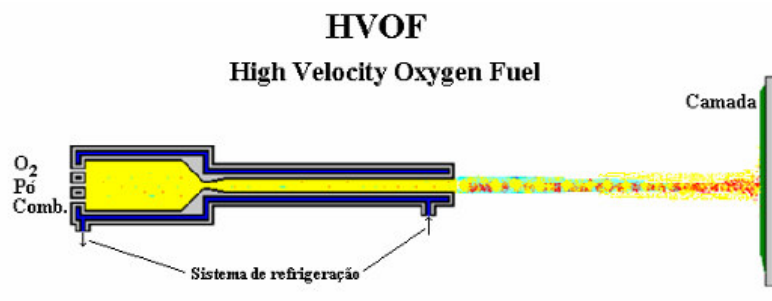


Figura 6. Diagrama esquemático do processo HVOF

3.2 Processo de aspersão térmica por arco elétrico – ASP (Arc Spray Process).

No processo de aspersão térmica a arco elétrico um par de arames eletricamente condutor é fundido pela ação de um arco voltaico que atinge temperaturas na faixa de 4000 a 6000°C (Cortes, 2001) e o metal fundido é atomizado por um jato de ar comprimido e projetado com elevada energia cinética na superfície do substrato. Para evitar que as partículas do jato se aglomerem na travessia, é utilizada uma segunda fonte de ar cuja aerodinâmica ajuda a espalhar as partículas (figura 7). As partículas fundidas chocam-se fortemente contra o substrato onde solidificam rapidamente formando a camada.

Neste processo, as temperaturas do substrato podem ser mantidas baixas durante o processo, evitando danos, transformações estruturais e distorções no material do substrato (Rodriguez, 2003).

As camadas aspergidas ao arco são normalmente mais densas e resistentes do que as equivalentes aspergidas a chama. Outras vantagens são os baixos custos, altas taxas de deposição e eficiência o que permite aspergir grandes áreas e altos volumes de produção.(Gordon, 2004).

As principais desvantagens do processo são: só pode-se aspergir arames eletricamente condutores; se o pré-aquecimento é requerido, este deve ser feito com aquecedores externos ao equipamento e finalmente, tem uma alta tendência a mudar a composição das ligas, devido à oxidação seletiva ou vaporização das ligas aspergidas (Camello e Trevisan, 2002).

A velocidade de projeção das partículas atinge até 250 m/s. Uma unidade de controle permite o ajuste dos parâmetros do processo: alimentação dos arames, suprimento de ar comprimido e a energia elétrica. A fonte de potencia de corrente continua trabalha na faixa de 18 a 40 V e permite operação com vários materiais, sejam puros ou ligados (sólidos e tubulares).

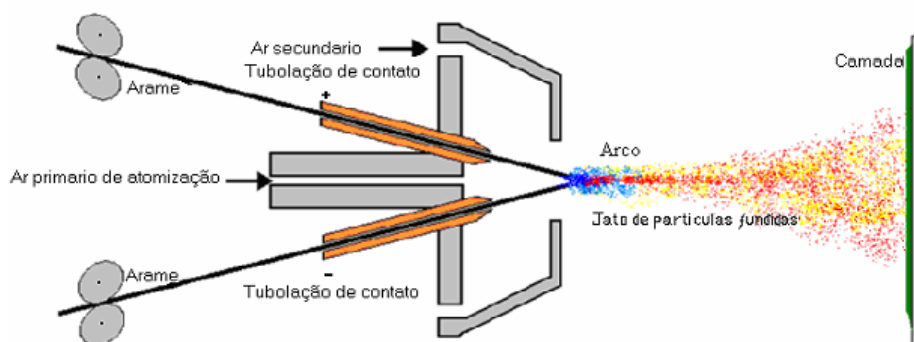


Figura 7. Diagrama esquemático do Processo de aspersão Térmica ao Arco (Gordon 2004).

O comprimento do arco e o tamanho das partículas aumentam com a elevação da tensão. Esta deve ser mantida nos níveis mais baixos para manter a estabilidade do arco o que deveria resultar em camadas mais densas e uniformes. O arco elétrico gera temperaturas na faixa dos 4000 a 6000 °C, onde qualquer material empregado neste processo pode ser fundido ou semifundido. A tabela 1 indica as faixas dos resultados esperados para alguns dos mais comuns processos de aspersão térmica (Halldearn, 2004).

Tabela 1. Comparação dos resultados com diferentes processos de aspersão térmica.

	Velocidade da partícula $m.s^{-1}$	Adesão MPa	Conteúdo de óxidos %	Porosidade %	Taxa de deposição $kg.hr^{-1}$	Espessura típica mm
Chama	40	<8	10-15	10-15	1-10	0.2-10
Arco	100	10-30	10-20	5-10	6-60	0.2-10
Plasma	200-300	20-70	1-3	5-10	1-5	0.2-2
HVOF	600-1000	>70	1-2	1-2	1-5	0.2-2

Estes dados diferem dos apresentados por Camello e Trevisan (2002) que indicam valores distinguindo o material aspergido como ferroso e não ferroso, destacando que se conseguem resistências adesivas que superam os 69 Mpa e espessuras na faixa de 0,5 –5,0 mm no processo de arco elétrico. Esta discrepância deve se considerar e submeter a ensaios o material específico a aspergir dado que cada liga apresentar um desempenho único e individual.

No processo ASP, pelo fato das partículas serem superaquecidas ou fundidas a altas temperaturas, alguma volatilização pode acontecer e ao serem transportadas pelo ar e, uma vez aderidas e ficar expostas ao meio ambiente, a formação de fases novas na camada é

favorecida (Camello e Trevisan, 2002), por exemplo, carbonetos, silicatos, boretos, ou nitretos, dando desta forma, resultados favoráveis em alguns casos e negativos em outros. Este fato deve ser considerado para atingir resultados convenientes em casos específicos, como é o caso das ponteiras, onde estas novas fases devem favorecer a aderência que além de apresentar boa resistência à corrosão, devem apresenta boa aderência, resistência ao desgaste e ao riscamento.

O comprimento de arco e o tamanho das partículas tendem a aumentar com a elevação da diferença de potencial entre os arames. Esta deve ser mantida em valores mínimos, compatíveis com a estabilidade do arco, para se obter revestimentos densos e de melhor acabamento (Wilden na Wank, 1999).

3.3 Materiais resistentes ao desgaste, corrosão e trincas.

Os materiais a serem aspergidos apresentam sena forma de pós e de arames e no caso de materiais resistentes ao desgaste, corrosão e trincas, eles contem partículas duras e uma liga que age de ancoragem na camada é importante conhecer a ductilidade, dureza, porosidade e aderência.

Sobre a aplicação de pós de carboneto nos sistemas HVOF, Beczkowiak et al., 1998 analisaram uma ampla variedade estudando a capacidade de absorver energia térmica em função de sua morfologia, composição e granulometria. Os resultados mostraram que a morfologia dos pós determina como as partículas ao se chocarem com o substrato, se deformam e adaptam a ele, distribuindo homoganeamente as fases duras, formando a estrutura da camada e que os grãos mais densos não atingem suficiente temperatura para amolecerem, podendo, ao se chocarem com o substrato, eliminar os poros que se formam entre as lamelas (Beczoviak et al., 1998).

Os principais materiais citados pela literatura para obter revestimentos resistentes ao desgaste e a corrosão são: WC-Co, WC-Ni, WC-Co-Cr, WC-Cr-Ni, Cr₃C₂-NiCr, NiWCrSiFeBC e 50%(WC-17Co) + 50% (Ni 17,5Cr 4,5Si 4,75Fe 3,5B 1C). Os cinco primeiros possuem carbonetos de alta dureza, os quais estão imersos em uma matriz tenaz/dúctil de Co, Ni, Co-Cr ou Ni-Cr que tem como função a união das partículas, além de possuir resistência à corrosão. A liga autofluxante NiWCrSiFeBC, forma uma camada com a matriz de Ni endurecida por solução sólida com Si, Cr e Fe, contando com a presença de fases duras como CrB, Ni₃B e Cr₇BC₄ (Kreye et al., 1994).

Com relação aos diferentes pós-pesquisados por Freire (2002) mostrados na tabela 2, foram medidas durezas entre 700 e 1410 HV_{0,3}. A menor dureza vem da liga intermetálica

NiWCrSiFeBC (700 HV_{0,3}) e a maior nas camadas de WCCo-Cr as que conseguiram atingir dureza de 1410 HV_{0,3}.

Tabela 2. Ligas utilizadas pelos processos HVOF com pistolas DJ2700(M) e JP 5000(T)

Cp	Materiais	Tipo de fabricação
M1	WC-17Co	Aspergido sinterizado
M2	WC-10 Co-4Cr	Aglomerado sinterizado
M3	Cr ₃ C ₂ -25(Ni20Cr)	Misturado
M4	(WC12Co)33Ni9Cr3,5Fe2SiB0,5C	Misturado
T1	WC-17Co	Aspergido sinterizado
T2	WC-10 Co-4Cr	Aspergido sinterizado
T3	Cr ₃ C ₂ -25(Ni20Cr)	Aspergido sinterizado
T4	Ni17, 3W15Cr4Si3,5Fe3B0,8C	Atomizado

A resistência ao desgaste avaliada mediante o ensaio ASTM G-65, os valores de desgaste ficaram na faixa de 25 a 49 mg. Porém a fragilidade é muito alta, como se pode observar no ensaio de riscamento com sobreposição (figura 8), ensaio feito com o esclerómetro pendular.

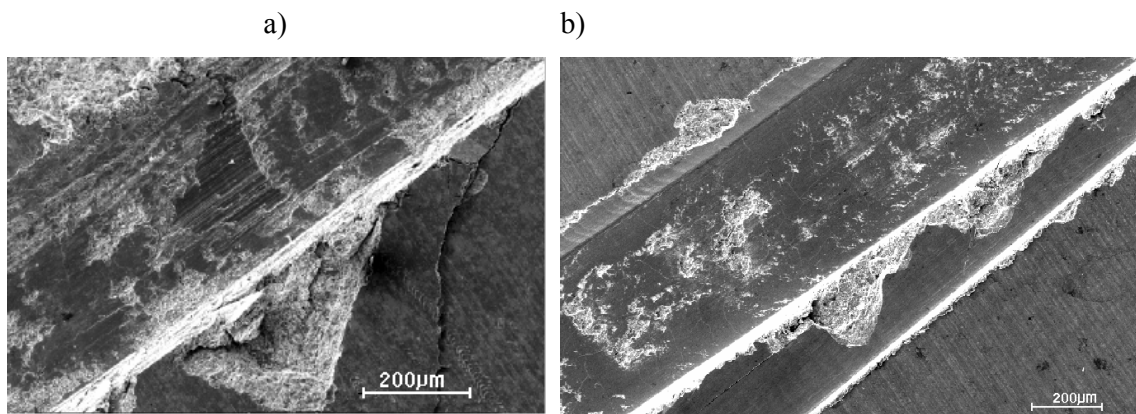


Figura 8. a) NiWCrSiFeBC menor dureza e b) WCCo-Cr maior dureza, nos dos casos, durante o ensaio de riscamento observa-se a remoção de material deixando uma fratura frágil.(Freire, 2002).

O trabalho de Kreye et al., (1994) mostrou que para o material NiCrSiFeBC a dureza da camada obtida atinge cerca de 700 HV_{0,3}. Após um tratamento térmico, forma-se na liga varias fases finamente dispersas, elevando a dureza até 900HV_{0,3}, dando como resultado uma pequena melhora da resistência ao desgaste. Enquanto que para o aumento da dureza é especialmente eficaz uma fina dispersão de partículas (0,01 a 0,10 µm), para melhorar a resistência ao desgaste é mais favorável uma distribuição grosseira de fases ou partículas

duras (1,0 a 10 μm). As partículas grosseiras formam-se na liga NiCrSiFeBC só após longo recozimento em temperatura elevada ou num resfriamento lento após a fusão. A maneira mais eficaz de melhorar a resistência nestas camadas consiste na introdução de 50% de partículas duras de WC-17Co (Fillion, 1995).

Freire (2002) propõe re-fusão da camada para melhorar a tenacidade. Porém o material do substrato é um aço AISI 4130 temperado e revenido, isso é inviável, pois as temperaturas da re-fusão podem atingir e superar as temperaturas de perda das propriedades mecânicas do substrato. Por outro lado, todos os ensaios de riscamento realizados por Freire(2000) apresentaram trincas. Se qualquer trinca ou poro passante atingir o substrato, este pode corroer devido ao contato direto com nevoa salina ou água do mar. Esses resultados permitem concluir a necessidade de pesquisar ligas mais dúcteis, com igual ou melhor resistência ao desgaste.

Wilden e Wank (1999) aspergiram camadas com arames tubulares de NiCrBSi (Porosidade <3%) e NiCr-WC/W₂C (porosidade <5%), pelo processo ASP, mostraram, mediante o ensaio de corrosão com soluções de H₂SO₄ (DIN 50018), a proteção anticorrosiva destas camadas em 80 horas, sugerindo a partir destes resultados que as porosidades passantes dificilmente se geram neste processo. Devido a isto é que às camadas que precisam melhores características de resistência à corrosão e um alto nível de resistência ao desgaste, tem sido adicionados Ni e Cr (Kreye et al., 1994), que agem como a matriz onde se consegue ancorar partículas duras de tungstênio fundido e triturado de tamanhos de 0,1 a 140 μm , e partículas geradas na aspersão como no caso das ligas autofluxantes, indicando que maiores pressões de atomização melhoram a resistência ao desgaste (Wilden and Wank, 1999).

No caso dos arames tubulares estudadas por Wilden e Wank (1999), envolvem a cobertura do arames de ligas autofluxantes de Ni e NiCr 80/20 e no centro estão os carbonetos imersos numa matriz metálica, como é mostrado na figura 9.

Os Carbonetos nesse caso são de tamanho maior que no caso dos pós e estas partículas são “molhadas” pelo Ni da cobertura quando fundido no extremo do arame antes do que o metal fundido seja atomizado (Wilden and Wank, 1999). Isto contradiz o estabelecido, que o recheio é jogado fora do arame pela ranhura de união do tubo durante o processo de aspersão, resultando uma distribuição heterogênea de partículas de carbonetos na camada (Wilden and Wank, 1999).

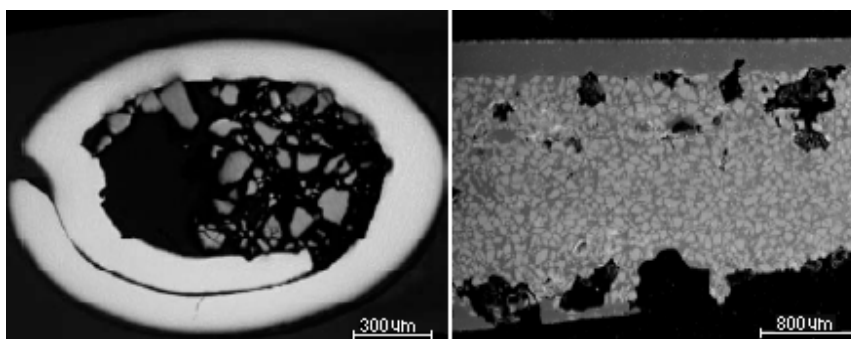


Figura 9. Vista transversal inclinada e longitudinal da ponta de um arame mostrando a cobertura de Ni e as partículas duras no centro (Wilden and Wank, 1999).

Na medida em que a pressão do gás é elevada, a quantidade de metal fundido que “molha” os carbonetos diminui sendo mínima quando se atinge os 2,5 hPa. Altas pressões de atomização geram partículas menores e com maior velocidade, com menos metal de recobrimento e maior energia cinética, estas agem como abrasivos pelo aumentam a rugosidade do substrato. No caso dos arames com partículas de W/W_2C , um aumento da pressão de aspersão de 1,7 para 3,0hPa diminui a rugosidade R_a de 4,57 μm a 2,52 μm o que não é tão significativo no caso do aspersão partículas duras de carbonetos refratários no recobrimento onde a rugosidade R_a diminui de 2,44 μm para 2,02 μm .

A porosidade com W/W_2C foi menor do que 5% ,em quanto para os arames livres de carbonetos foi menor do que 3% e a adesão observada para os dois casos foram satisfatórias. As durezas atingidas foram similares, na faixa de 740HV_{0,05} para a matriz e de 2050HV_{0,05} nos carbonetos, onde a dureza não é influenciada pelos parâmetros do processo, porque as partículas não se fundem (Wilden and Wank, 1999).

Para o caso do ensaio de desgaste com disco de borracha úmida, os corpos de prova mostram diferente topografia dependendo da quantidade de partículas duras e da dureza da matriz onde são aderidas. A figura 10 apresenta diferentes superfícies de desgaste, mantendo a mesma matriz e modificando a percentagem de partículas duras (Karl, 1987). Trata-se, neste caso, de 10%;30% e 41% de carbonetos de Cr em martensita de uma fundição branca ao Cr.

No primeiro caso observam se sulcos relativamente finos. Com 30% de carbonetos, os sulcos são mais grosseiros e finalmente, com 41% de carbonetos pode-se ver a geração de pequenos buracos e desgaste irregular. Este ensaio, do disco de borracha úmida, permite fazer um prognóstico aproximado dos resultados esperados em camadas onde as partículas são maiores em tamanho (10 a 40 μm) em grande quantidade. Os pequenos buracos, no caso de 41% de carbonetos, são devido à ruptura e desprendimento dos carbonetos (Karl, 1987).

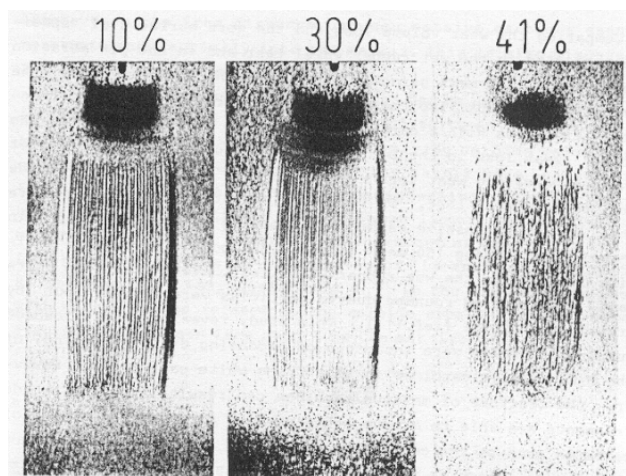


Figura 10. Aparência das camadas de matriz martensítica com diferentes porcentagens de carbonetos de Cr após ensaio de desgaste (Karl, 1987).

3.4 Parâmetros de aspersão

Para a seleção dos parâmetros de aspersão só estavam disponíveis as recomendações do fabricante do equipamento a usar (ValueArc™ LCAG Electric Arc Gun) o qual fornece só parâmetros para materiais comuns. Em função às semelhanças dos materiais a pesquisar e os existentes no catálogo do equipamento, apresentam-se parâmetros referenciais na tabela 3.

Especificamente para os produtos DURMAT AS751, AS760 e AS761, que são arames produzidos para o processo ao arco, chama e HVOF, encontraram-se parâmetros de aspersão para um equipamento ASP, Libo-OSU G30/2, pistola LD/U2, os que estão na tabela 4. As propriedades das camadas, obtidas com esses parâmetros, são apresentadas na tabela 5 e as estruturas esperadas na figura 11 (Durmat, 2004).

Tanto na liga AS751 quanto na liga AS761 é possível identificar claramente as partículas duras de WC/W₂C, como também escassa quantidade de poros, em quanto na liga AS760 observa-se que os carbonetos refratários não são perceptíveis, mas é a que apresenta uma dureza maior na matriz, embora os poros podem ser perigosos, o que deverá se reduzir para evitar a porosidade vermicular que conecte o substrato com o ambiente. Isto pode se lograr aumentando a pressão de atomização e diminuindo a intensidade de corrente para manter a matriz com um alto nível de Ni puro.

Tabela 3. Parâmetros fornecidos pelo fabricante do equipamento.

Produto	Pressão de atomização Kpa	Pressão de ar de alimentação.Kpa	Tensão V	Intensidade A	Pré Aquecimento°C	Distância Mm
Metcoloy#2	276-448		28-32	200		100-150
Metcoloy#5	276-448		28-32	200		100-150

Tabela 4. Parâmetros de aspersão recomendados pelo fabricante para equipamento Libo-OSU

Produto	Pressão de atomização Kpa	Pressão de ar de alimentação.Kpa	Tensão V	Intensidade A	Pré Aquecimento°C	Distância mm
DURMAT AS-751	3000	-	30	285	20	100
DURMAT AS760	2750	-	27	250-300	20	100
DURMAT AS 761	2500	3000	27	210	20	100

Tabela 5. Características técnicas obtidas nas camadas, fornecidas pelo fabricante.

Produto	Eficiência da deposição %	Porosidade %	Dureza HV _{0,05}
DURMAT AS-751	72	<3	540HV0,1;>2200HV0,4
DURMAT AS760	73	<3	720-1000
DURMAT AS 761	72	5	650-2053

3.5 Transformação de fases.

Os FTC são cermets fundidos e triturados, do tipo WC/W₂C que atingem altos níveis de dureza, o seu tamanho nas camadas aspergidas varia desde frações de 10µm ate ~140 µm como pode se ver nas figuras 12 e 14, embora sua baixa resistência à oxidação e à fragilidade pelo oxigênio deve-se tomar em conta.

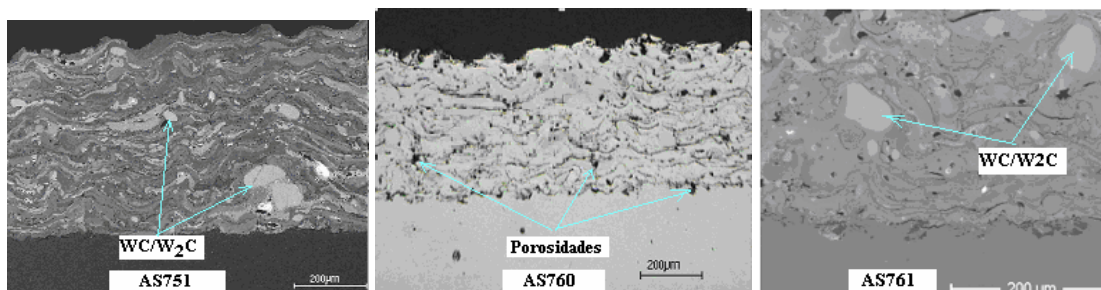


Figura 11. Camadas aspergidas com os parâmetros da tabela 4 (Wilden and Wank, 1999).

A literatura (Wilden and Wank, 1999 e Durmat, 2004) não informa sobre a identificação de novas fases, mas como indicado anteriormente, dada a grande afinidade entre o C e Cr, O₂ e Cr, B e W, Si e O₂, Cr e Ni e a interação entre eles a temperaturas elevadas, a geração de novas fases poderá acontecer. Na tabela 6 pode-se ver diferentes fases e suas durezas, com o intuito de ter uma percepção aproximada das fases existentes quanto as que possam ser geradas, se assume a existência de partículas precipitadas de níquel-cromo – tungstênio –boro, na forma de compostos complexos de carboneto de tungstênio –cromo e boretos de tungstênio –cromo (Fillion, 1995).

Tabela 6. Durezas de fases que poderiam estar presentes nas ligas por analisar (Fillion, 1995).

Estrutura	CrN	Cr ₃ C ₂	WC	W ₂ C	BN	B ₄ C	SiC
Dureza HV	1100	1300	2100	2100	3000	3000	2600
Temperatura de fusão °C	1500	1810	2776	2776	-	-	-

O Welding Handbook indica que as partículas de carbonetos de tungstênio, quando sobre aquecidas, fundem, perdem dureza pela diluição com a camada matriz, pelo que recomenda que estes carbonetos sejam de um tamanho adequado à função e a camada matriz só aja como ancoramento e não forme uma liga ao fundir (Welding H. vol. 4, 1998).

3.6 Resistência ao Riscamento.

O risco consiste num sulco numa superfície gerado pelo despreendimento de material promovido por outro material em forma de partícula de geometria desconhecida, mais dura e que se deslizou com uma carga normal e outra tangencial nessa superfície. De acordo com as propriedades do material a ser riscado a perda o deslocamento do material pode ocorrer por um dos três mecanismos (Sousa et al., 2004):

- Micro sulcamento: a ponta do identador provoca deformações plásticas sem provocar perda de material. Este, deformado, flui lateralmente ou acumula-se na frente da partícula (figura 12a).
- micro-corte; a tensão cisalhante na frente das partículas abrasivas causa um arrancamento de fragmentos na forma de micro-cavacos (figura 12b).
- micro lascamento: neste processo, grandes fragmentos são subitamente arrancados da superfície da amostra devido à formação e propagação de trincas. Trata-se de um mecanismo restrito aos materiais frágeis, e que ocorre quando as tensões produzidas pelas partículas abrasivas excedem determinados valores críticos (figura 12c).



Figura 12. Mecanismos admitidos: (a) micro-sulcamento (b) micro-corte (c) micro-lascamento

3.6.1 A Técnica Esclerométrica

A esclerometria consiste basicamente em riscar a superfície de uma amostra conhecendo-se a carga aplicada, a velocidade de riscamento e as características geométricas do indentador. Os resultados são obtidos com base na morfologia do risco e nas componentes normal e tangencial da força aplicada para promover o riscamento.

Existem esclerômetros pendulares, similarmente a um ensaio de impacto Charpy, possuem pouca praticidade e alta energia associada, da ordem de 300 J, contra os 0,01 J utilizados no esclerômetro linear (figura 13). Este último foi inicialmente destinado a caracterizar a resistência à abrasão, logo ficou constatada a sua grande versatilidade. NOGUEIRA & DE MELLO (1996) afirmam que, a pesar das simplificações fenomenológicas, um esclerômetro é seguramente capaz de:

- determinar os esforços atuantes sobre diferentes fases de um mesmo material;
- avaliar a eficiência de um lubrificante, ou da aderência entre camadas finais;
- analisar o efeito da microestrutura na vida útil de um componente;
- obter as propriedades dureza ao risco e energia específica, entre outros.

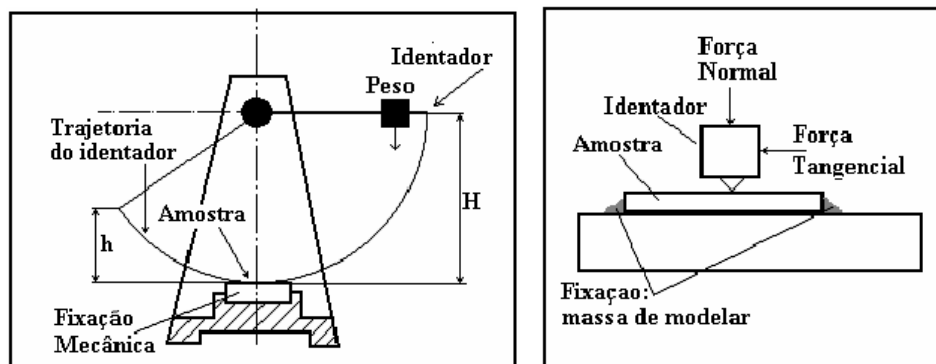


Figura 13. Diagrama esquemático do esclerômetro pendular (esquerda) e retilíneo (direita).

Neste caso considera-se apenas as propriedades de dureza ao risco, a energia de remoção específica e a morfologia dos riscos, obtida simultaneamente em um mesmo ensaio, realizado utilizando-se um esclerômetro de trajetória retilínea.

A pouca praticidade do ensaio pendular é que o indentador é uma ferramenta exclusiva para o ensaio e sistema de fixação do corpo de prova é complexo e delicado já que o posicionamento do corpo de prova deve assegurar profundidades de riscos de níveis de micron.

A figura 14 representa esquematicamente o esclerômetro retilíneo com os sensores e os transdutores que permitem obter a medição das forças axiais e tangenciais utilizadas na

determinação da energia associada. A facilidade da fixação do corpo de prova e a utilização de indentadores de dureza Rockwell e Vickers são as principais vantagens deste esclerómetro.

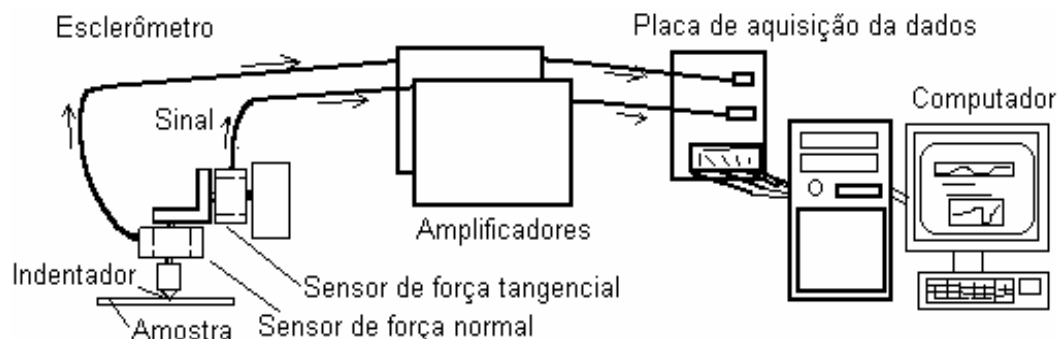


Figura 14. Esquema de funcionamento do esclerómetro fabricado no LABMAT da UFSC. (Sousa et al., 2004).

Da figura 15, se deduzem as equações para encontrar a dureza ao risco, H_R e a energia específica, e (energia necessária para movimentar uma unidade de volume):

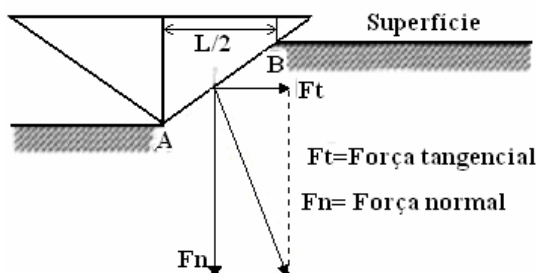


Figura 15. Geometria do indentador com as forças atuantes (Sousa et al., 2004).

$$H_R = K_1 F_N / L^2 \quad (1)$$

$$e = K_2 F_T / L^2 \quad (2)$$

Onde $F_N = F_{N1} + F_{N2} + \dots + F_{Nn} / n \quad (3)$ e

$$F_T = F_{T1} + F_{T2} + \dots + F_{Tn} / n \quad (4)$$

K_1 e K_2 são constantes inerentes à geometria média do indentador, L a largura média do risco, F_n força normal à superfície a riscar e F_t , força tangencial a superfície a riscar. Freire (2002) afirma baseado nos seus próprios resultados que não se pode diferenciar em qual camada se gasta mais energia para arrancar certa quantidade de material sendo mais importante a análise da morfologia do risco para determinar se gera só deformação no material ou existe corte (micro cavacos) ou lascamento (micro lascas).

3.7 Comportamento à Corrosão Conhecendo o Potencial de Polarização Potenciodinâmica.

A tendência de um metal à passivação ou à oxidação num dado meio, determina seu comportamento eletroquímico. Através da utilização da técnica de polarização anódica, é possível conhecer em laboratório o comportamento eletroquímico de um metal, pela construção de curvas de potencial vs corrente.

Mostra-se na figura 16, um diagrama esquemático, referente ao comportamento potenciodinâmico anódico de um aço inox austenítico em ácido sulfúrico. Este comportamento é atribuído à presença de um filme protetor (Cr_2O_3), com apenas um nm ($0.001 \mu\text{m}$) de espessura sobre a superfície do aço (Sedriks, 1979). A figura 16 mostra o potencial de corrosão (E_{corr}), o potencial primário de passivação (E_{pp}), o potencial de pites (E_{p}), o potencial da região de transpassividade (E_{t}), a corrente de passivação (i_{pas}) e a corrente de transição i_{corr} . Quanto menor for i_{corr} maior rapidez de passivação e quanto mais perto esteja E_{pp} de E_{corr} maior é a tendência a passivação. Irregularidades na perda de passivação indicam corrosão instantânea e a corrosão do tipo uniforme ocorre geralmente na região ativa (Schiefler, 2004).

O estado de passivação caracteriza-se por apresentar densidades de corrente de no máximo $1,0 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (i_{pas}), constantes ao longo de uma ampla faixa de potencial (ΔE). Este valor de i_{pas} corresponde a taxas de corrosão uniforme da ordem de um milésimo de mm/ano, desprezível, em termos de vida útil de estruturas e equipamentos. Quanto menor o valor de i_{pas} , menor a taxa de corrosão do filme passivo e maior, portanto, o seu poder protetor (EG & G., 1987).

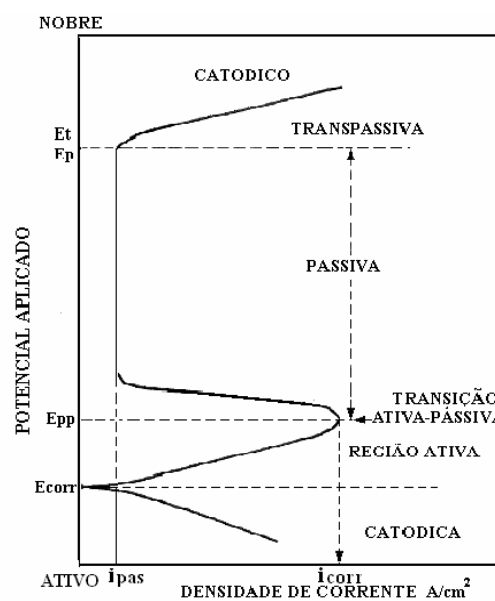


Figura 16. Curva de polarização esquemática para o aço inoxidável austenítico em solução de ácido sulfúrico (Sedriks, 1979).

Uma análise do mesmo aço com o aumento da concentração de cloreto na solução, figura 17 permite verificar o deslocamento da curva para a direita, representando uma passivação menos efetiva (crescentes valores de densidade de corrente), com o aparecimento do potencial de pite, E_p , acima do qual passamos a verificar a incidência deste tipo de ataque localizado, relacionado à perda da passivação em determinados sítios no filme passivo. Trata-se na realidade de um processo de despassivação localizada, tendo em vista a presença dos íons cloreto (Cortes, 1998).

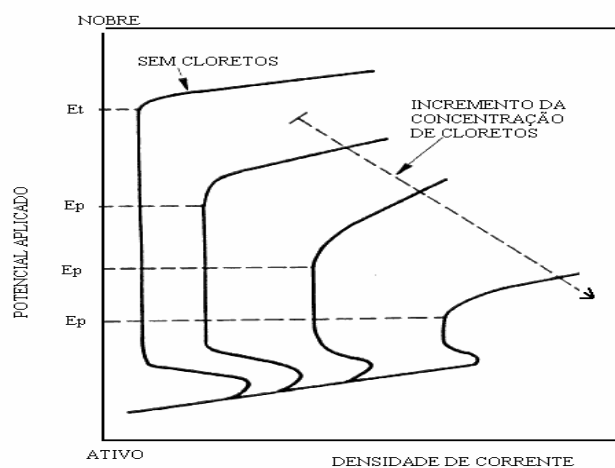


Figura 17. Curva de polarização esquemática referente ao comportamento de aço inoxidável austenítico em solução de ácido sulfúrico concentrado com % crescentes de cloreto (Sedriks, 1979).

CAPITULO 4. MÉTODOS, MATERIAIS, E EQUIPAMENTOS.

Os materiais pesquisados foram arames tubulares de Ni com pós de WC, Cr, Si,B, formando diferentes compostos particulados de tamanho micrométrico na faixa de 0,1 a 100µm. Segundo Fillion (1995) pode conter partículas precipitadas de níquel-cromo – tungstênio- boro na forma de compostos complexos de carboneto de tungstênio –cromo, silicatos e boretos de tungstênio–cromo.

4.1 Metodologia:

Fizeram-se 9 corpos de prova em dois grupos:

- a) Aspergindo diferentes materiais com e sem pré-aquecimento mantendo o resto dos parâmetros.
- b)Aspergindo um material e modificando a pressão do ar primário e variando a temperatura de pré-aquecimento.
- c) Aspergindo um material selecionado de aqueles com melhor desempenho nos grupos a) e b), variando a pressão de ar primário, diminuindo a distância bico-substrato e a corrente selecionada com base nos resultados obtidos, visando melhorar o desempenho no experimento de verificação (VAS761).

Adicionalmente, ensaiou-se ao riscamento retilíneo dois corpos de prova aspergidos por HVOF, um com a pistola JP500 e outro com a pistola DJ 2700, aspergidos com os parâmetros do processo que permitem obter a maior dureza (Freire, 2002). Foi realizado ensaio potenciodinâmico em outros dois corpos de prova aspergidos com as mesmas pistolas, com os parâmetros que geraram a menor e a maior porosidade (Freire, 2002).

4.2. Identificação dos materiais

Mantendo os códigos do fornecedor dos arames aspergidos e agregando cifras no início e no final, desenvolveu-se uma codificação de 7 dígitos para identificar os materiais e poder associar a os parâmetros em eles usados:

Primo dígito: Número correlativo. A ausência ou modificação dele significa um novo corpo de prova.

Segundo o sexto dígito: Denominação fabricante (AS760, AS761, AS751).

Sétimo dígito: Condições de pré-aquecimento; A é sem pré-aquecimento e B com pré-aquecimento (a definir para cada caso).

4.2.1 Composição química dos arames a depositar.

Os principais componentes entregados e certificados pelo fabricante são mostrada na tabela 7. Destaca-se a presença de FTC (fused tungsten carbide) na forma de WC ou WC/W₂C (Wilden and Wank, 1999) nos produtos AS761 e AS751 sendo que este último não tem Cr.

Tabela 7 Composição química dos arames a caracterizar.

Produto	%C	%Si	%B	%Ni BAL	%Cr	%RC*	%FTC
DURMAT AS751	0,4	4,0-5,0	1,7-2,0	X			X
DURMAT AS760	0,3	3,8	X	X	19,0	X	
DURMAT AS761	0,4	4,0-5,0	1,7-2,0	X	10,0		X

*Carbonetos refratários, de cromo e de silício.

Na figura 18 podem se observar micrografias destes arames, destacando-se que a lamina que envolve as partícula de pó e rica em Ni e as partículas maiores são compostos de alta dureza.

A análise no MEV da capa metálica dos arames tubulares indica que o AS751 (Figura 18a) tem 70,3% de Ni, 18,5 de Cr e 1,7 de Si, em quanto que o AS760 (Figura 18c) tem 100% de Ni e no caso do AS761 (figura 18e) os componentes são 99,5 % de Ni e 0,5% de Si. Quanto aos carbonetos refratários (provavelmente V₈C₇ e SiC), estes encontram se presentes só no AS760 e os FTC nos arames AS761 e As751 (as manchas escuras correspondem à cola usada).

A preparação dos arames para a observação microscópica apresenta o problema de o recheio ser pó com o comportamento de um fluido no momento do polimento. Para lograr as foto-micrografias realizou-se o seguinte procedimento (figura19):

- a) Procede-se o corte das amostras do arame com a ferramenta que aperte a ponta do arame, deixando-o com uma ponta cônica.
- b) Monta-se em resina poliéster
- c) Primeiro lixamento: Lixou -se com a ponta cônica direcionada para acima, para o pó não cair.
- d) Cobre-se a zona do arame polido com Éster de Cianocrilato (Cola anaeróbica) e deixa-se por 24 horas.
- e) Segundo lixamento e polimento realizam-se na posição normal.

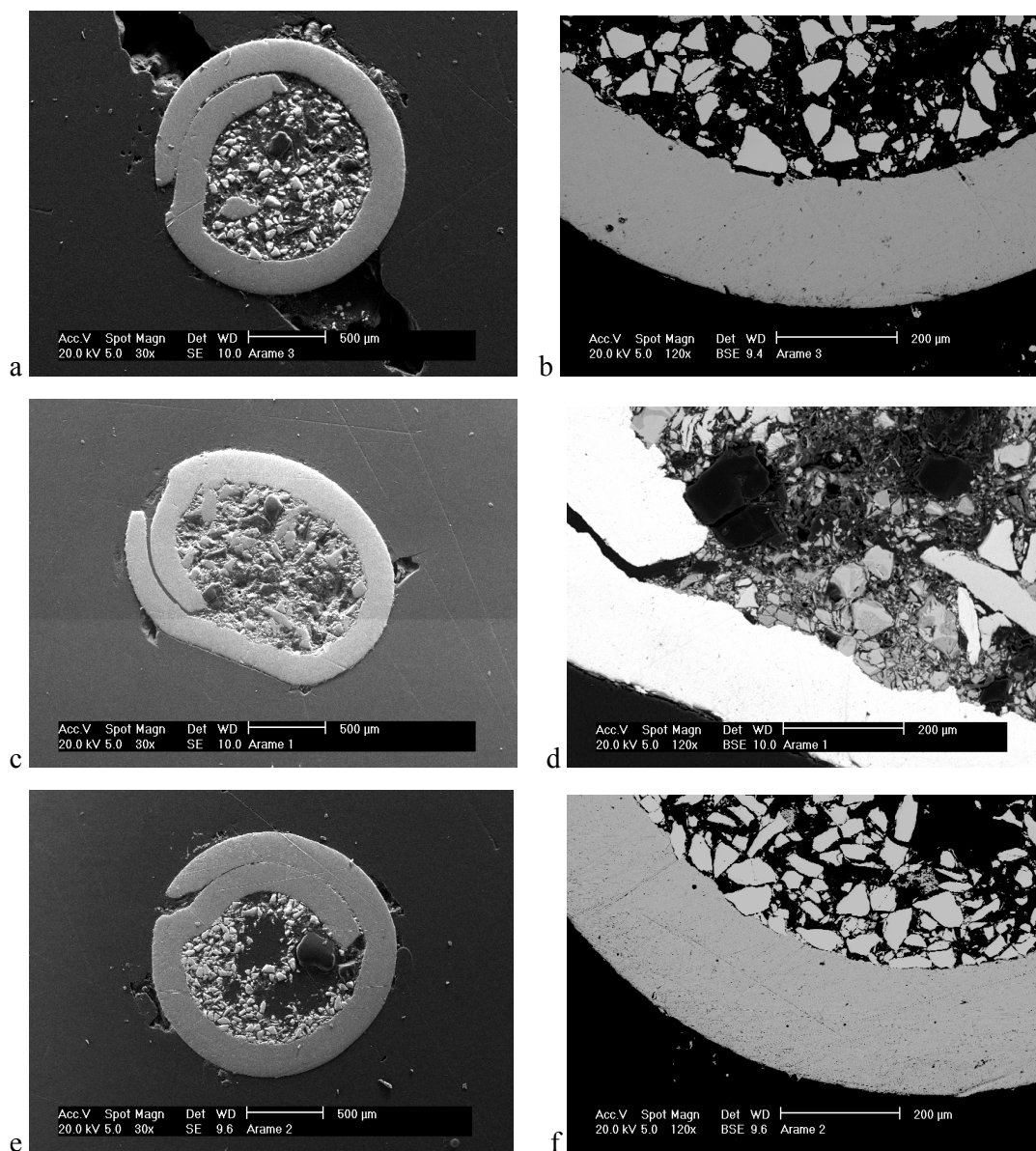


Figura 18. a e b arame AS751, c e d arame AS760, e f arame AS761.(lixamento com SiC e polimento com Alumina 4μm).

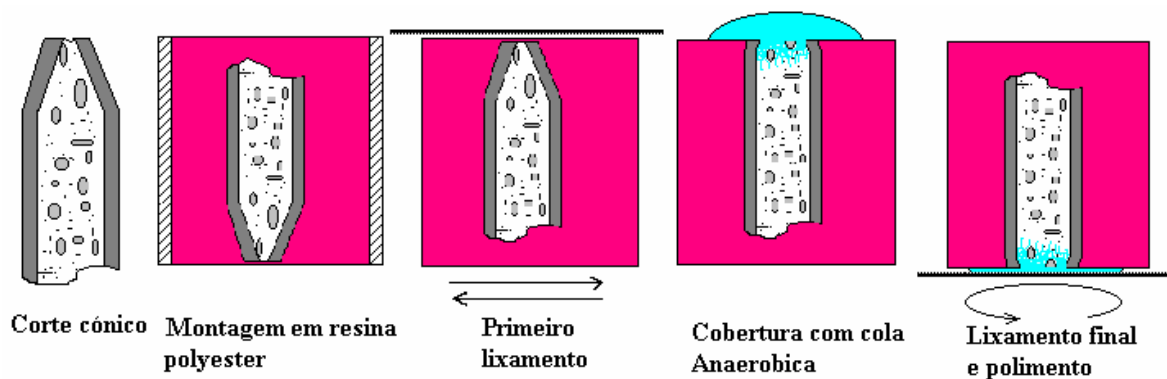


Figura 19. Método para o polimento do arame tubular recheio.

4.3. Parâmetros de Aspersão.

A Tabela 8 indica as especificações definidas para cada corpo de prova e os parâmetros usados nesta pesquisa: tanto os discos de 90 mm de diâmetro com 8 mm de espessura e os pinos para o ensaio de tração de 25 mm de diâmetro por 25 de comprimento (Norma ASTM C-633/79). Para todos os casos, a corrente selecionada foi 200A e o comprimento do jato de 150 mm, baseado nas recomendações do fabricante do equipamento a usar.

Tabela 8. Parâmetros usados na aspersão dos corpos de prova.

Material	Ar Prim. bar	Tensão V	Pré-aquecimento.		
			150°C	200°C	250°C
1AS760A	5,0	28			
1AS760B	5,0	28	X		
2AS761A	5,0	33			
2AS761B	5,0	33	X		
3AS751A	5,0	33			
3AS751B	5,0	33	X		
4AS751A	2,7	33			
4AS751B	2,7	33		X	
5AS751	2,7	33			X

4.4. Equipamentos.

Para preparar os corpos de prova e a caracterização destes, trabalhou-se tanto no Laboratório de Aspersão Térmica do Departamento de Mecânica da Universidade Federal de Paraná em Curitiba quanto nas instalações dos laboratórios Labsolda, Labconf, Labmat e USICON do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina, em Florianópolis. Os procedimentos são definidos nas normas indicadas para cada ensaio, mas existindo alguma modificação, esta será descrita e justificada.

4.4.1. Preparação dos corpos de prova.

Os corpos de prova em aço SAE 1045 foram jateados com óxido de alumínio grau 26 e pressão de 0,5 MPa, obtendo uma rugosidade superficial R_y de 50 a 60 μ m e R_a na faixa de 5 a 7 μ m. Neste processo, percebeu-se que a distância de jateamento é importante para obter os resultados esperados, sendo a distância mínima bico-peça 50 cm. A figura 20 mostra o equipamento que tem um filtro para o pó da câmara, que fica na parte posterior e só visível quando funcionando, e a figura 21 o dimensionamento dos corpos de prova utilizados.

A medição da rugosidade foi feita com um rugosímetro Mitutoyo SJ 20, mínimo Ra 3,0 μ m num comprimento de amostragem de 2,5 mm. Para evitar a geração de películas de óxidos ou umidade, o jateamento foi feito imediatamente antes da aspersão e os corpos de prova guardados em sacolas de polietileno até o momento da aspersão.



Figura 20 Jateadora com a câmara aberta.

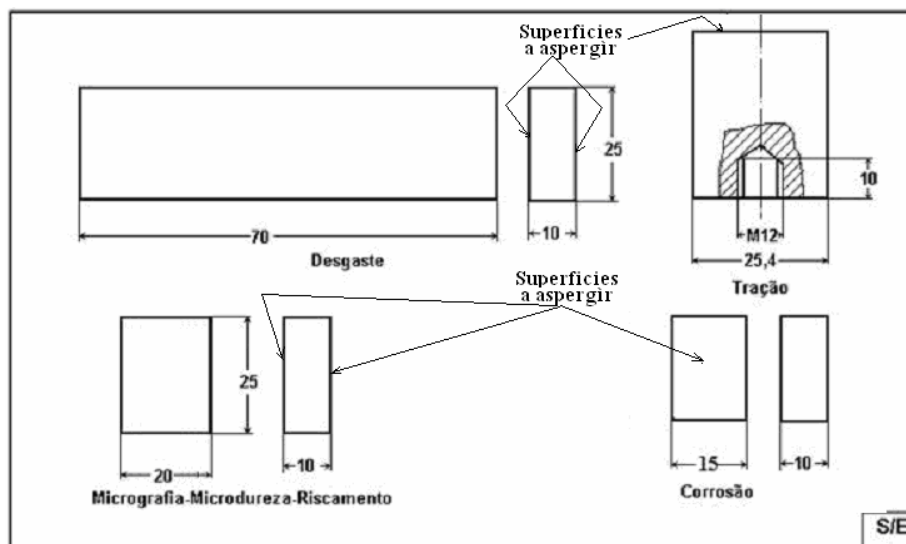


Figura 21 Dimensões dos diferentes corpos de prova.

4.4.2 Aspersão

Para a aspersão dos arames foi utilizado um equipamento para ASP Valuearc™ 300E da SULZER METCO (Figura 22).

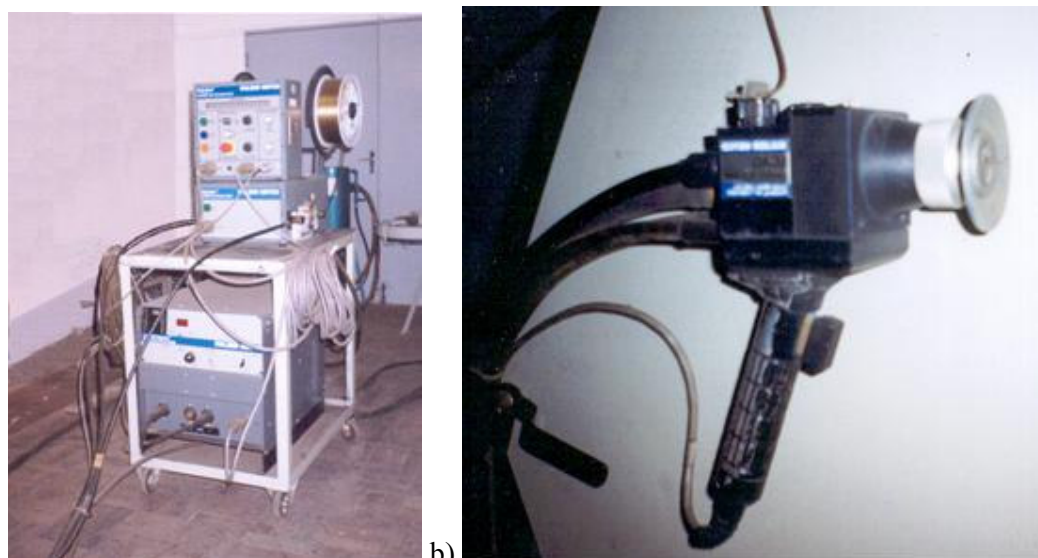


Figura 22. a) Fonte de energia, cabeçote alimentador e controles e b) Pistola de aspersão a arco.

Os parâmetros a controlar na máquina são programados individualmente e testados. A figura 23 mostra o teste de tensão e corrente (no teste da pressão do ar primário não é preciso abrir o arco).



Figura 23. Processo de teste da tensão e corrente.

Os parâmetros a controlar pelo operador da pistola são a distância e a espessura da camada. Além disso, um observador externo deve registrar as características do jato, sua continuidade, som e a forma do feixe durante o processo de aspersão. O operador deve realizar movimentos que permitam obter camadas não superiores a $70 \mu\text{m}$ por passada e manter o jato em forma perpendicular ao substrato (Figura 24).



Figura 24. Posição da pistola durante a aspersão térmica.

No caso de pré-aquecimento ser necessário, este deve ser feito de modo a obter um aquecimento homogêneo. Para isto é feito um vaivém com a chama, até obter a temperatura desejada. Neste caso usou-se um termômetro digital de contato dotado de termopar.

Para o pré-aquecimento, utilizou-se uma tocha de gás propano (figura 25).

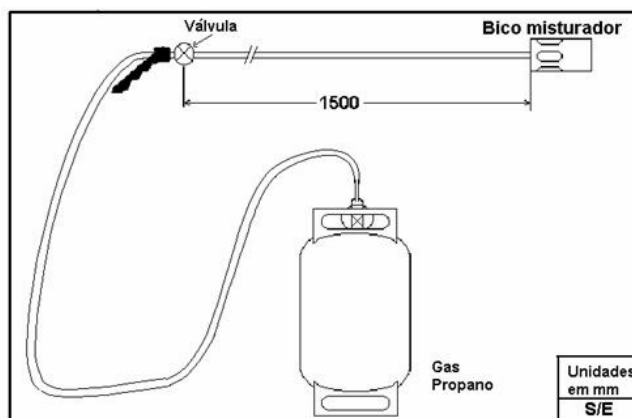


Figura 25. Aquecedor de propano. O bico misturador é feito de aço refratário.

A espessura da camada foi medida com ultra-som, o equipamento tinha a mínima divisão de escada de 0,5 mm e por diferença de espessura com um paquímetro analógico com mínima divisão de escada de 0,05 mm. Nos dos casos, deve-se considerar o sobre dimensionamento gerado por partículas grosseiras que favorecem uma medição errada o que é associado pela presença de partículas de elevada temperatura de fusão ou arame de baixa condutividade elétrica (Wilden and Wank, 1999).

4.4.3. Preparação dos corpos e proba.

4.4.3.1. Microdureza. Os corpos de prova foram montados em resina poliéster, lixados com lixas

de 80; 120; 220; 400; 660; 1000 e 1200 Mesh e polidos com alumina de 4 μm na superfície aspergida e na superfície perpendicular à aspergida.

4.4.3.2. Desgaste abrasivo. No caso dos corpos de prova para o ensaio de desgaste, só se limpou a superfície de partículas grosseiras e se fez um pré-desgaste de 5 segundos.

4.4.3.3. Aderência. Os corpos de prova foram colados com a cola de cura a quente HTK-100, cola previamente testada em pinos sem aspergir, com os quais obteve-se a máxima aderência (62 Mpa) quando mantidos durante 25 minutos a 230°C, dados usados para colar os corpos de prova aspergidos. Os contra pinos (pinos sem aspergir a colar com os aspergidos) foram jateados com oxido de Al grau 26 e a rugosidade deles ficou na faixa de 50 a 60 μm . A pressão de colagem (7,0 MPa) e mantida no forno pela ação de uma mola inserta no dispositivo (figura 26).

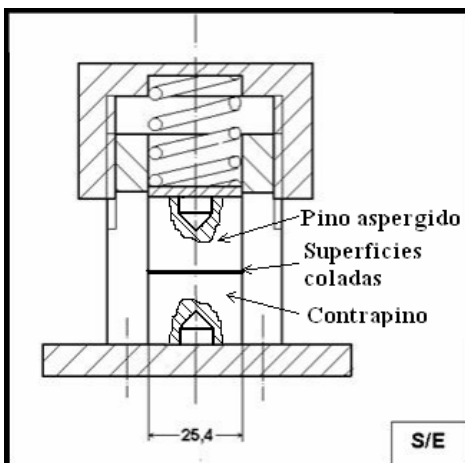


Figura 26. Esquema de um porta conjunto corpo de prova - contrapino para cura a quente que deve manter pressionado o conjunto pela ação da mola.

4.4.3.4. Microscopia ótica. Preparação indicada em 4.3.3.1.

4.4.3.5. Porosidade. Preparação indicada em 4.3.3.1.

4.4.3.6. Riscamento. Preparação indicada em 4.3.3.1. Exceto que não foram montados em resina.

4.4.3.7. MEV. Preparação indicada em 4.3.3.1. e limpeza ultrasónica por 5 minutos.

4.4.3.8. Polarização potenciodinâmica. Preparação indicada em 4.3.3.1. Posteriormente a os corpos de prova lês foi soldado um arame eletricamente condutor na parte oposta à camada, este arame passado pelo centro de um tubo de vidro em forma de L, logo o

corpo de proba foi montado em resina poliéster, deixando a camada completamente isolada do substrato (figura 35).

4.5. Micro dureza.

Procedimento: Norma DIN 50133- Pirâmide de diamante Vickers na carga de 2,94N ($HV_{0,3}$) tempo: 15s, 10 e medições para um 95% de confiança. Maximo coeficiente de variação na matriz: 15% (Kreye et al., 1994). Equipamento Shimadzu HMV. Fizeram-se durezas na matriz e nas partículas duras. Neste último caso não é considerado um máximo coeficiente de variação, dado que estas são variadas e apresentam durezas muito diferentes.

4.6. Desgaste Abrasivo.

Procedimento: Norma ASTM G65 – 01 - Procedimentos B (10 minutos de desgaste em corpo de proba maciço) e C (30 segundos de desgaste em camada fina no corpo de prova), areia de óxido de sílice, grau 50 fornecida e certificada pelo IPT. Equipamento fabricado no Labsolda, UFSC. (Balthazar, 2002).

Este ensaio deveria ter sido feito com areia grau 70 contendo até um 5% de areia grau 50, mas, pela inexistência de uma areia, usou-se grau 50, areia usada em corpos de prova com o quais se comparam estes ensaios. A figura 27a) mostra uma fotografia do equipamento usado. Esse equipamento deve ser calibrado e preparado para diminuir ao máximo os erros devido a:

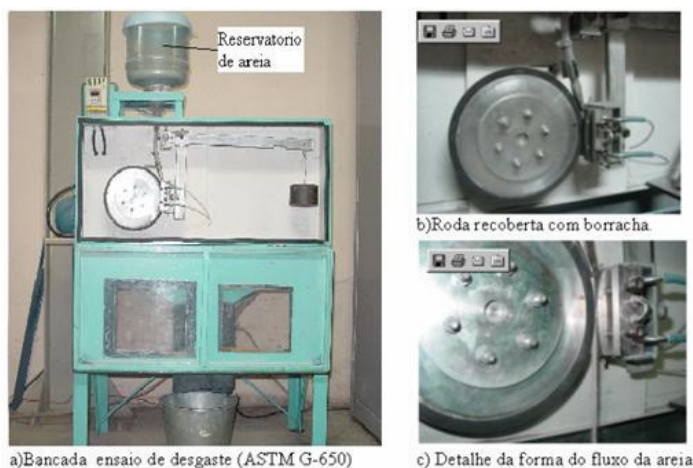


Figura 27. a) Vista geral do equipamento, b) Detalhe do suporte do corpo de prova e o braço de aplicação da carga. c) Suporte porta corpo com o sistema de refrigeração do corpo de prova.

- Desgaste irregular da borracha. Deve-se ter uma dureza Shore, ao redor de 7. Além disso, deve haver paralelismo entre a superfície da borracha e o corpo de prova. Isto é verificado

fazendo-se o ensaio da grafite, que consiste em “pintar” uma parte da borracha, na superfície de desgaste, com grafite em pó e logo, num corpo de prova devidamente retificado coberto por um papel branco, fazer coincidir a superfície “pintada” com o corpo de prova, nesse momento aplicar a carga e girar a roda da borracha um ângulo pequeno, só para assegurar o atrito entre a borracha pintada e o papel. A figura 28 mostra as folhas “pintadas” com grafite, e alguns comentários ao respeito.

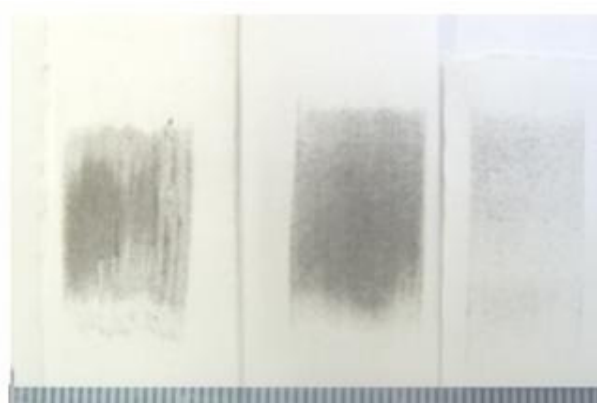


Figura 28. Ensaio da grafite. Folha esquerda errada na parte superior e inferior, folha do meio boa na parte superior e errada na parte inferior, folha da direita, boa na parte superior e inferior.

- Aquecimento da borracha. Com o atrito contínuo, gera-se calor tanto no corpo de prova quanto na borracha. Se isto acontecer, alteram-se as propriedades da borracha pelo que é muito importante assegurar um fluxo contínuo de água, para manter constante a temperatura. Na figura 27 b) podem-se observar as mangueiras do sistema de resfriamento do corpo de prova.
- Excentricidade da borracha. Se o desgaste da borracha for irregular, vibração acontece introduzindo erros no ensaio. Se isto acontecer, o ensaio deve ser interrompido, para retificar a borracha e continuar até atingir o número de ciclos definido.
- Variação do fluxo da areia fora dos valores permitidos. A troca constante do nível de areia no reservatório modifica o fluxo da areia pelo que ao início e ao final de cada ensaio deve se controlar o fluxo da areia.
- Modificação da forma do fluxo de areia. Este fluxo deve parecer uma fita que cobre a borracha até os limites laterais desta. Qualquer irregularidade neste sentido faz com que nem toda a areia passe entre a borracha e o corpo de prova. Isto pode acontecer se a umidade no fluxo d e areia superar 1,5% ou areia não for limpa. A figura 27 c) mostra a “fita” de areia caindo corretamente.

Efetuo-se previamente calibração do equipamento obtendo-se as porcentagens do coeficiente de variação de 3,2% no procedimento B (Max proposto pela norma 3,5%) e 8,5 % (Maximo admissível 19,1%) no caso C. Dado que as camadas contêm poros em forma aleatória, não é possível determinar uma densidade padrão. Por este fato, os resultados ficam em perda de peso e não em volume como indicado pela norma (Kreye et al.,1994; Freire,2002).

4.7. Ensaio de Aderência.

Para análise quantitativo é utilizado o teste proposto pela norma ASTM C-633/79 para verificação por tração em laboratório.

O método para arrancamento de revestimento consiste em aplicar uma camada do material a ensaiar num pino preparado como indicado em 4.4.3.3. Este “corpo de tração” e tracionado por uma máquina de tração, neste caso foram utilizada uma prensa hidráulica VEB de 300 kN (30 ton). O limite da carga máxima a aplicar foi de 50 kN. Na Figura 29 observa-se a prensa e os dispositivos que asseguram aos corpos de prova ficar num mesmo eixo.



Figura 29. a) Prensa com o corpo de prova. b) Detalhe das garras com o dispositivo para manter as duas partes do “corpo de tração” num mesmo eixo. c) “Corpo de tração” pronto para o ensaio de tração.

Uma vez ensaiados até produzir o destacamento, os corpos de prova estes podem apresentar diferentes tipos e magnitudes de falhas. Para um tratamento ordenado dos resultados e baseado na literatura (Cortes, 2001; Camello e Trevisan, 20002), criou-se a seguinte classificação das falhas:

- Falha tipo I: Destaque na interfase adesivo – camada, figura 30. Repetir ensaio.

- Falha tipo II: Falha dentro do revestimento, figura 31. Ensaio de força coesiva.
- Falha tipo III: Falha na interface revestimento/substrato, figura 32. (ensaio de força adesiva)

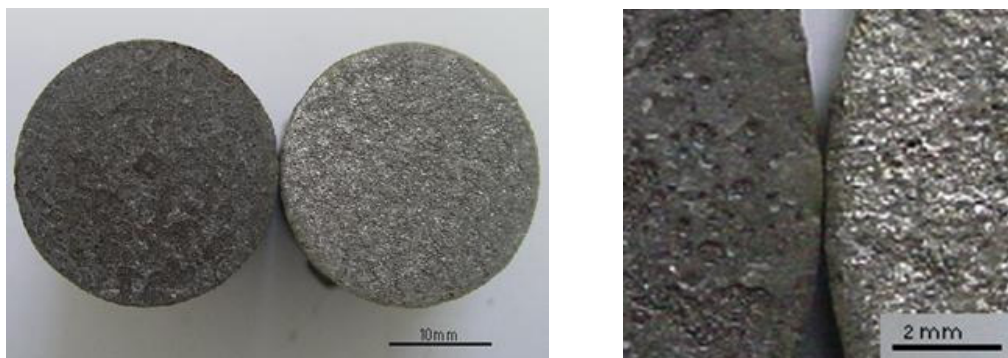


Figura 30. Falha tipo I, falha no adesivo, a peça da cor mais obscura tem a cola e a cor mais clara tem a camada.



Figura 31 Falha tipo II, por coesão. A decoesão se gera na interface camada/camada

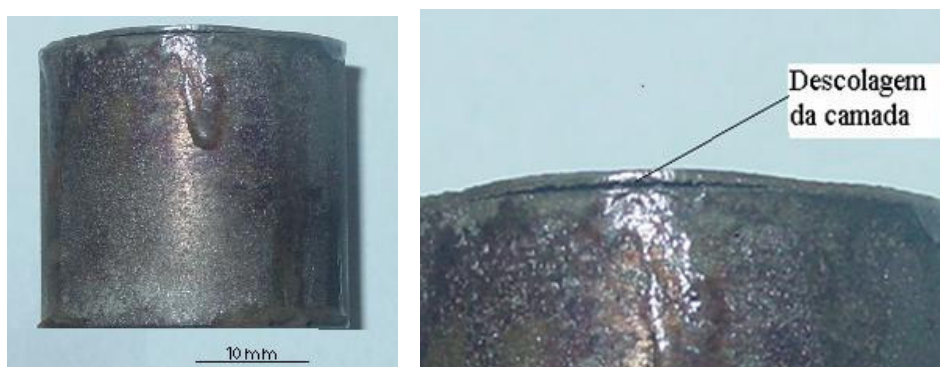


Figura 32. Falha tipo II e III a descolagem acontece dentro da camada e na interface revestimento / substrato.

4.8. Observação via microscopia ótica.

Procedimento indicado pela Norma ASTM E 1920-03 Guia para a preparação metalográfica de recobrimentos aplicados por aspersão térmica. - Corpos de prova lixados a mão com lixas de carbonetos de silício para lixamento em água. Para desbaste, tamanho de grão 100, semiacabamento 180, 220; acabamento 500, 600 e 1200.

Polimento com alumina $4\mu\text{m}$ sem ataque para observar partículas em relevo e polimento final com diamantes policristalinos em suspensão de $6\mu\text{m}$ durante 3 minutos, sem ataque.

Equipamento: Microscópio refletivo Olympus BX60M com câmera digital.

4.9. Porosidade

Procedimento indicado pela norma ASTM 562 que considera N-1 graus de liberdade e um 95% de nível de confiança. Este procedimento considera, para um aumento no microscópio de 100 vezes, uma rede de 100 pontos (figura 33). Os poros que coincidem com os pontos, indicam um 1% de porosidade e aqueles que são tangentes 0,5%. Neste caso, como o produto aspergido tem partículas duras, durante o processo de lixamento e polimento, algumas destas são arrancadas, ficando a cavidade de forma angular irregular. Assim, para distinguir as cavidades da porosidade há que levar em conta que tem uma geometria circular ou oval.

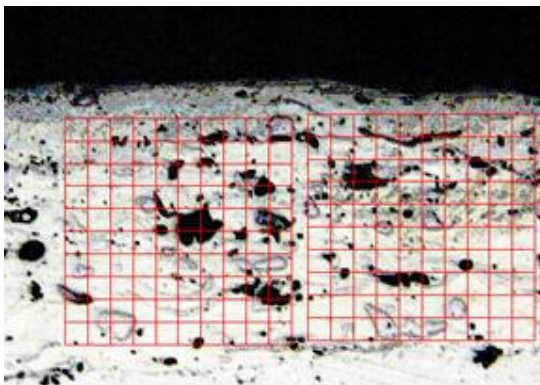


Figura 33. Rede usada para determinar a percentagem de porosidade. As manchas pretas circulares correspondem a poros e as irregulares a carbonetos arrancados.

4.10. Ensaio de riscamento.

Utilizou-se o esclerómetro retilíneo desenvolvido no LabMat/EMC da UFSC (Figura 34). Aplicou-se uma carga de 10 N com um percurso de 10 mm sobre o corpo de prova polido para observação microscópica. O equipamento consta de duas células de carga, uma vertical e outra paralela à superfície a riscar com sensores e um software que registra as cargas durante o deslocamento e simultaneamente gera as curvas das duas cargas. O indentador corresponde a um cone de diamante com ângulo de 120° usado para medir dureza Rocwell (Callister, 1997).

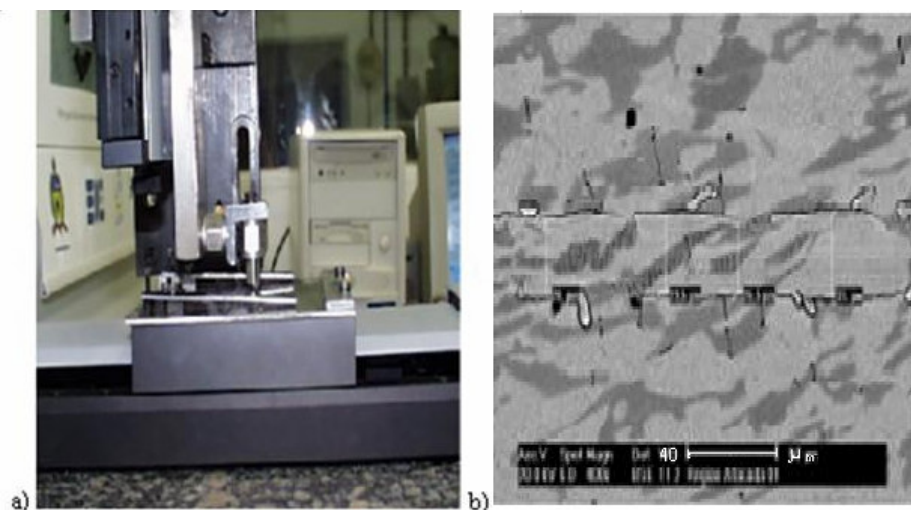


Figura 34. a)Foto do esclerômetro retilíneo. b) Detalhe de risco de uma liga com duas fases (Sousa et al., 2004).

4.11. Microscopia Eletrônica de Varredura. MEV.

Para análises detalhadas da microestrutura usou-se um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) marca Philips, modelo XL-30. O MEV é usado para as seguintes caracterizações: tipo e distribuição das fases, transformações de fase que aconteceram durante o processamento, topografia de superfície e morfologia de pós e camadas. Usando o detector “back scattering electron”, elementos e fases com composições diferentes podem ser distinguidos devido às diferentes densidades e números atômicos. Através do detector “back scattering electron” elementos de várias fases puderam ser diferenciados, observou-se a topografia dos riscos (largura e porosidade), e foi realizada uma microscopia paralela e perpendicular à camada.

Os corpos de prova analisados no MEV foram selecionados considerando o melhor desempenho em desgaste, dureza, aderência, porosidade e riscamento, além de corpos de prova de melhor desempenho riscados pelo procedimento de riscamento lineal, preparados por Freire(2000) com o intuito de comparar os resultados. Antes do ensaio, os corpos de prova foram lavados em álcool e ultra-som durante 5 minutos e secados com ar morno durante 5 minutos.

4.12. Ensaio de Polarização Potenciodinâmico.

Ensaio realizado no laboratório de corrosão no Departamento de Química da UFSC, utilizando-se um potenciostato Gummy Instrument Framework com eletrodo de referencia de calomelano saturado calibrado para o equipamento ANATION F 7013 (Figura 35). O eletrólito foi uma solução com concentração de 0,5 molares de NaCl (29,25 g/L).

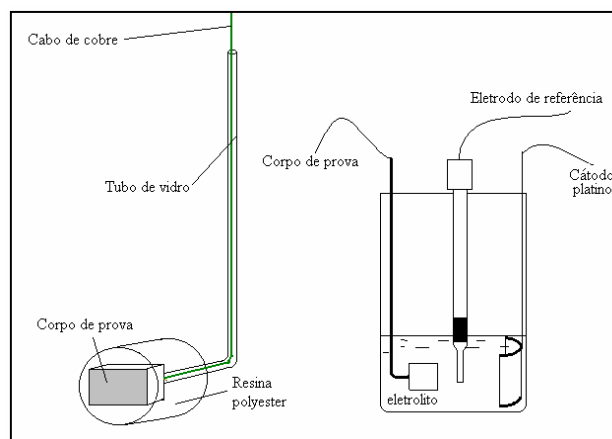


Figura 35. Preparação e montagem do corpo de prova.

CAPITULO 5

RESULTADOS

Pela quantidade de resultados obtidos, foi decidido organizar um apêndice com o nome de “Dados”, e a forma como os dados foram organizados é mostrada na caracterização e num exemplo.

5.1 Caracterização

Para cada material são apresentadas:

- Micrografias.
- Dureza: medida na superfície do revestimento e na seção transversal.
- Desgaste: perda de massa e registro fotográfico da superfície ensaiada.
- Adesão: segundo classificação estabelecida em 4.7.
- Porosidade.
- Riscamento: Foto-micrografia e identificação dos riscos segundo 3.6.
- Resistência à corrosão: Curvas de polarização Potenciodinâmica (só dos materiais que apresentaram melhor desempenho, conforme os resultados anteriores).
- Microscopia Eletrônica de Varredura: Foto-micrografia, morfologia e composição (só dos revestimentos de melhor desempenho).

5.2. Exemplo

5.2.1 Arame: 1AS760A; **Parâmetros:** Pressão do ar :5 bar

Tensão : 28 V

Corrente : 200 A

Pré-aquecimento: No

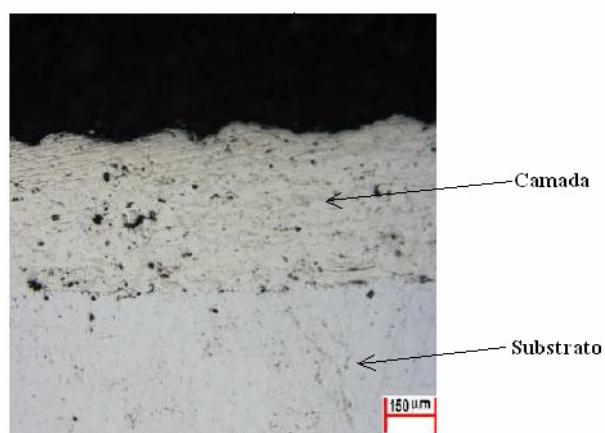


Figura 36. Vista transversal da ligação da camada com o substrato. Pode-se observar na interfase camada –substrato a região de ligação com boa aderência.

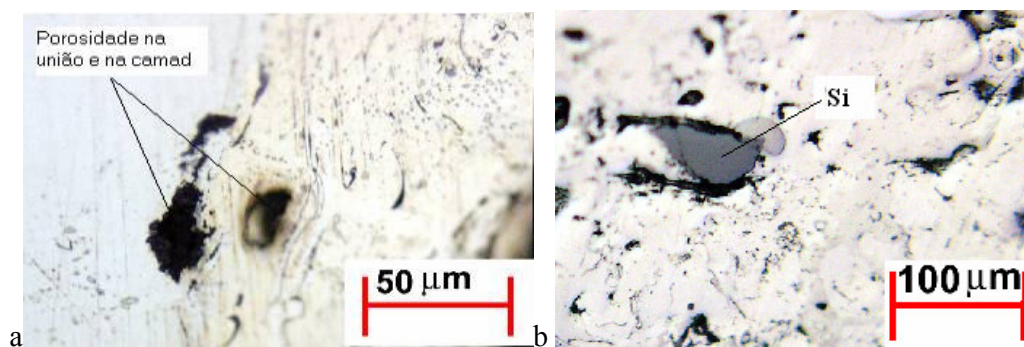


Figura 37a. Vista transversal à camada, observa-se uma imperfeição na interfase camada – substrato e b, perpendicular à camada onde se encontrou uma partícula de Si com estrutura frágil (confirmado posteriormente pelo MEV).

5.2.2 Dureza:

	Media	Desvio	Dispersão
	HV _{0,3}	padrão	%
Transversal à camada	: 370	46	12,4
Perpendicular à camada : Matriz	: 3045	45,4	8,8
Partículas duras:	2671	128	47,7

5.2.3. Ensaio de desgaste:

Perda de massa: ASTM G65 procedimento C, 30 s:	0,08 g.
Procedimento B, 10 minutos	: 0,984 g
Espessura da camada	: 523 µm

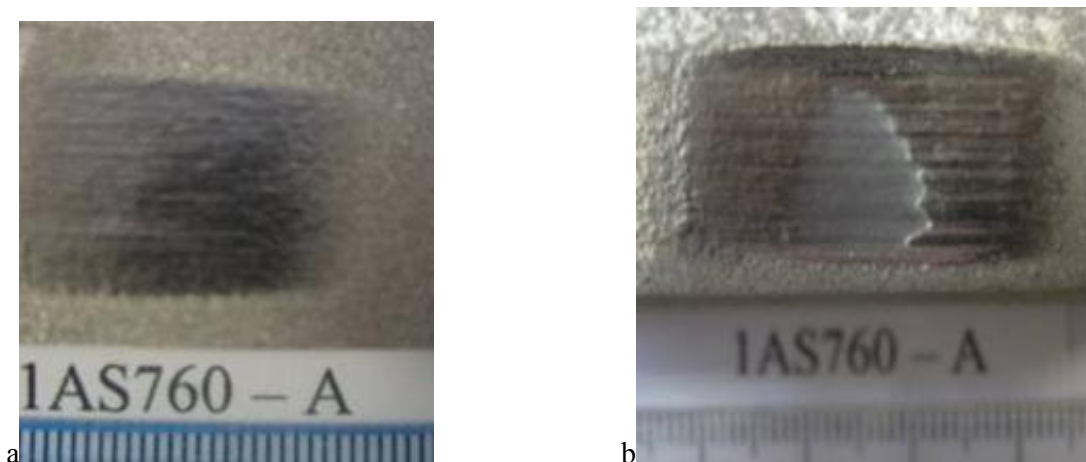


Figura 38a. Procedimento c (30 segundos) a camada só foi desgastada em tanto que na figura 38b, procedimento B (10 min) observa-se que o desgaste atingiu ao substrato.

5.2.4 Ensaio de tração

Média	: 44,93 MPa
Desvio padrão	: 3,76
Coef. de variação	: 8,37%
Falha	: Tipo I e III

5.2.5 Porosidade

Média	: 3,3%
Desvio padrão	: 0,6
Coef. de variação	: 17,3%

5.2.6. Riscamento

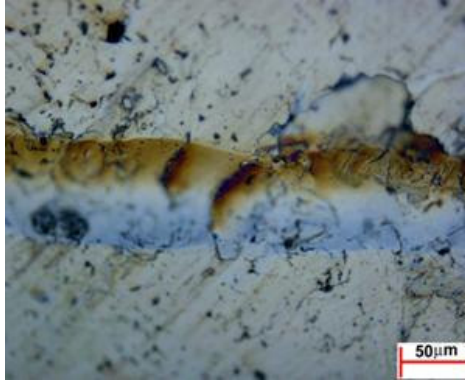


Figura 39. O risco é do tipo micro sulcamento, o indentador só provocou deformação plástica sem desprendimento de revestimento, identificado como micro-sulcamento.

CAPITULO 6

DISCUSSÃO E ANÁLISES DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos foram agrupados para comparação ou representados em gráficos com o intuito de destacar os distintos comportamentos ao relacioná-los entre si e com dados obtidos na revisão bibliográfica.

6.1 Resistência à aderência.

Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 9 e no gráfico 40 onde pode se observar o alto nível da aderência, acima dos valores indicados na tabela 1 para o processo ASP. Observe-se que a menor aderência é melhorada com pré-aquecimento e que o tipo de falha mostra o alto nível de aderência do revestimento ao substrato e coesão da camada.

Tabela 9. Resistência à aderência e coesão..

Material	1AS760	2AS761	3AS751	4AS751 (Pré-aquecido a 150°C)	AS761 Verificação
Média (MPa)	44,9	44,9	41,6	59,7	52,2
Desvio Padrão	3,8	4,5	2,0	7,5	1,4
% de Variação	8,4	10,1	4,9	12,6	2,7
Falho Tipo	I e II	II	II	I	II e III

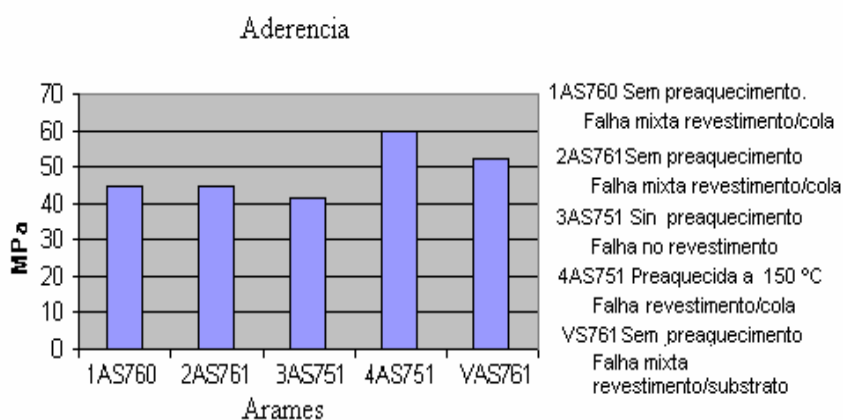


Figura 40, Representação da resistência à tração obtida.

No caso da camada aspergida com o 4AS751, falhou no adesivo, isto significa que nesta camada, a aderência e a coesão são maiores (aconteceu com as três réplicas).

O pré-aquecimento moderado melhora consideravelmente a ancoragem dos revestimentos, como indicado na figura 40. Isto acontece em menor grau diminuindo a pressão do ar primário e a da corrente. Estes resultados superam os valores indicados na

tabela 1 e coincidem com os valores indicados por Camello e Trevisan (2002) para metais ferrosos, não dispondo se de dados em relação à aspersão de carbonetos com o processo ASP.

6.2 Dureza.

No processo de medição da dureza, percebeu-se a existência de uma matriz mais macia e partículas duras de diferentes morfologias e tamanhos, algumas suficientemente grandes para permitir dir a dureza em particular. Não encontrando informação na literatura e para respaldar os resultados do ensaio de desgaste mediram-se as durezas em forma separada. A tabela 10 mostra os resultados das medições de dureza das quais calculou-se a média de 10 valores (95% de confiança) visando manter a porcentagem de variação dentro do 15% para a matriz, o que não é aplicado às partículas duras.

Tabela 10. Resumo dos resultados das micro-durezas baseado em dez medições.

Corpo de Prova.	Nome	Média HV _(0,3)	Desvio Padrão	Coef.de variação %
1AS760A	Matriz	504	44,7	8,9
	Partic. duras	2671	1274,5	47,7
1AS760B Preaquecido a 170°C	Matriz	486	57,3	11,8
	Partic. duras	3348	2553,7	76,5
2AS761A	Matriz	524	59,7	11,4
	Partic. duras	2178	535,4	24,6
2AS761B Preaquecido a 150°C	Matriz	538	70,6	13,1
	Partic. duras	2234	854,7	38,2
3AS751A	Matriz	434	41,5	9,6
	Partic. duras	2158	33,9	15,4
3AS751 B Preaquecido a 150°C	Matriz	388	49,3	12,7
	Partic. duras	1866	322,6	17,3
4AS751A	Matriz	590	84,1	14,3
	Partic. duras	2109	807,7	38,3
4AS751B Preaquecido a 200°C	Matriz	554	72,5	13,1
	Partic. duras	2556	1010,7	39,6
5AS751B Preaquecido a 250°C	Matriz	401	60,2	15,0
	Partic. duras	1922	340,8	17,7
VAS761(Verificação)	Matriz	678	99,3	14,7
	Partic. Duras	2984	1430,0	47,9

A figura 41 permite observar que os valores da dureza da matriz ficam na faixa dos 450 a 600 HV_{0,3}, obtendo-se a maior dureza ao diminuir a pressão do ar primário e pré aquecer a 200°C. O valor médio das durezas das partículas duras tem um uma dispersão (coeficiente de variação) muito alta devido à existência de diferentes fases presentes, que tem durezas diferentes, como indicado na tabela 6. As partículas duras que atingiram a maior dureza, pela morfologia que apresentavam, foram identificados como sendo WC/W₂C, sendo

os maiores valores foram obtidos em partículas não fundidas, o que é coerente com o indicado pela literatura, que indica que o ciclo térmico não degrada a os carbonetos. (Wilden and Wnak, 1999)

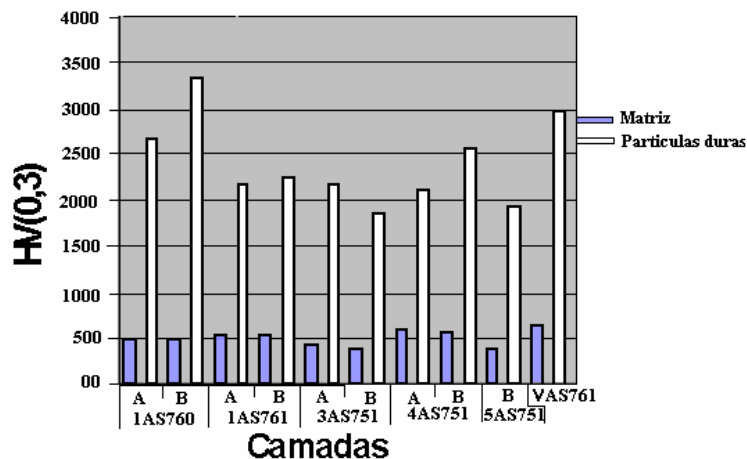


Figura41. Dureza das camadas e partículas duras.

Neste caso, como indicado na figura 41, a maior dureza da matriz foi obtida no corpo de prova de verificação (VAS761) levemente maior à fornecida pelo fabricante, indicado na tabela 5, pagina 17 (Durmat, 2004). Dos corpos de prova iniciais, a maior dureza na matriz aconteceu no material 4AS751, dentro da faixa indicada pelo fabricante. No caso das partículas duras, a maior dureza é no material 1AS760B, aquele que foi pré-aquecido e o resultado está influenciado pela presença de boro e carbono, que provavelmente geram carbonetos B_4C com durezas de até 4000 HV e pela presença de Si que forma composta do tipo SiC com durezas inferiores a 4000HV, segundo a tabela 6. Os coeficientes de variação indicam a ampla faixa de espalhamento destas durezas. O MEV entrega micrografias onde as partículas mais duras, de maior densidade, apresentam uma coloração mais branca, sendo de um alto conteúdo de W, e os tons cinza a preto são estruturas mais macias até o Ni que é a cor mais perto de preto.

A maioria das estruturas é de cor cinza claro, (figura 42 a e b) o que indica estruturas de alta densidade, e duras, o que é coerente com os resultados indicados na figura 43. Alias, em tanto quando diminui o teor de Ni e aumentam os teores de V e Cr a estrutura é menos densa, menos dura. As durezas das partículas duras não foram consideradas por Freire (2002), dado que as partículas nas camadas não superam as $5\mu m$ e são mais abundantes. Isto faz que a dureza seja só um fato referencial mas não comparável.

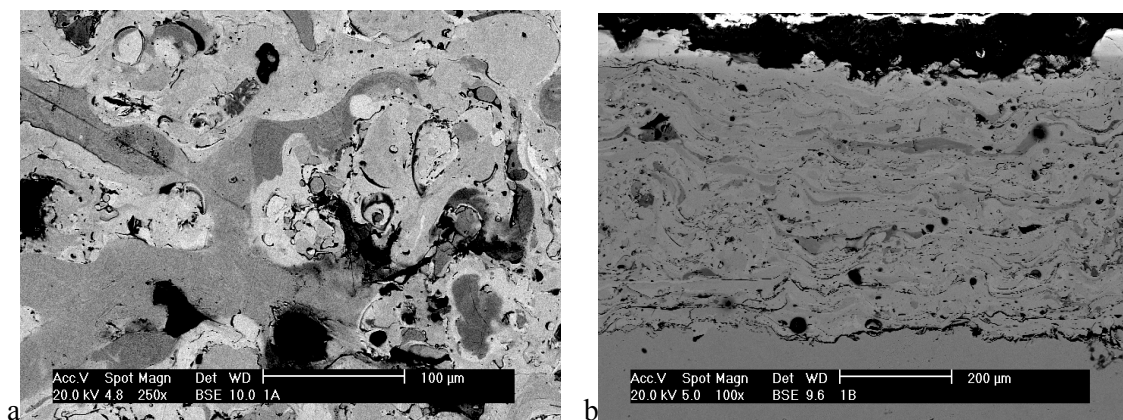


Figura: 42. Micrografia no MEV. a) Vista perpendicular à camada do AS760A, podem se observar a distintas escalas de cinza dos diferentes elementos que as compõem. b) Vista paralela à camada 1AS760B, os tons de indicam uma grande quantidade de estruturas de alta densidade.

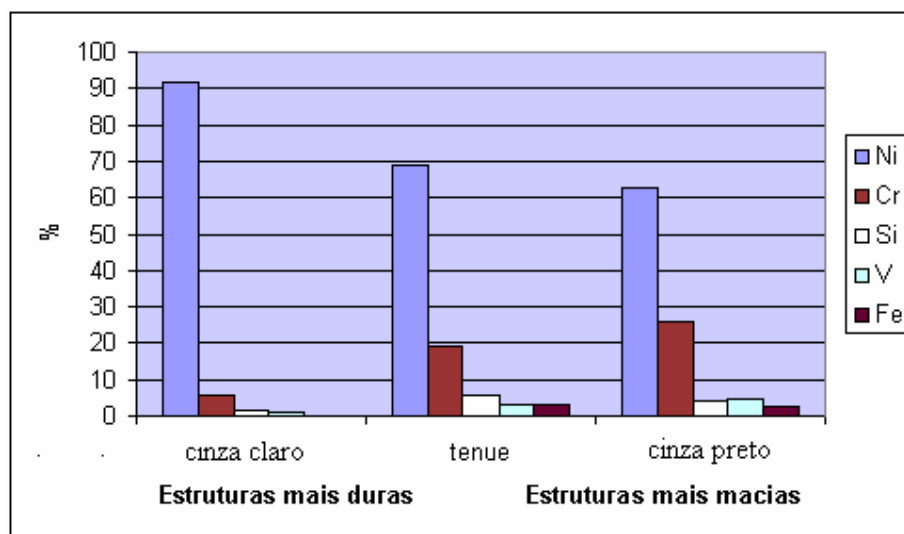


Figura 43. Relação entre a densidade das estruturas e a composição quantitativa do material 1AS760B.

6.3 Desgaste abrasivo:

Os resultados deste ensaio indicam que a menor perda de massa aconteceu no corpo de prova de verificação, mas como é importante a correlação com outros resultados, apresenta-se na tabela 11 e para maior aprofundamento da discussão, adicionaram-se os parâmetros de aspersão. Na tabela 11, a azul apresentou-se os melhores dados em quanto à dureza e perda de massa, da cor verde os que ficaram em segundo lugar, desta forma se pode indicar que:

- O corpo de prova de verificação está entre os melhores resultados, o que confirma o estabelecido por Wilden and Wank (1999) que menores pressões do ar primário, permite uma maior “maleabilidade” das partículas duras porém, melhor ancoragem.

- As durezas obtidas na matriz são menor em todos os caso indicada pelo fabricante do arame exceto no caso do 4AS751A e de Verificação(AS761). Estes resultados sugerem que a diminuição da pressão do ar primário contribui a obter camadas mais duras.
- Os arames com FTC tem maior resistência ao desgaste apesar de não ter as partículas mais duras o que confirma que não existe correlação entre dureza e resistência ao desgaste (Gitzhofer e Boulous, 1995).

No caso do procedimento C, figura 44, para os corpos de prova aspergidos inicialmente, a maior perda de massa aconteceu no 3AS751B e a menor em 2AS761B, mais constato se que o corpo de prova de verificação foi ainda menor. Neste procedimento as diferencias de perda de material são tam pequenas que e aventurado concluir com esses dados, embora o de maior perda de massa é também um dos de maior perda no procedimento B e é o de menor dureza (Tabela 10).

Tabela 11. Perda de massa segundo procedimento B(10 min) e C(30 seg) da norma ASTM G65-01, dureza e parâmetros utilizados. F= atingiu ao substrato, p.d.= partículas duras

Material	Tensão (V)	Corrente (A)	Pressão Do ar (bar)	Preaq. (°C)	Dureza Matriz-p.d. (HV _{0,3})	Dureza Fabricante (HV)	Perda de massa C (mg)	Perda de massa B (mg)	Espessura da camada (µm)
1AS760A	28	200	5,0		504-2671	720-1000	0,0800	0,9840	523
1AS760B	28	200	5,0	170	486-3370	720-1000	0,0817	0,856F	480
2AS761A	33	200	5,0		524-2177	650-2053	0,0850	0,7990	613
2AS761B	33	200	5,0	150	538-2235	650-2053	0,0810	0,5890	677
3AS751A	33	200	5,0		434-2158	560- 640	0,0810	1,634F	365
3AS751B	33	200	5,0	150	388-1866	560- 640	0,1150	1,409F	458
4AS751A	33	200	2,7		589-2108	560- 640	0,0970	1,1090	619
4AS751B	33	200	2,7	200	554-2555	560- 640	0,0855	0,8500	763
5AS751B	33	200	2,7	250	400-1922	560- 640	0,0830	1,0600	759
Verificação (AS761)	30	180	2,5		678-2984	650-2053	0,0710	0,6270	303

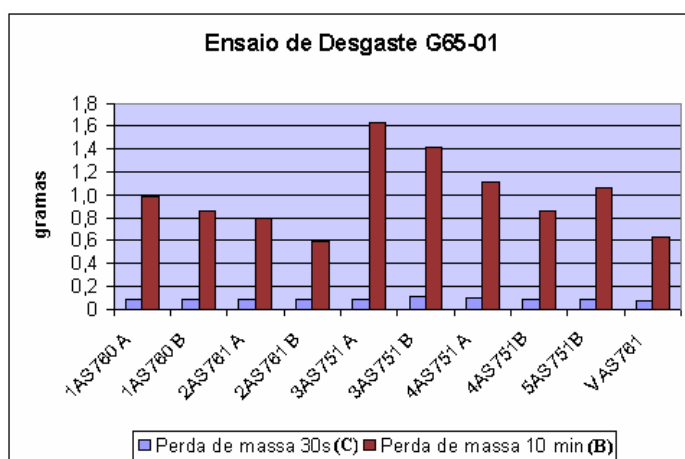


Figura 44. Comparando os procedimentos B e C na perda de massa.

Os de melhor desempenho no procedimento B dos corpos de prova iniciais foi 2AS761B (Figura 45a) e no procedimento C foi em 2AS761A (Figura 45b). O corpo de prova de verificação, sendo do mesmo arame, atinge um desempenho perto do 2AS761B indicando que a estrutura lamelar obtida com esses novos parâmetros consegue-se obter fases mais duras e bem aderidas, possíveis de melhorar a resistência ao desgaste quando depositadas com pré-aquecimento.

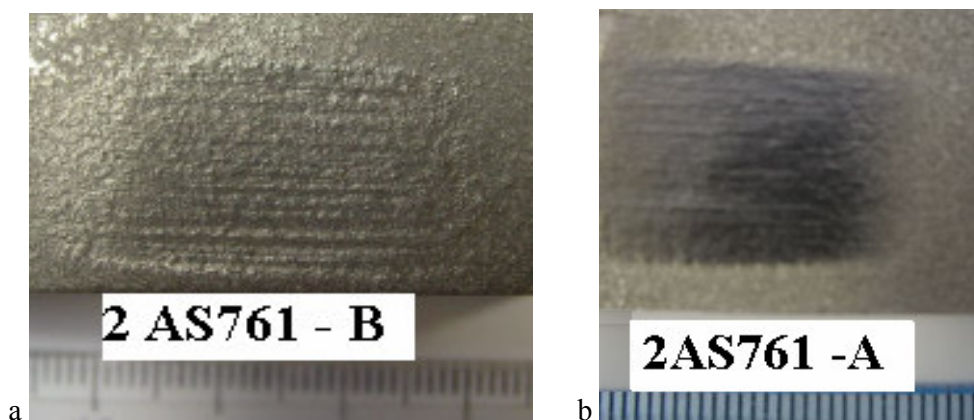


Figura 45a. Ensaio de desgaste procedimento C e figura 42b, procedimento B

Comparando a superfície da figura 45 com as da figura 10 da página 16 pode-se comentar que a diferença de morfologia dos riscos (região desgastada) seria atribuída, na figura 45a, à presença de uma maior quantidade de partículas duras (perto do 40%) que se opõem ao desgaste e ficam aderidas à matriz. Estas partículas podem ser WC/W₂C, Carbonetos de Cromo, silicatos e boretos. Esta grande variedade de partículas duras, como era esperado, deu como resultado um coeficiente de variação da dureza de 38,3% (Tabela 10).

As micrografias no MEV permitem observar a morfologia das partículas duras de WC/W₂C. Na figura 46a e b observa-se as regiões brancas que correspondem a estruturas mais densas. Estas atingem no estado semifundido ou pastoso o substrato e por isso têm tanto formas equiaxiais quanto lamelares, claramente visíveis na figura 46b. Isto significa que os carbonetos fundidos, ou parte deles, podem-se diluir formando compostos mais macios (Welding H. vol. 4, 1998) e os de morfologia equiaxial são carbonetos fundidos ou quase fundidos e solidificados no trajeto pistola-substrato, que geram a superfície desgastada da figura 45a.

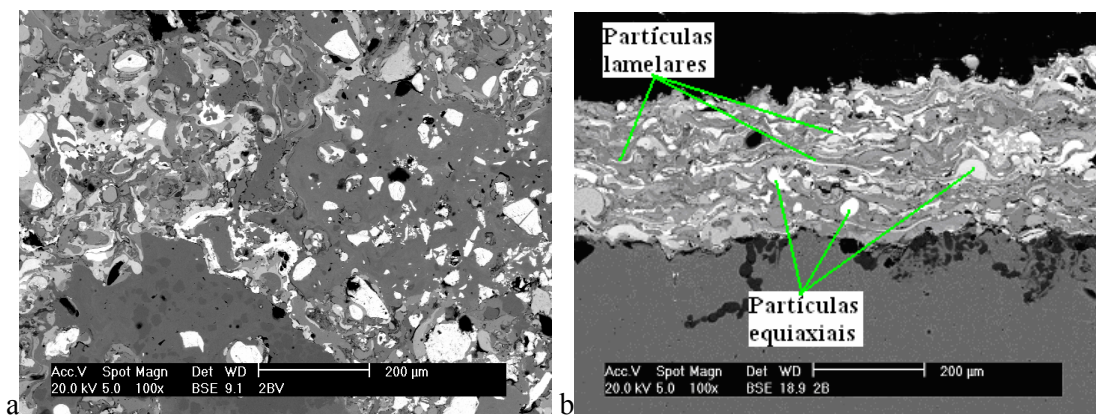


Figura 46a. Vista perpendicular do 2AS761B as partículas brancas correspondem aos WC/W₂C. Na figura 43b vista transversal à camada verifica se a existência de partículas com morfologia equiaxial e morfologia lamelar.

A figura 47, do mesmo material, observada no microscópio óptico, permite identificar estas estruturas tanto de formas equiaxiais quanto lamelares. Os carbonetos equiaxiais têm a forma característica daqueles parcialmente dissolvidos indicados pela literatura (Welding H. vol. 4, 1998).

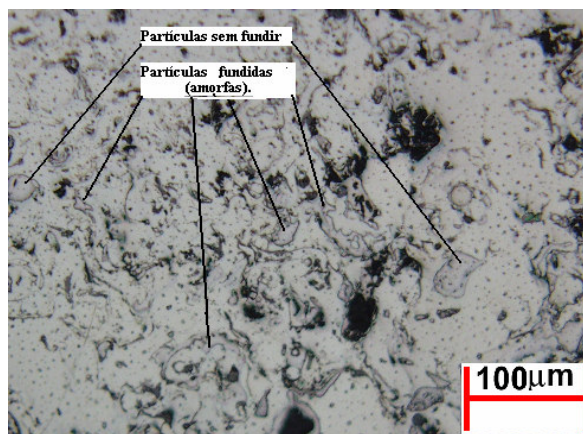


Figura 47. Estruturas de WC/W₂C fundidas de formas amorfas abundantes e poucos equiaxiais.

Comparando as perdas de massa do processo ASP (figura 48a) com o material aspergido pelo processo HVOF (Freire, 2002) (figura 48b), pode se indicar que só a liga T4 (liga autofluxante) é a que tem valores perto dos valores obtidos pelo processo ao arc, sendo estes últimos consideravelmente maiores, devido à maior quantidade de partículas duras de maior tamanho e baixa energia cinética usada para aspergir, quando comparado com o processo HVOF.

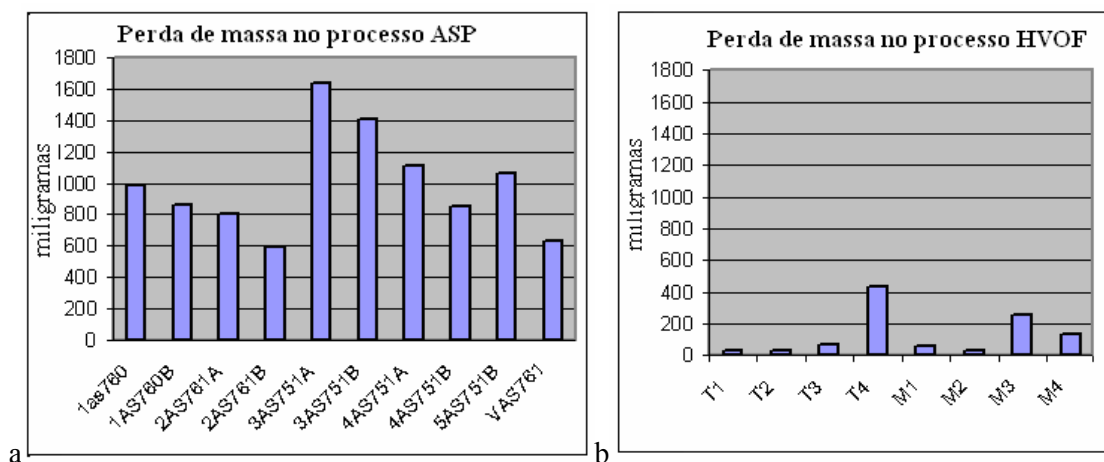


Figura 48. Mostra a grande diferença de perda de massa, em mg, que existe entre as ligas autofluxantes aspergidas pelo processo ASP e os Cermets aspergidos com HVOF.

6.4 Porosidade

A porosidade representa o risco de existir uma passagem para o contato do meio ambiente com o substrato, pelo que é importante não só verificar a sua percentagem, mas deve se observar a distribuição e cercania entre os poros. No caso da figura 49, pode se identificar vazios alongados paralelos à camada. Estes vazios podem ser: poros grosseiros, gerados pelo arrancamento do material durante o lixamento ou a existência de “óxidos frágeis” gerados no processo que, no caso de serem preenchidos com líquidos ativos, podem se transformar num conduto que inicie a corrosão no substrato. Nem sempre existem esses vazios, o que só é mostrado como antecedente ilustrativo para levar em conta e não limitar a medição apenas à contagem dos poros. No processo de contagem de poros é importante saber distinguir quando o vazio se gera durante a preparação do corpo de prova, porque é o único tipo de “poro” que não deve se contar. Estes têm forma irregular equiaxial e, como no caso do SiO_2 ficam resíduos pela fragilidade da partícula.

Na tabela 12, pode-se ver os resultados das medições das porosidades. A tabela 5, na página 17, indica que nos materiais 1AS760 A-B, 3AS751 A-B, 4AS751A-B e 5AS751B esperava-se uma porosidade inferior a 3% o que só aconteceu no 3AS751A-B. Os coeficientes de variação do 3AS751A; 3AS751B; 4AS751B; 5AS751B EVA761, indicam que as medições são muito dispersas (5 replicas para cada caso), isto, provavelmente, devido à grande variedade de partículas duras e a sua instabilidade a permanecerem aderidas durante o lixamento ou a ausência de Cr como componente químico.

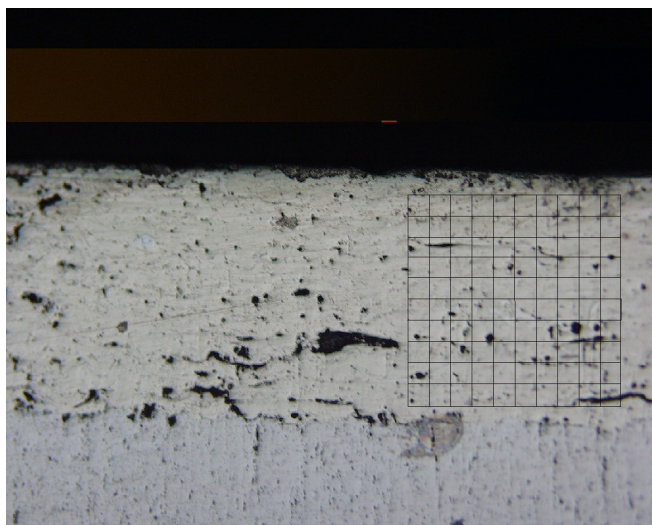


Figura 49. Material 1AS760B. As manchas pretas alongadas podem apresentar condições favoráveis para o início da corrosão sim conectarem entre elas. A maior porosidade está perto do substrato, confirmando o efeito do pré-aquecimento na camada, com menor porosidade na parte aquecida pela aspersão, na parte superior da figura.

Observa se que o material 2AS761 A-B que é o mesmo de verificação só que com parâmetros diferentes tem uma porosidade indicada pelo fabricante de um 5%, mas nos resultados dos corpos de prova iniciais já é menor e no corpo de prova de verificação é de 0,9% apresentando a menor porosidade do conjunto.

Tabela 12 Medição da porosidade segundo ASTM E 562 (% em área)

Medidas/C.de P.	1AS760A	1AS760B	2AS761A	2AS761B	3AS751A	3AS751B	4AS751A	4AS751B	5AS751B	VAS761
	4,5	4	4,5	3,5	3,5	2	5	4	3	1
	4	3,5	4,5	4	2,5	3,5	7	3,5	4	1
	4	4	4	4	2,5	2	3,5	4	4	1
	4	3	4	4	2,5	2	5,5	3,5	2,5	1
	4,5	4	4,5	4	2,5	2	7	4	4	0,5
Média(%)	4,2	3,7	4,3	3,9	2,7	2,3	5,6	3,8	3,5	0,9
Desvio Padrão	0,25	0,45	0,274	0,22	0,45	0,67	1,44	0,27	0,71	0,22
Dispersão (%)	5,952	12,1	6,369	5,73	16,6	29,2	25,8	7,21	20,2	24,8

A figura 50 permite destacar que em todos os casos em que o pré-aquecimento foi utilizado, a porosidade diminui o que é constatado mais claramente nos materiais 4AS751A (sem preaquecer) 4AS751B (com pré-aquecimento a 200°C) e 5AS751B (preaquecido a 250°C) onde a porosidade diminui enquanto a temperatura de pré-aquecimento aumenta.

O cambio de parâmetros para evitar a dissolução excessiva dos carbonetos, ou seja: diminuição da corrente e da pressão de ar primário e não preaquecer permite melhorar este resultado consideravelmente para valores que asseguram a inexistência de falhas vermiculares.

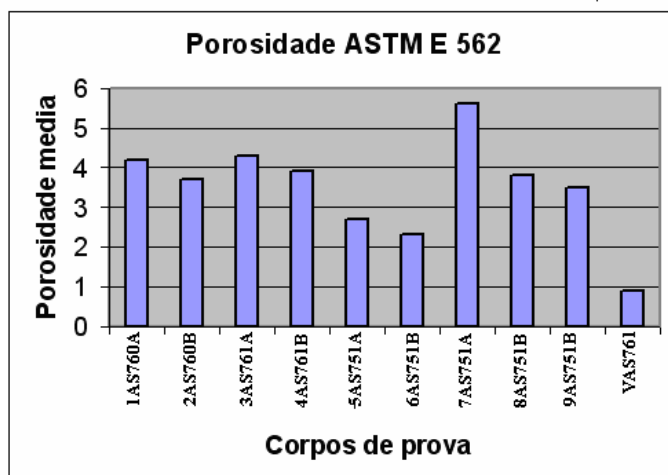


Figura 50. A menor porosidade é apresentada no corpo de prova de verificação, correspondendo ao material AS761, sem pré-aquecimento e com menor pressão de ar primário.

A figura 51, obtida mediante MEV, permite identificar com maior clareza os poros do material de verificação (AS761), que neste caso são representados pelos pontos pretos. Conforme a análise anterior, é possível diminuir ainda mais essa porosidade, usando o pré-aquecimento.

Considerando que a porosidade é a característica da camada que pode afetar de forma importante o início do processo corrosivo, a partir desses dados, selecionaram-se corpos de prova com o intuito de fazer um ensaio eletroquímico - potenciodinâmico para observar o comportamento ativo ou passivo das camadas na presença de meios corrosivos, como é o caso da água do mar. É assim que foram submetidos a este ensaio os corpos de prova com maior e menor porosidade do material aspergido originalmente, assim como o de verificação e outros que permitam ter um resultado representativo de todos os materiais.

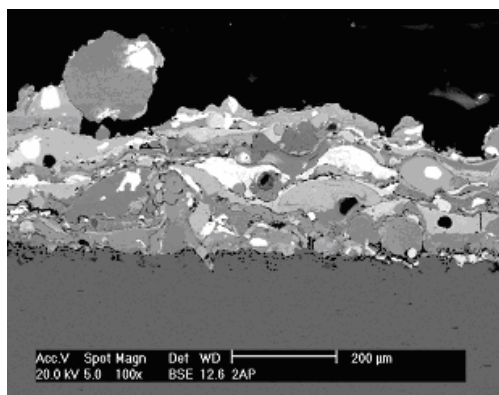


Figura 51. Fotomicrografia no MEV que permite verificar a pequena quantidade de poros presentes no corpo de prova de verificação.

6.5. Ensaio de Polarização Potenciodinâmico.

Foram submetidas a este ensaio: as camadas aspergidas com maior e menor porosidade: 4AS751A (figura 52a) e Verificação AS761 (figuras 52b), o corpo de prova de melhor desempenho ao desgaste: 2AS761B (figura 53a), e o de maior aderência: 5AS751B, (figura 53b).

Além dos anteriores e com o intuito de comparar com os resultados obtidos por Freire (2002), foram ensaiados corpo de prova contendo WC-10Co-4Cr aspergido com HVOF Pistola JP 5000 Tafa (figura 54a) e corpo de prova do mesmo material, aspergido com HVOF Pistola DJ 2700 Sultzer Metco (figura 54b), definidos como de bom desempenho pelo pesquisador.

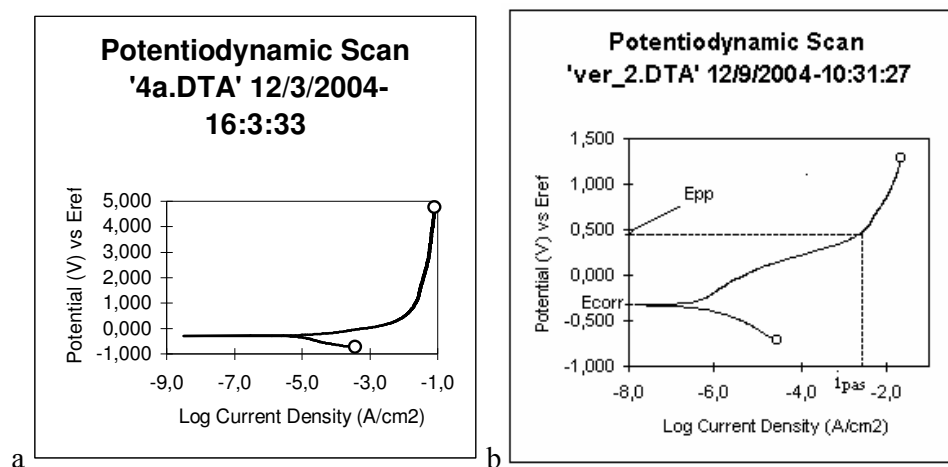


Figura 52a Material 4AS761A, o de maior porosidade e 52b material de verificação (AS761) de menor porosidade.

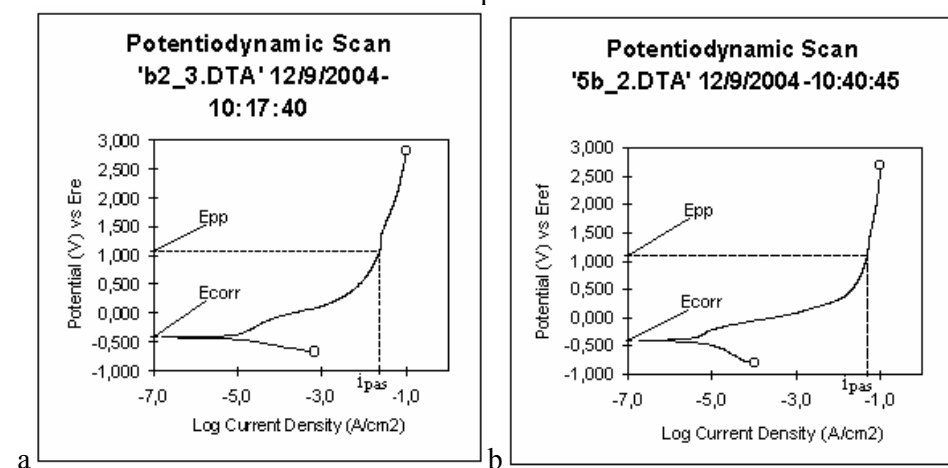


Figura 53a Material 2AS761B menor perda de material por desgastes e 53b material 5AS751B maior aderência.

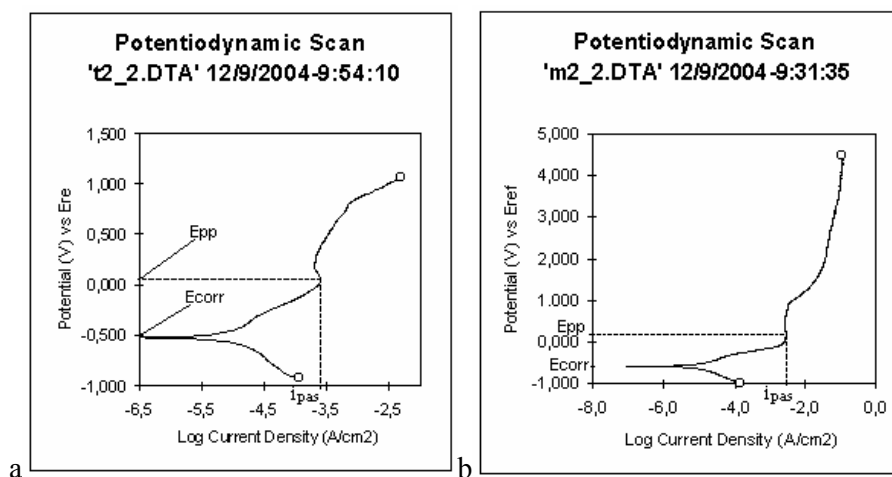


Figura 54a camadas de WC-10Co-4Cr aspergidos com HVOF pistola JP5000 e 54b com pistola DJ2700.

Os ensaios permitem observar que todas camadas, tanto as aspergidas pelo ASP como as aspergidas pelo processo HVOF não apresentaram a curva característica dos materiais que contem um potencial de passivação, segundo a figura 16, pagina 22. Trata-se na realidade de um processo de despassivação localizada, tendo em vista a presença do íon cloreto. Mesmo assim, isto não significa que estes materiais iniciem um processo corrosivo na presença de um eletrólito, dado que a corrente da ativação como anodo inicia se perto do 0,5 V em todos os casos, destacando-se que nas camadas: 2AS761A e B, Ver 2As761, T1 e M1 existe uma reta que da uma faixa do potencial onde a passivação acontecerá.

Em ordem de maior a menor rapidez de passivação (de menor I_{corr} a maior I_{corr}) está o aspergido com HVOF t2_2(JP500); ver_2(AS761); m2_2(DJ2700); b2_3(2AS761B) e 5b(5AS751B), sendo que 4a(4AS761A) não apresenta visivelmente o I_{corr} . Por outro lado, a tendência a passivação, verificada pela menor distância E_{corr} - E_{pp} , fica na mesma ordem, mas o t2_2 na região transpassiva apresenta irregularidades que sugerem a ocorrência de corrosão de tipo localizada (Pites)(Schiefler, 2004).

6.6 Ensaio de Riscamento Linear.

A figura 54 mostra a morfologia dos sulcos resultantes do ensaio de riscamento linear nos revestimentos depositados pelo processo HVOF, materiais analisado pelo ensaio de riscamento pendular das figuras 8a e 8b na pagina 13 (Freire, 2002), e onde a fragilidade do material é manifesta.

Na figura 55, pode se observar, nos revestimentos depositados pelo processo ASP, que não existem micro lascamentos nem micro-sulcamento (material arrancado ficando nos cantos dos sulcos), destacando-se a ductilidade das camadas.

Verificou-se que nestes riscos as partículas duras são incrustadas dentro da matriz em vez de serem arrancadas, não se gerando trincas no fundo dos riscos. Este fenômeno ajuda que, caso existam poros, estes sejam comprimidos e reduzidos de tamanho (forças atuantes durante o serviço), por outro lado, pode ser o motivo pelo qual o desgaste atinge valores maiores comparados com as ligas aspergidas com HVOF (Figura 48, página 49).

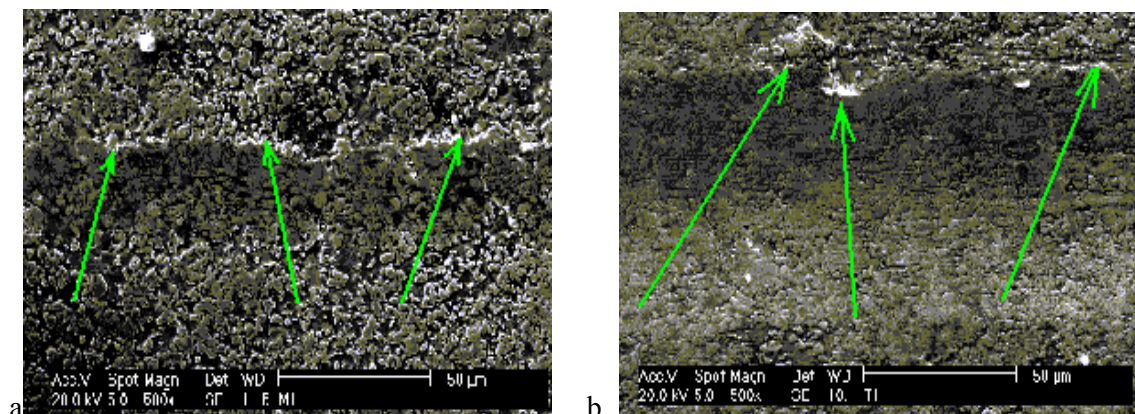
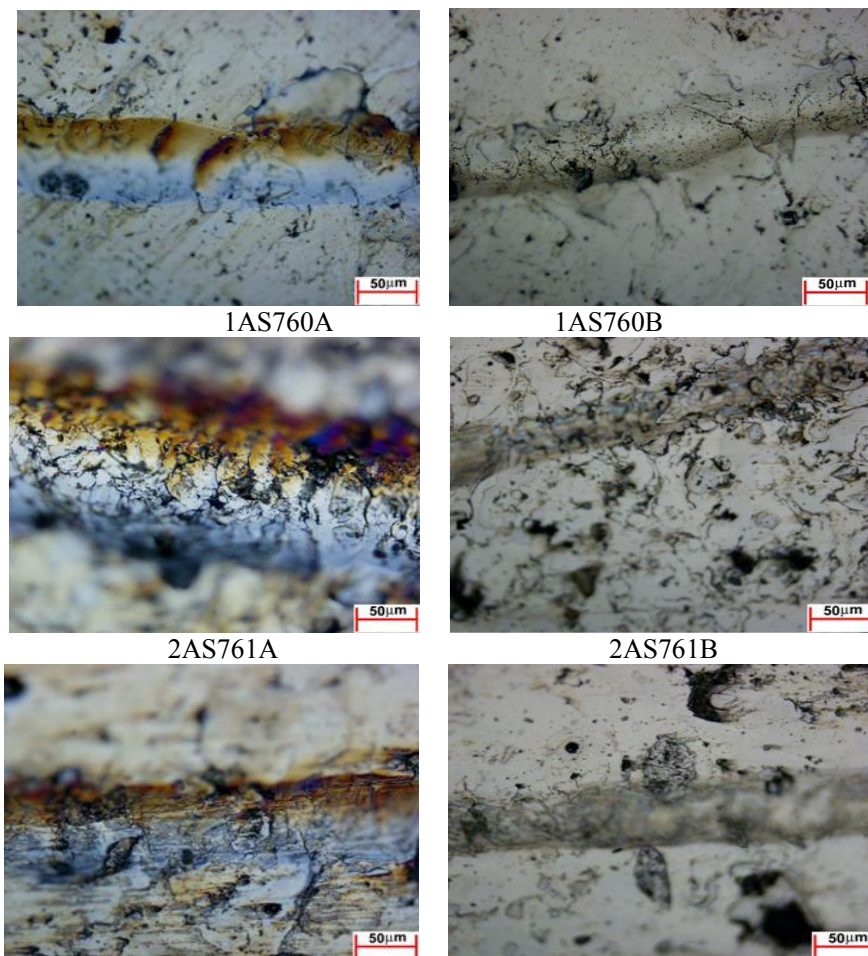


Figura 55a. Camadas aspergidas pelo processo HVOF de NiWCrSiFeBC menor dureza, pistola JP 5000 e 55b camada de WCCo-Cr maior dureza, pistola DJ 2700, nos dos casos observa se no limite dos riscos a forma de dente de serra, característico de materiais frágeis.



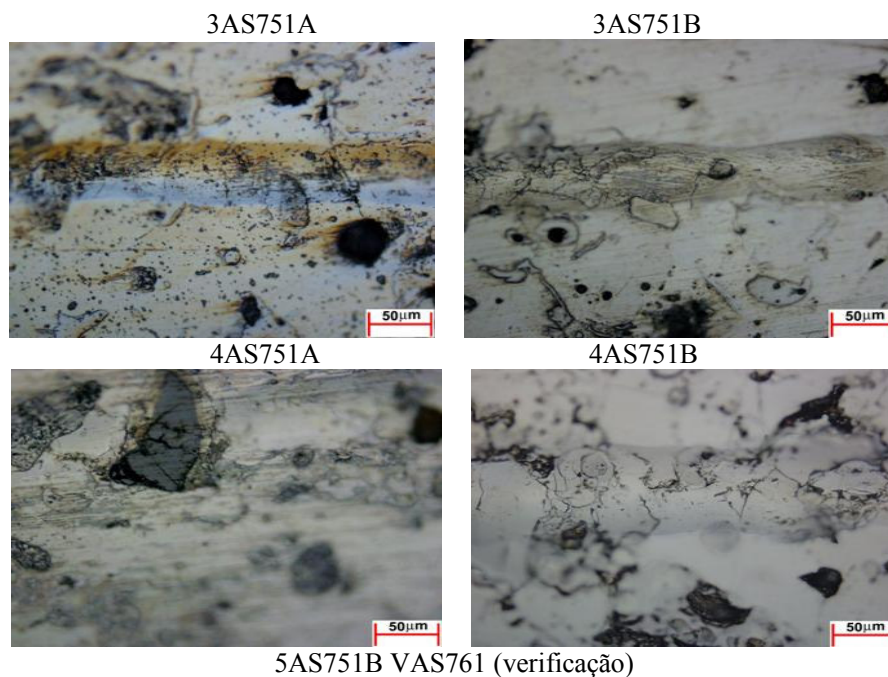


Figura 56. Micrografias, sem ataque. Com os resultados do ensaio de riscamento lineal.

Os riscos dos materiais 2AS761B e VAS761(Verificação), foram examinados no MEV com a finalidade de verificar a inexistência de micro lascas e cavacos assim como detalhe da passada do indentedor sobre as partículas duras (figura 57). No caso do material 2AS761B (figura 57a) observa se que só existe deformação plástica, as partículas duras, da cor branca, são incrustadas na camada pela carga do indentedor, sendo coerente com o fato de ter sido o corpo de prova com menor perda de material no ensaio de desgaste.

No caso do corpo de prova de verificação (AS761), figura 57b, apresenta trincas no fundo do risco e cavacos nos cantos, não sendo estes cavacos desprendidos, apresentam uma debilidade que pode ter sua origem na falta de temperatura no substrato, isto devido a que todos os corpos de prova com pré-aquecimento apresentam riscos só com deformação plástica (figura 56, coluna direita).

Os gráficos 48, da pagina 49, e 50, da pagina 51, indicam que em todos os casos o pré-aquecimento melhorou tanto a resistência ao desgaste quanto a porosidade, pelo que, modificando esse parâmetro de aspersão, a debilidade indicada anteriormente seria superada.

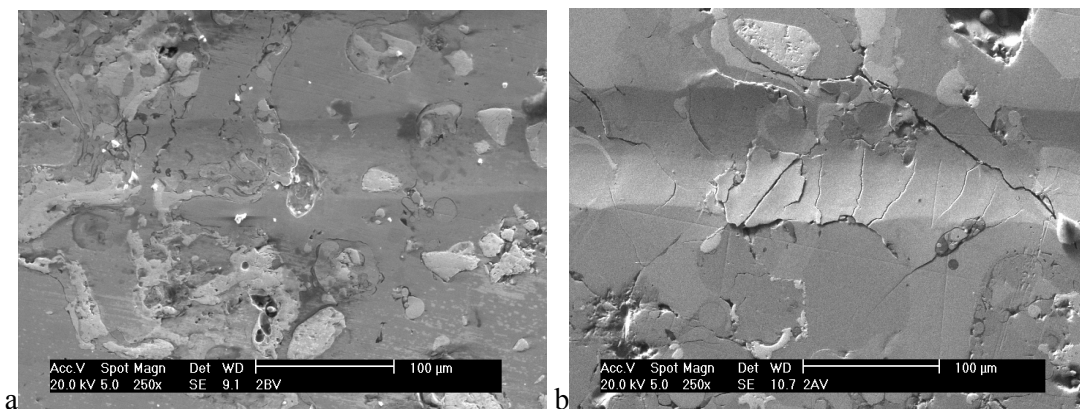


Figura 57a, camada aspergida com 2AS761B sob a pressão do indentador deforma se plasticamente e na figura 57b, camada aspergida com VAS761 (verificação) sob a pressão do indentador aparecem trincas e micro lascas não visíveis no microscópio óptico.

Com o intuito de ter uma visão geral do ocorrido com os outros arames, analisou-se ao MEV uma amostra do 4AS751B, (figura 58a) onde se podem observar pequenas lascas de material fluindo nos cantos do risco e a figura 58b permite observa o nascimento de micro trincas no fundo do risco que é material deformado superposto que pode ocorrer numa matriz dúctil. .

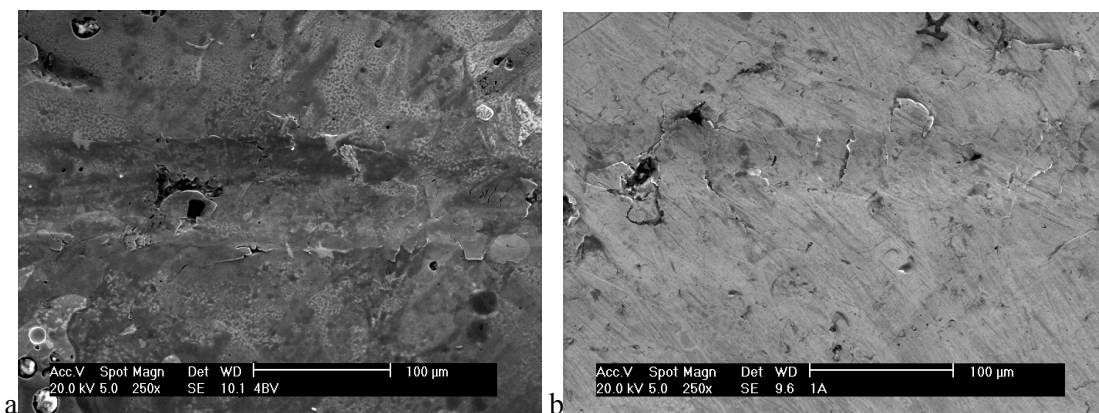


Figura 58a. Material 4AS751B mostra lascas incipientes e figura 58b, material 1AS760A permite a ver geração de micro trincas no fundo risco.

O análises de todos estes resultados, permitem diferenciar os materiais aspergidos com HVOF (Freire, 2000), como especial para suportar o desgaste em serviço, onde a corrosão não é de maior incidência e que os materiais analisados aspergidos pelo processo ASP, apresentam boas condições para ser submetidos a desgastes e corrosão, e que no caso de trincar, nos sulcos dificilmente haverá trincas passantes.

CAPITULO 7

CONCLUSÕES

1. - O objetivo principal de avaliar o desempenho dos três revestimentos propostos foi atingido dado que estes foram caracterizados quanto a dureza e porosidade além de serem submetidas às camadas a solicitações de desgaste, riscamento e corrosão o que permite conhecer os resultados em camadas aspergidas com parâmetros de aspersão conhecidos.
2. - Na procura de camadas mais dúcteis do que as aspergidas por Freire (2002) no processo HVOF, se conclui que as ligas de Ni autofluxantes aspergidas ao arco pesquisadas apresentam uma melhor tenacidade. No entanto, apresentam menor resistência ao desgaste, pela menor quantidade de partículas duras presentes nas camadas, sendo a camada VAS761B (verificação) a de melhor desempenho na maioria dos ensaios, desempenho que se pode melhorar com pré-aquecimento controlado. No caso das ponteiras, e recomendado utilizar tanto arame quanto os parâmetros usados na camada VAS761.
3. - No processo ASP, ao se preaquecer moderadamente o substrato, existe uma melhoria nos resultados dos ensaios de aderência, desgaste, diminuição da porosidade e riscamento, logrando-se uma camada mais homogênea e compacta. O pré-aquecimento, em forma moderada, ajuda a melhorar o comportamento das camadas, mas quando superado os 200 °C, o efeito é inverso.
- 5- As fotomicrografias mostram que o material ao passar pelo arco pode ser fundido ou só aquecido. Este fato permite deduzir que as partículas duras de FTC, os carbonetos refratários, óxidos, boretos, podem ser fundidos e resolidificados no trajeto, no substrato ou camada, e outros, só aquecidos mantendo as suas propriedades e morfologia intactas. Porém estas partículas duras fundidas dissolveram e, ao misturar-se com outros cermets ou metais, modificam parte de suas propriedades, mas em conjunto melhoram as propriedades da matriz.
6. As camadas aspergidas pelo processo ASP apresentam melhores condições para serem expostas a ambientes corrosivos e solicitações de desgaste e riscamento, em tanto que as aspergidas pelo processo HVOF são mais recomendadas para solicitações de desgaste.
8. - Finalmente, conclui-se que a camada aspergida com o arame AS751 sem preaquecimento, que não tem Cr, apresenta o pior desempenho em adesão, dureza, desgaste e porosidade muito alta, mas o desempenho melhora consideravelmente com o preaquecimento até 200 °C.

CAPITULO 8

TRABALHOS FUTUROS

Fazer ensaios de corrosão por nevoa salina para analisar a influencia das trincas, geradas no ensaio de riscamento, na resistência à corrosão das camadas aspergidas VAS761 e 2AS761B e verificar se existem falhas pasantes.

Para constatar que as trincas que aparecem no fundo dos riscos no material de verificação não atingem o substrato, submeter ao ensaio de corrosão de Kesternich (ASTM G87) por 80 horas (Wilden and Wank, 1999) a camadas com diferentes espessuras e riscadas com a mesma carga.

Como a camada de melhor desempenho (verificação) tem 10% de Cr ensaiar misturas de arames que modifiquem o conteúdo de cromo para baixo de 19% (AS760) e maior que 10% e aspergir camadas com os mesmos parâmetros para comparar resultados.

Aspergir camadas com o arame AS761 modificando os parâmetros de aspersão até obter os melhores resultados possíveis.

Pesquisar a mistura de arames, na busca de camadas mais tenazes, com menor porosidade, maior resistência à corrosão, e desgaste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM G 65-00. **Standard test Method for Measuring Abrasion Using The Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus.** Information Handling Service. USA. 2002.

BALTHAZAR G., Paulo Gustavo **Estudo de Revestimentos Resistentes ao Desgaste e Corrosão, Aplicados por Aspersão Térmica (HVOF)** Relatório de Bolsista IC da ANP / 2002.

BECZKOVIK et al. **Carbide Materials for HVOF Applications Powder and Coating Properties.** H.C. Starck Gbm H & Co. Germany. 1998.

BUNSHAH, Rointan F. et al. **Handbook of Hard Coating.** York Town Hights N.Y. 2000. 550 f.

CALLISTER JR, William D. **Materials Science and Engineering an Introduction.** Fourth Edition, Wiley & Sons, New York, 1997.

CAMELLO LIMA, Carlos e TREVISAN, Roseane. **Aspersão Térmica Fundamentos e Aplicações.** 1 ed. São Paulo: Artliber 2002. 148 f.

CORTES, Ramón. **Aspersão Térmica.** 2001.36 f. Apostila. Departamento de Engenharia Mecânica.Laboratório de Materiais e Tratamento de Superfície. Universidade Federal de Paraná. Curitiba. 2001 .

CORTES P. Ramón. **Estudo de Revestimentos de Alumínio Depositados por três Processos de Aspersão Térmica para a Proteção do Aço Contra a Corrosão Marinha.** Tese de Doutorado Programa de Pós - graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1998.

DURMATTM. **Flux-cored Wire for thermal spraying as per DIN 14919,** Durum Verschleißschutz GMBH. Gladbacher strasse 326. D-47805, Krefeld.2004. 6 p

EG&G PRINCETON APPLIED RESEARCH – ELECTROCHEMICAL INSTRUMENT DIVISION. **Application Note Corr-4: Electrochemistry and Corrosion Overview and Techniques.** Princeton, NJ, USA, 1987.

FAGES BOSCH, SC. **Chemical Níquel = Uniformity.** Disponível em www.fagesbach.com. Aceso em 23 novembro 2004.

FILLION, G.L., New Developments in Nickel-Base Self Fluxing Alloys, **Conference Proceeding Thermal Spray Coating: Research, Design and applications,** Ed. Christofer C Berndt and Thomas F Bernececki, Ohio, USA, 1995, p 365-374.

FOLTRAN, Bruna de B. **Comparação dos revestimentos de superligas à base de cobalto(Co-Cr-W-C) depositado por eletrodo revestido, plasma por arco transferido e laser.** 2000,104 f.

FREIRE, Fabrício. **Avaliação De Revestimentos Aplicados Por Aspersão Térmica Para**

Proteção Contra o Desgaste De Ponteiros De Risers. Dissertação. Mestrado em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2002.

GITZHOFER, X.L.R. TIWARI F., and M.I. BOULOUS. **Plasma Deposition of Refractory Metals, Conference Proceeding Thermal Spray Coating: Research, Design and Applications.** Ed. Christopher C. Berndt and Thomas F. Bernecccki, Ohio, USA 1995.

GORDON ENGLAND THERMAL SPRAY COATING CONSULTANT, Independent Metallurgist and Consultant to the Thermal Spray Coating Industry. **Arc Thermal Spray Process.** Apresenta diferentes processos de Aspersão Térmica e consultorias na matéria. Disponível em: <http://www.gordonengland.co.uk/>. Acessado em 18 agosto 2004.

HALLDEARN, Richard, The Professional Division of The Welding Institute, **Arc spraying.** Disponível em: http://www.twi.co.uk/professional/unprotected/band_1/surf15.html Acessado em 8 de setembro de 2004 .

KARL-HEI. ZUM GAHR. **Microstructure and Wear of Materials**, Tribology Series, 10. Elsevier Science Publishers.B.V. Sara Burerhartstraat 25.P.O. box 211,1000 AE Amsterdam, The nederlands. 1987.

KREYE H; SZIGETI; BUSCHINELLI, A. **Proteção contra desgaste por revestimento com ligas Autofluxantes de NiCrBSi.** Soldagem & Materiais, Vol 6, 1994.

KRIENBUEHL, P.K., Widmer. **Corrosion protection by arc sprayed aluminum: new developments.** Switzerland. 1974.

LINDE GAS INDUSTRIELS, **Les procedes de projection thermique.** 174 Avenue Jean Jaurés, F-69007, Lyon. France. 2000.

NOGUEIRA, R. E. F. Q; DE MELLO, J. D. B. **Esclerometria aplicada ao estudo do desgaste abrasivo.** 43º. Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais, f. 281-294, 1996.

PAES, M.P. **Utilização de revestimentos de níquel químico submetido a condições de desgaste e corrosão em meio marino atmosférico severo e submerso.** Seminário da disciplina Microestrutura do desgaste. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. 2000.33 f.

RODRÍGUEZ, REGINA. **Formação de óxidos nos revestimentos de Al Depositados por Aspersão Térmica.** Tece de Doutorado. PIPE. Universidade Federal de Paraná, Curitiba, Pr. 2003

SCHIEFLER, MARCOS. **Estudo microestrutural e eletroquímica de diferentes revestimentos Metálicos Aspergidos Para Proteção do Aço contra a Corrosão Marinha.** Tese Doutorado em Engenharia Mecânica. Departamento de engenharia Mecânica. Universidade federal de Santa Catarina. 2004.

SCHWITZKE,R; KREYE H. Haigh Velocity Oxifuel Spraying of Tungsten Carbide Based Coating. Schwissen & Schneiden. DVS,G 6253, fevereiro 2000.

SEDRIKS, A. J., **Corrosion of Stainless Steels** - Ch.3, J. Wiley & Sons, New York. 1979.

SOUSA, F.G.P. e outros. **Avaliação de Incerteza de Medição Da Dureza ao Risco e da Energia de Remoção Específica de um Esclerômetro Retilíneo.** Programa de Pós – graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2004. 20 f.

WELDING HANDBOOK. **Materials and Applications.** Part-2 Volume 4. 8th Edition. AWS. Miami. USA. 1998. 618 p.

WELDING HANDBOOK. **Welding Process.** Vol. 3. 8th Edition. AWS. Miami. USA. 1998

WILDEN, Johannes e WANK, Andreas. **Arc-Spraying of Reinforced Self Fluxing Coatings.** Int. Conference EUROMAT in Munich. Spt. 1999. 6 p.

APENDICES

APÊNDICE 1

FOLHA DE DADOS

1. Arame: 1AS760 A

1.1 Parâmetros: Pressão do ar : 5 bar
 Tensão : 28 V
 Intensidade : 200
 A
 Pré-aquecimento : Sem



Fig 1 Vista transversal. Poros de forma irregular, sugerem arrancamento de partículas duras. A aderência da camada sem falhas (sem ataque).

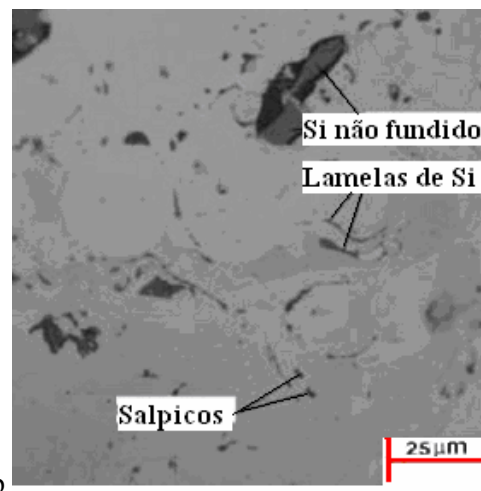
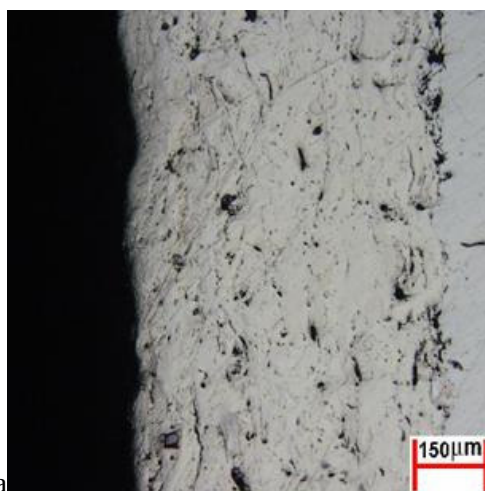


Fig 2a. Vista lateral, interfase camada –substrato com alguns poros ou inclusões e fig 2b com detalhe de partículas de Si fundidas e não fundidas.

1.2 Dureza

	Media	Desvio	Dispersão
	HV _{0,3}	padrão	%
Transversal à camada :	369	45,8	12,4
Perpendicular à camada :			
Matriz :	505	45,4	8,8
Partículas duras:	2671	127,4	37,71

1.3. Desgaste.

Perda de massa: Segundo ASTM G65 procedimento C, 30 s: 0,08 g.
 Segundo procedimento B, 10 minutos : 0,984 g
 Espessura da camada : 523 μm

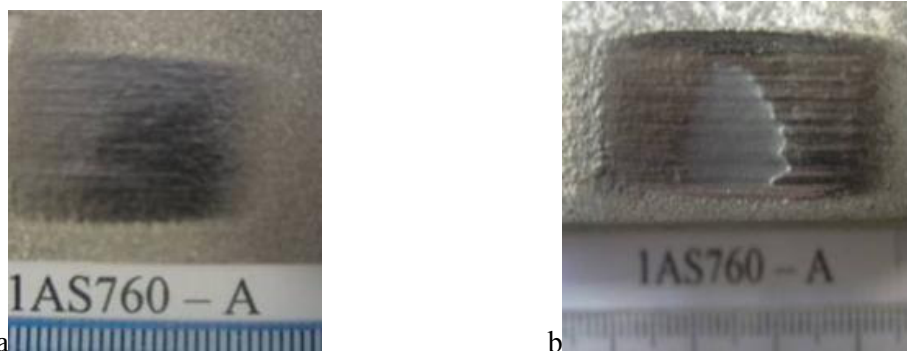


Figura 3a. Procedimento C (30 segundos) e figura 3b procedimento B (10 minutos). Neste caso o desgaste atingiu o substrato.

1.4 Aderência.

Media : 44,93 Mpa
 Desvio padrão : 3,76
 Coef. de variação : 8,37

1.5 Porosidade.

Media : 3,3%
 Desvio padrão : 0,6
 Coef. de variação : 17,3

1.6 Riscamento.

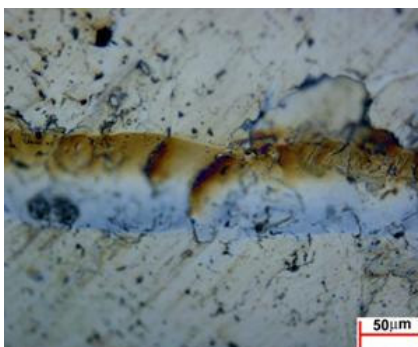


Figura 4. O risco é do tipo micro sulcamento, o identador só provocou deformação plástica sem desprender material.

2. Arame 1AS760-B

2.1. Parâmetros de aspersão: Pressão do ar: 5 bar

Tensão : 28 V

Intensidade : 200 A

Pré-aquecimento: 170°C

2.2 Micrografias

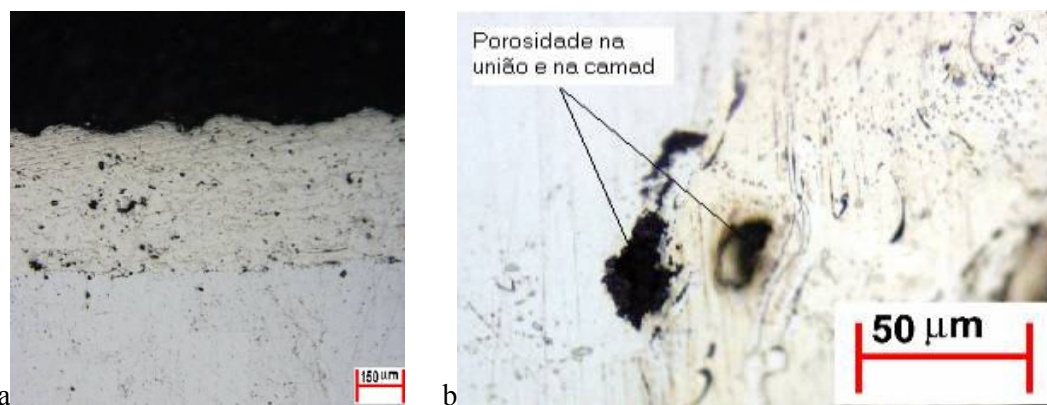


Figura 5a. Vista transversal da interface camada substrato (Sem ataque) pode-se ver que tem uma boa aderência e na figura 5b, detalhe de uma imperfeição no limite com o substrato e um poro na camada mesma.

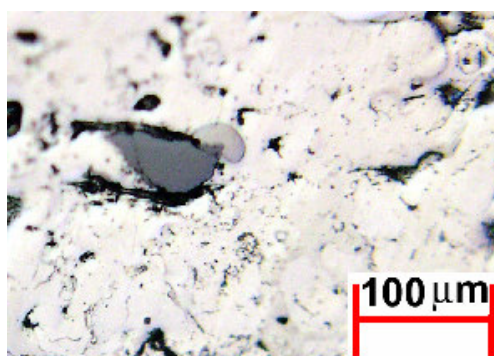


Figura 6. Vista frontal da camada onde encontra se uma partícula de Si com ancoragem débil.

2.3. Dureza:

	Media	Desvio	Dispersão
	HV _{0,3}	padrão	%
Transversal à camada	: 317	46,0	12,2
Perpendicular à camada :			
Matriz	: 485	57,2	11,8
Partículas duras:	2671	127,4	37,7

2.4. Ensaio de desgaste:

Perda de massa: segundo ASTM G65: 0,0817 g em 30 seg (fig. 17)
 10 minutos: 0,856 Falhou (10 min) (fig. 18)
 Espessura da camada 480 μm

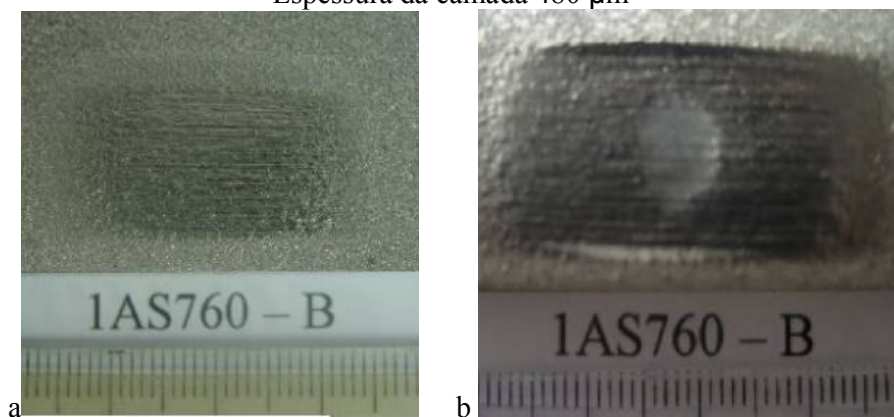


Figura 7a. Procedimento C. Presença de partículas duras geram linhas de desgaste em afigura 7b, o desgaste atinge ao substrato gerando um desgaste mais agressivo no substrato.

2.5. Porosidade

Média : 1,8%
Desvio padrão : 0,3
Coeficiente de variação : 15,7

2.6. Riscamento

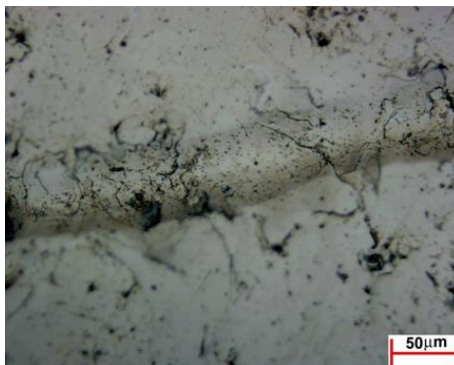


Figura 8. Risco só com deformação plástica do material.

3.-Material: 2AS761 A

3.1. Parâmetros:

Pressão do ar : 5 bar
Tensão : 28 V
Intensidade : 200 A
Pré-aquecimento: Não



Figura 9. Vista lateral da camada Detalhe das partículas duras de diferentes tamanhos.

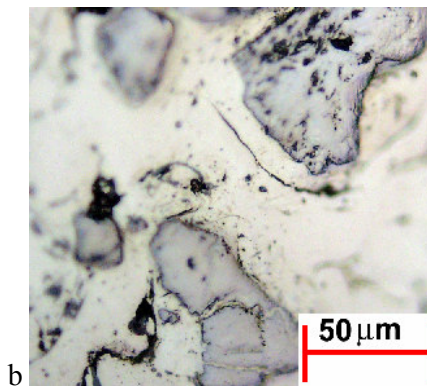
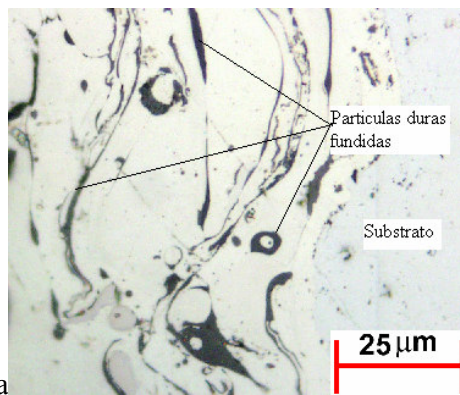


Figura 10a. Vista lateral da camada. Pode-se observar as formas de lamelas que adquirem as partículas duras fundidas, e na figura 10b, vista perpendicular á camada, identifica-se às partículas duras de carbonetos de tungstênio semidissolvidas (Welding H. vol. 4, 1998).

3.2. Dureza:

		Media HV _{0,3}	Desvio padrão	Dispersão %
Transversal à camada	:	453	62,3	13,7
Perpendicular à camada :	Matriz	524	59,7	11,4
	Partículas duras:	2178	535,4	24,6

3.3. Desgaste.

Perda de massa: segundo ASTM G65: 0,085 g em 30 seg

10 minutos: 0,799g

Espessura da camada: 613µm

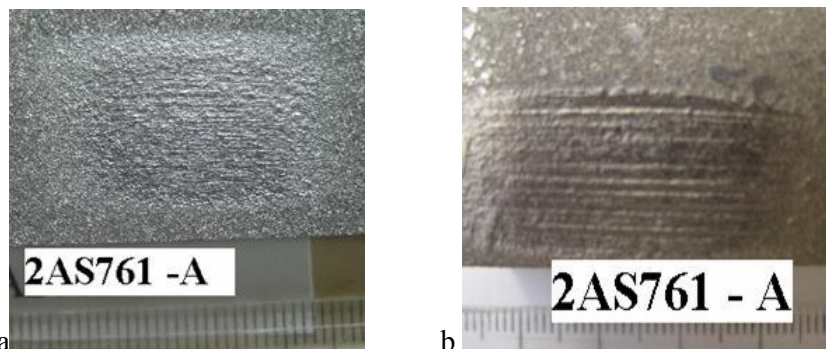


Figura. 11a. Procedimento C (30 segundos) pode se observar o nascimento de linhas grosseiras que são confirmadas na figura 11b onde foi usado o procedimento B (10 min).

3.4. Aderência.

Resistência media : 44,7 Mpa

Desvio padrão : 4,4

Coefficiente de variação : 9,8%

Tipo de falha : I e II

3.5. Porosidade

Média : 3,0 %

Desvio padrão : 0,9

Coefficiente de variação:28,9%

3.6. Riscamento



Figura 12.O risco mostra na trajetória a geração de trincas nas paredes do sulco, característico do risco onde existem micro-cortes.

4. - Material: 2AS761 B

4.1 Parâmetros: Pressão do ar :5 bar
 Tensão :33 V
 Intensidade : 200 A
 Pré-aquecimento: Não

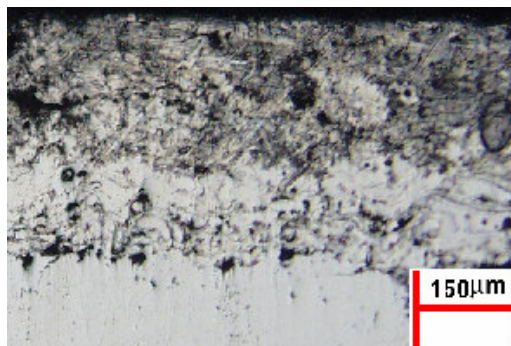


Figura 13 Vista transversal da camada, algumas irregularidades na interface camada-substrato e partículas duras de diferentes tamanhos.

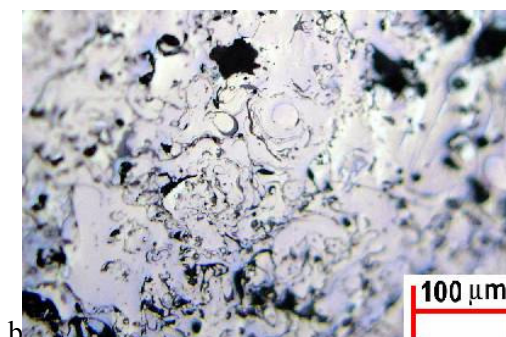
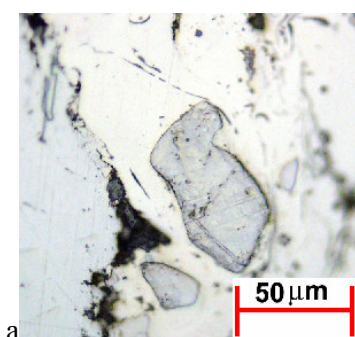


Fig. 14a. Vista transversal da camada, observam-se partículas duras, provavelmente de FTC e vazio entre substrato e camada, e na figura 14b (vista perpendicular à camada), sobre a matriz de Ni os limites das panquecas de CFT ou Si fundido em forma de contornos circulares.

4.2. Dureza

	Media	Desvio	Dispersão
	HV _{0,3}	padrão	%
Transversal à camada	: 354	41,8	11,8
Perpendicular à camada : Matriz	: 538	70,6	13,1
Partículas duras:	2236	854,7	38,2

4.3. Ensaio de desgaste:

Perda de massa: segundo ASTM G65: 0,081 g em 30 seg
 10 minutos: 0,589 g

Espessura da camada: 677μm

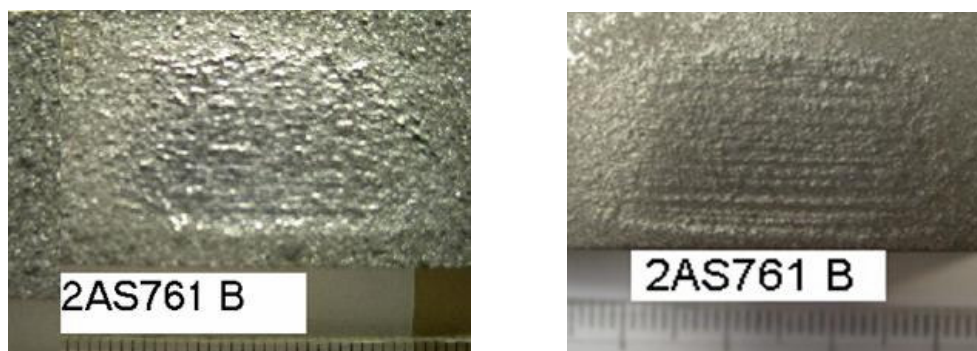


Figura 15a. Procedimento C (30 segundos). Pode-se observar o nascimento de linhas de desgaste grosseira e, na figura 15b já as partículas grosseiras estão, indicando um alto percentagem de partículas duras.

4.4. Porosidade.

Média : 3,0%
 Desvio padrão : 1,0
 Coef. de Variação: 33,3%

4.5. Riscamento.



Figura 16. Os limites dos riscos indicam a existência de micro-cortes, assim como as paredes do sulco mostram trincas coerentes com esse mecanismo.

5. Arame 3AS751 A

5.1. Parâmetros

Pressão do ar : 5 bar
 Tensão : 28 V
 Intensidade : 200 A
 Pré-aquecimento : 150°C



Figura17. Vista transversal, a interface camada-substrato mostra aderência interrompida, provavelmente por óxidos, além disso, é possível identificar partículas duras de grande tamanho.

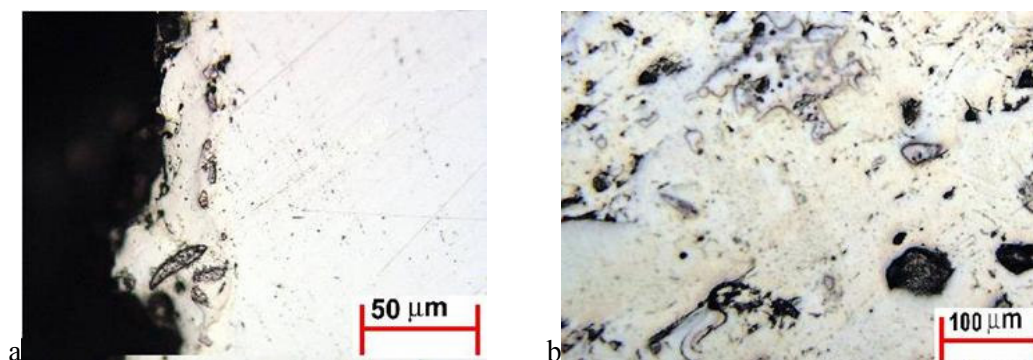


Figura 18. Vista transversal, os FTC da cor preto. O detalhe da união da camada e substrato indica um bom ancoramento do material aspergido com o substrato. A figura 18b e uma vista perpendicular à camada onde quase não se distingue a divisa entre panquecas, embora na parte superior destacam-se restos de uma de elas com partículas duras.

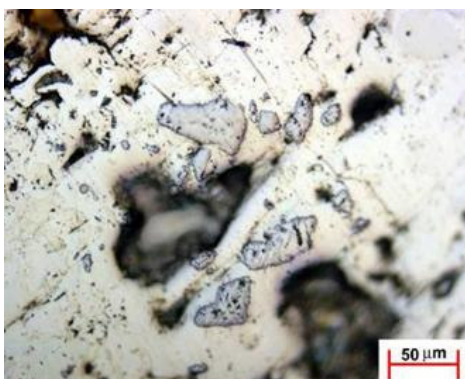


Figura 19. Vista perpendicular à camada. Detalhe da camada de Ni com partículas duras de diversos tamanhos espalhadas pela superfície após polimento. Os buracos são depressões do acabamento superficial.

5.2. Dureza

	Media	Desvio	Dispersão
	HV _{0,3}	padrão	%
Transversal à camada	: 466	67,9	14,6
Perpendicular à camada : Matriz	: 434	41,5	9,6
Partículas duras:	2158	332,9	15,4

5.3. Desgaste.

Perda de massa: segundo ASTM G65: 0,081 g em 30 seg
10 minutos: 1,634 g atingiu o substrato.

Espessura da camada: 365µm

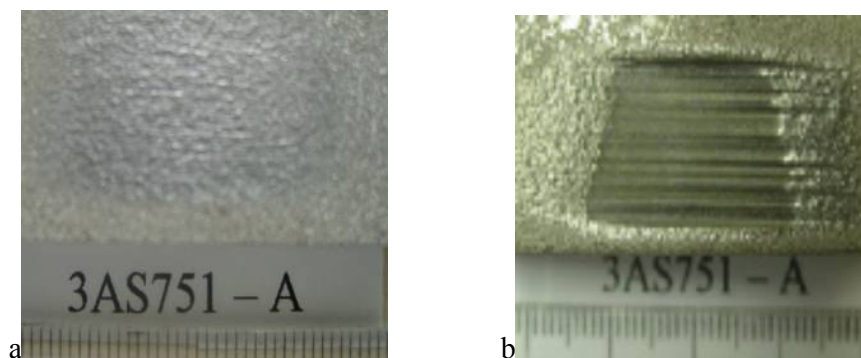


Figura 20a. Procedimento C (segundos). Desgaste leve mostrando grãos grosseiros bem aderidos. A figura 20b (10 minutos) mostra que o desgaste atingiu ao substrato deixando linhas grosseiras indicando a existência de grãos grosseiros.

5.4 Aderência.

Resistência Média	: 41,6 Mpa
Desvio padrão	: 2,0
Coefficiente. de variação:	4,9%
Tipo de falha	: I

5.5. Porosidade

Média	: 2,7%
Desvio padrão	: 0,6
Coefficiente de variação	: 21,7%

5.6. Riscamento



Figura 31 O material lateral flui mostrando que o mecanismo do desgaste é micro sulcamento.

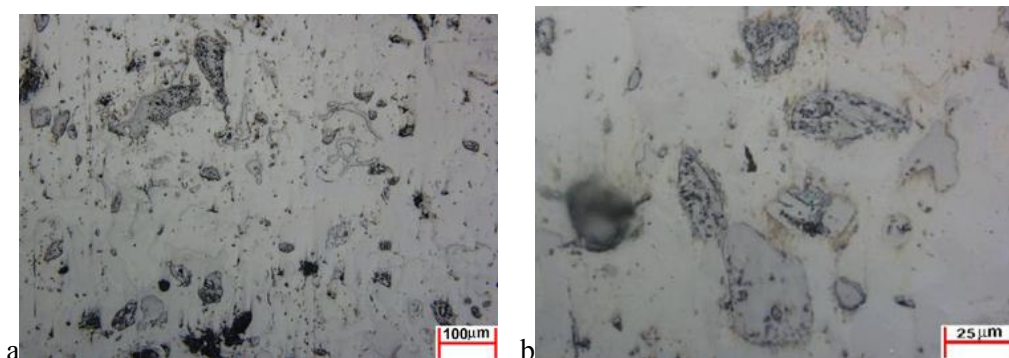
6. Arame 3AS751 B

6.1. Parâmetros

Pressão do ar	: 5 bar
Tensão	: 30 V
Intensidade	: 200 A
Pré-aquecimento:	Não



Figura 22 Vista transversal da camada destacam-se setores com colônias de partículas duras (FTC) bem na divisa com o substrato.



Figuras 23a. Vista perpendicular à camada, pode-se observar ilhas de diferentes partículas duras, umas de forma equiaxiais e outras de formas amorfas.

6.2. Dureza

	Media	Desvio	Dispersão
	HV _{0,3}	padrão	%
Transversal à camada	: 408	46,5	11,4
Perpendicular à camada : Matriz	: 388	49,3	12,7
Partículas duras:	1865	332,6	17,3

6.3. Desgaste.

Perda de massa: segundo ASTM G65: 0,115 g em 30 seg

10 minutos: 1,409 g atingiu ou substrato

Espessura da camada: 458µm

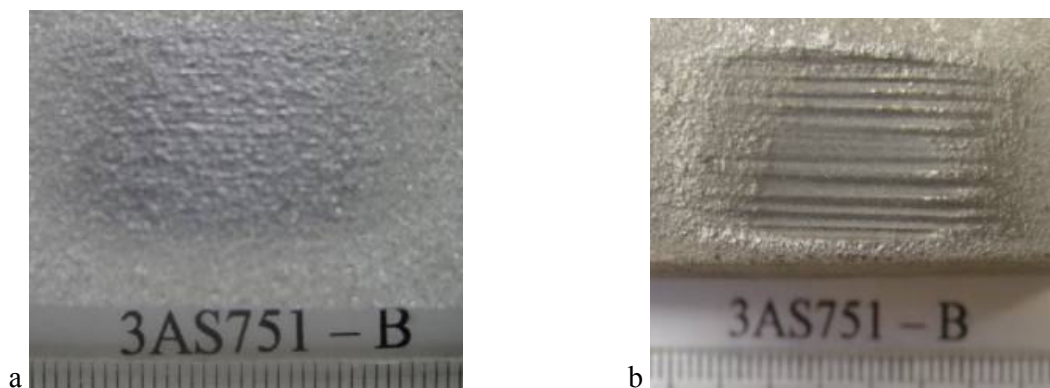


Figura 25a. Procedimento C (30 segundos). Desgaste leve mais permite observar partículas duras cobertas. A figura 25b. (10 minutos). O desgaste atingiu o substrato e gero linhas grosseiras pela existência de grande quantidade de partículas duras.

6.4. Aderência

Média : 59,7 Mpa

Desvio padrão : 7,5

Coefficiente de variação : 12,6%

Tipo de falha : I

6.5. Porosidade

Média : 1,8%

Desvio padrão : 0,8

Coefficiente de variação: 16,7%

6.6. Riscamento



Figura 26. O mecanismo de desgaste foi o micro sulcamento

O material deformou mais não desgarrou. A partícula dura do centro da micrografia indica que esta foi incrustada no material e quebro no limite do risco (figura 26).

7. Arame 4AS751 A

7.1. Parâmetros.

Pressão do ar : 2,7 bar
(parâmetro modificado)

Tensão : 33 V

Intensidade : 200 A

Pré-aquecimento: No



Figura 38. Vista transversal. Camada bem aderida ao substrato, CW/C2W de morfologia equiaxial e fundido em forma de lamelas e no centro, partícula de SiO_2 (a cavidade do lado é característica de material arrancado pelo lixamento).

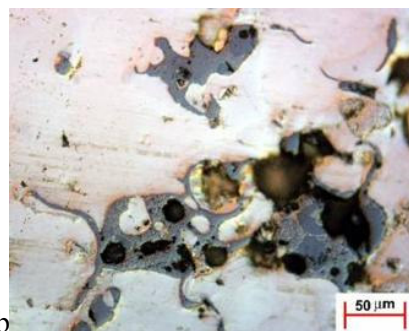


Figura 27a. Detalhe da qualidade da união entre camada - substrato e panquecas fundidas de material mais duro. Na figura 27b, a matriz de Ni contém FTC (cor café) colados numa estrutura fundida a base de Silício (cor cinza) e outras fases provavelmente de WC.

7.2. Dureza.

		Media	Desvio	Dispersão
		HV _{0,3}	padrão	%
Transversal à camada	:	490	73,2	7,5
Perpendicular à camada :	Matriz	590	84,1	14,3
	Partículas duras:	2018	807,7	38,3

7.3. Ensaio de desgaste:

Perda de massa: segundo ASTM G65: 0,0855 g em 30 seg
10 minutos: 1,109 g

Espessura da camada: 619µm

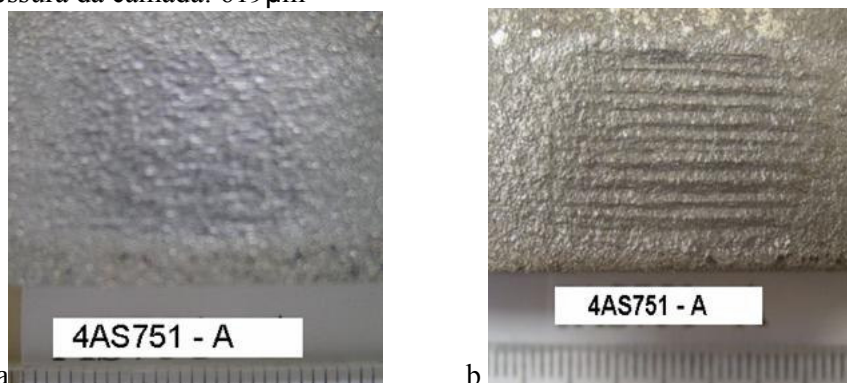


Figura 28a. Procedimento C (30 segundos). Desgaste imperceptível. Figura 28b, procedimento B (10 minutos). Linhas de desgaste mostram a presença de grande quantidade de partículas duras.

7.4. Porosidade.

Média : 4,2%
Desvio Padrão : 1.0
Coeficiente de variação: 25%

7.5. Riscamento:

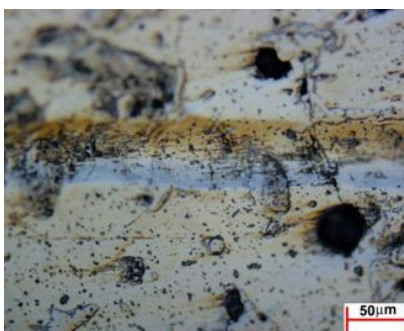


Figura 43. Observa-se um risco que deformou plasticamente, e a partícula dura incrustada no material da matriz da camada.

8. Arame 4AS751B

8.1 Parâmetros

Pressão do ar : 2,7
bar (parâmetro modificado)
Tensão : 33 V
Intensidade : 200 A
Pré-aquecimento:
200°C (Parâmetro modificado)

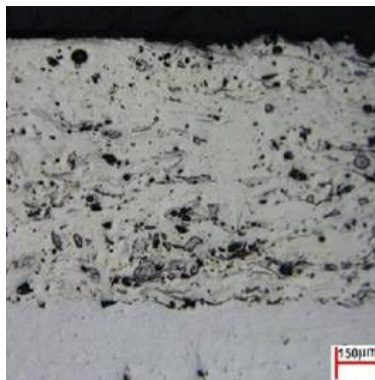


Figura29. Vista Transversal, destacam-se as partículas duras de diferentes portes e como a porosidade diminui na parte superior da camada (aquecida pela aspersão)

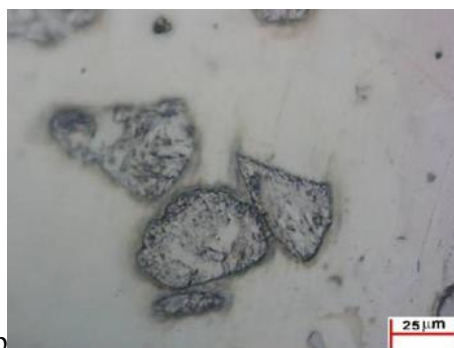


Figura30a. Vista transversal da camada, notasse a existência de partículas duras alongadas numa matriz homogênea e a partícula oxidada de silício no centro superior. O silício cristalizado representa uma interrupção na estrutura pela alta fragilidade dele. A função do Si é para formar ligas ou fases cerâmicas duras (Karl e Zum, 1987). Na figura 30b, representa uma vista perpendicular á camada mostrando partículas duras de FTC.

8.2. Dureza.

		Media	Desvio	Dispersão
		HV _{0,3}	padrão	%
Transversal à camada	:	469	35,4	7,5
Perpendicular à camada :	Matriz	554	72,5	13,1
	Partículas duras:	1889	340,6	18,0

8.3. Desgaste.

Perda de massa: segundo ASTM G65: 0,097 g em 30 seg
10 minutos: 0,850 g

Espessura da camada: 763µm

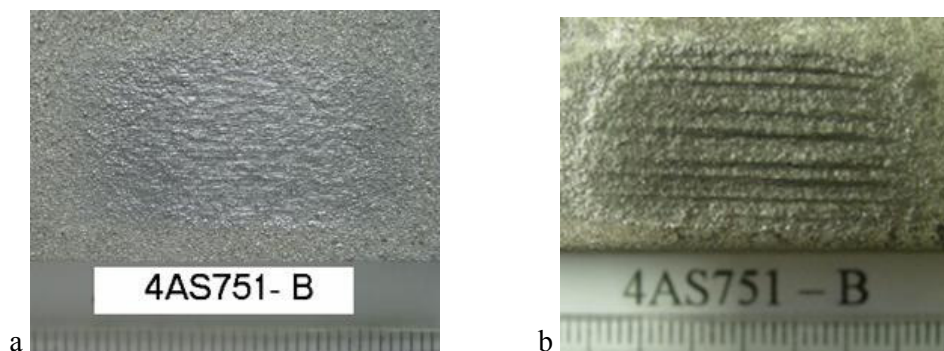


Figura 31. Procedimento C (30 segundos), mostra um desgaste incipiente. Na figura 31b (10 minutos), o desgaste atinge só à matriz, deixando as marcas na camada da resistência ao desgaste das partículas duras, sendo estas grosseira, indicam a existência de quantidades perto do 40%. (Bunshah, 2000).

8.4. Porosidade:

Porosidade média : 1,8%
 Desvio Padrão : 0,6
 Coeficiente de variação: 31,5%

8.5. Riscamento:



Figura 32. O material só foi deformado sendo uma matriz macia com partículas duras.

9. Material 5AS751 B

9.1 Parâmetros

Pressão do ar : 2,7 bar
 Tensão : 33 V
 Intensidade : 200 A
 Pré-aquecimento: 250°C

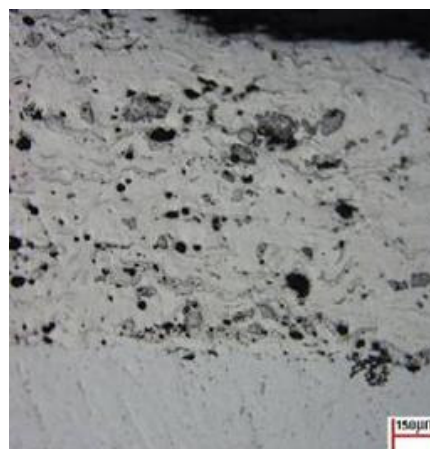


Figura 33. Vista transversal à camada, aderência da camada sem incrustações, partículas duras espalhadas e alguns poros.



Figura34. Vista da camada com dos diferentes partículas duras, a superior, composto de silício e a inferior, de menor dureza, provavelmente, carboneto de tungstênio.

9.2. Dureza.

		Media	Desvio	Dispersão
		HV _{0,3}	padrão	%
Transversal à camada	:	533	78,4	14,7
Perpendicular à camada :	Matriz	401	60,2	15,0
	Partículas duras:	1922	340,8	17,7

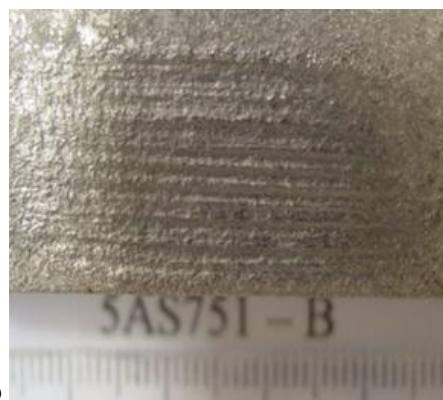
9.3. Desgaste:

Perda de massa: segundo ASTM G65: 0,083 g em 30 seg
10 minutos: 1,060 g

Espessura da camada: 759μm



a



b

Figura 35a, procedimento C (30 segundos). Desgaste incipiente e figura 35b, procedimento B (10 minutos). Mostrando linhas de desgaste grosseiras.

9.4. Porosidade.

Porosidade média	:	1,5%
Desvio Padrão	:	0,5
Coefficiente de variação:		33,3%

9.5. Riscamento:



Figura 36. O indentador ao passar por sob a partícula dura de silício, incrusta-la na matriz, mais não foi arrancada.

10. Ensaio de verificação, Arame AS761.

Em Função dos ensaios realizados e os resultados obtidos, e baseados na literatura e a experiência dos pesquisadores, realizo-se um segundo grupo ensaios, seleccionaram -se novos parâmetros com o intuito de melhorar os resultados obtidos no primeiro grupo. O material a aspergir, os parâmetros empregados e os resultados obtidos foi os seguintes:

10.1. Parâmetros.

Pressão do ar : 2,7 bar
 Tensão : 33 V
 Intensidade : 180 A
 Pré-aquecimento: sem

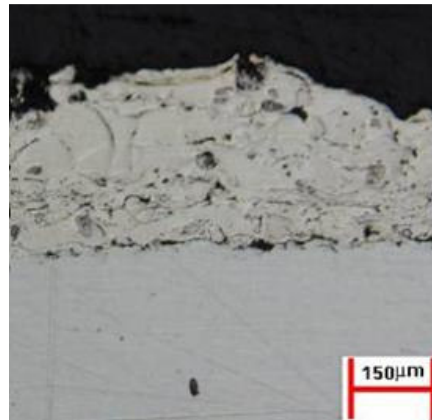


Figura 37. Sem ataque, limite entre substrato e com alguns vazios ou partículas residuais.

Observa se, na figura 55, a presença de partículas duras e a irregularidade das linhas da deposição, as que se esperam sejam paralelas à camada. Isto e devido à irregularidade da continuidade do arco observado durante o processo de aspersão, característico em este tipo de material (Wilden na Wank, 1999).

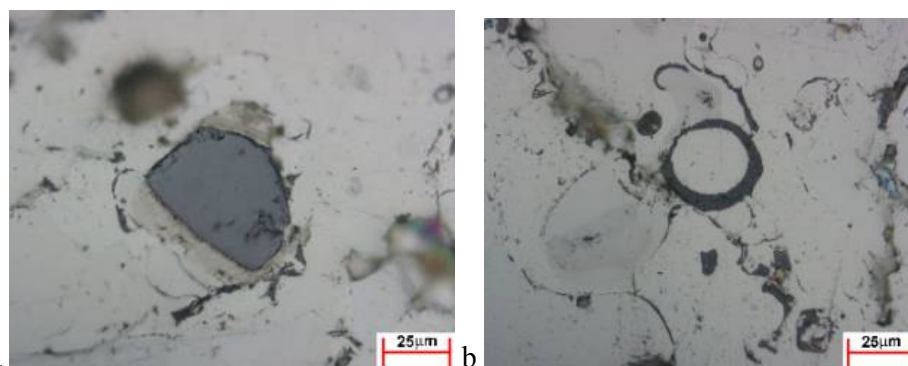


Figura 38. Duas vistas perpendiculares da camada.a) Si cristalizado no trajeto bico-camada b) Panqueca de silício fundido solidificado na camada.

Na figura 38a, pode se ver cristal de Si já cristalizado que atinge o substrato, rodeada com o que provavelmente seja uma segunda fase formada no processo e a direita, figura b, uma partícula fundida de silício formando um círculo concêntrico com uma gota do material da matriz.

10.3. Dureza.

	Media	Desvio	Dispersão
	HV _{0,3}	padrão	%
Transversal à camada	: 627	84,3	13,5
Perpendicular à camada : Matriz	: 678	99,3	14,7
Partículas duras:	2984	1430	47,9

10.4. Aderência.

Média	: 52,2 Mpa
Desvio padrão	: 1,4
Coefficiente de variação	: 2,7%
Tipo de falha	: II e III

10.5. Ensaio de desgaste:

Perda de massa: segundo ASTM G65: 0,071 g em 30 seg

10 minutos: 0,6273 g

Espessura da camada: 303µm

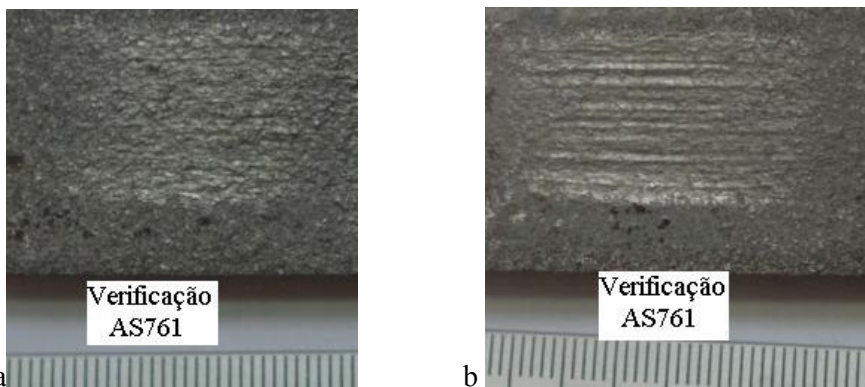


Figura 39a, procedimento C (30 segundos). Aparecem as linhas de desgaste. Na figura 39b aparecem linhas grosseiras indicando grande quantidade de partículas duras.

As linhas deixadas pela oposição ao desgaste das partículas duras, na figura 39b, não permitem ao desgaste atingir ao substrato, são em menor quantidade que as anteriores e mais escassas (Bunshah,2000) . Isto pode ser devida a estar mais espalhadas na camada e em formas mais planares.

10.6. Porosidade:

Porosidade média : 1,3%
Desvio Padrão : 0,3
Coeficiente de variação: 21,7%

10.7. Riscamento:

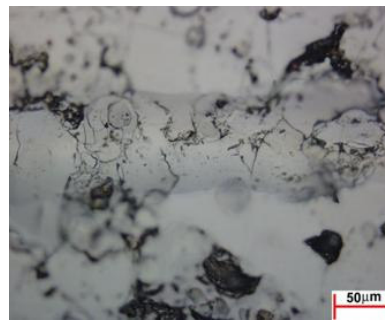


Figura 40. Matriz macia, não acontece desprendimento de material e as partículas duras ficam no seu lugar embora sejam forçadas pelo riscador.