

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

WINISSIUS MACHADO

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS COMPÓSITOS
 Al_2O_3 -13%pTiO₂/LIGA A BASE DE NÍQUEL OBTIDOS POR ASPERSÃO
TÉRMICA A CHAMA CONVENCIONAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2016

WINISSIUS MACHADO

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS
COMPÓSITOS Al_2O_3 -13% pTiO_2 /LIGA A BASE DE NÍQUEL OBTIDOS
POR ASPERSÃO TÉRMICA A CHAMA CONVENCIONAL**

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

Orientadora: Profa. Dra. Geocris Rodrigues dos Santos

PATO BRANCO

2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTOS COMPÓSITOS Al_2O_3 - 13% pTiO_2 /LIGA A BASE DE NÍQUEL OBTIDOS POR ASPERSÃO TÉRMICA A CHAMA CONVENCIONAL

Winissius Machado

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 30/11/2016 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
(UTFPR)

Profa. MsC. Silvana Patricia Verona
(UTFPR)

Profa. Dra. Geocris Rodrigues dos Santos
(UTFPR)
Orientadora

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

RESUMO

MACHADO, Winissius. Obtenção e caracterização de revestimentos compósitos Al_2O_3 -13%pTiO₂ /liga a base de níquel obtidos por aspersão térmica a chama convencional. 2016. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Revestimentos cerâmicos obtidos por aspersão térmica são conhecidos por melhorar propriedades de superfície, como dureza, resistência ao desgaste e corrosão. Esses revestimentos têm grande aplicação na indústria aeroespacial, petrolífera e automobilística, destacando-se aqui a sua atuação como isolantes térmicos, também conhecidos como – Thermal Barrier Coatings (TBC's). Apesar de apresentar grande variedade de aplicação, esses revestimentos apresentam baixa ductilidade comprometendo a vida útil do revestimento. A técnica de aspersão térmica por chamas convencional se destaca pelo baixo custo e simplicidade de manuseio. Normalmente pós compósitos apresentam baixa adesão ao substrato, para melhorar a adesão utiliza-se ligas metálicas de ligação com o revestimento. Como uma alternativa para se obter um revestimento com melhor adesão e que mantenha a capacidade de isolamento térmico, nesse trabalho foram desenvolvidos revestimentos compósitos de Al_2O_3 -13%pTiO₂ /NiAlMoB. As propriedades mecânicas dos revestimentos foram analisadas por ensaios de dobramento, adesão e microdureza. A análise microestrutural foi realizada por difração de raios-X, metalografia e análise da espessura da camada aspergida. O isolamento térmico foi avaliado através de ensaio de condutividade térmica. Os resultados indicam que os revestimentos obtidos com a composição contendo 50% de liga NiAlMoB apresentam boas propriedades térmicas e mecânicas quando comparado ao revestimento obtido de forma convencional usando 100% Al_2O_3 -13%pTiO₂.

Palavras-chave: Aspersão térmica. Revestimentos para barreira térmica. Revestimentos compósitos.

ABSTRACT

MACHADO, Winissius. Obtaining and characterization of composite coatings Al_2O_3 -13% pTiO_2 /nickel based alloy obtained by conventional flame thermal spray. 2016. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016

Ceramic coatings obtained by thermal spray are known by increase superficial mechanical proprieties, like hardness, wear and corrosion resistance. These coatings have large application in aerospace, oil and automotive, highlighting here your performance as thermal barrier, also known like - Thermal Barrier Coatings (TBC's). Despite finding great application these coatings present low ductility compromising the life of the coating. The conventional flame thermal spray technique is notable for the low cost and simplicity of handling. Usually composite powders have low adhesion to the substrate, to improve adhesion, metal alloys are used for bonding to the substrate. As an alternative to obtain a better adhesion coating and to maintain the thermal barrier capacity, in this work were developed composite coatings of Al_2O_3 -13% pTiO_2 /NiAlMoB. The mechanical properties of the coatings were analyzed by folding, adhesion and microhardness tests. The microstructural analysis was performed by X-ray diffraction, metallography and analysis of the thickness of the sprayed layer. The thermal insulation was evaluated by thermal conductivity test. The results indicate that the coatings obtained with the composition containing 50% NiAlMoB alloy have good thermal and mechanical properties when compared to the coating conventionally obtained using 100% Al_2O_3 -13% pTiO_2 .

Keywords: Thermal spray. Coatings. Thermal Barrier Coatings. Composite coatings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de aspersão por chama de pó.	20
Figura 2 - Formação do revestimento de aspersão térmica.	21
Figura 3 - Estrutura característica dos revestimentos aspergidos.	22
Figura 4 - Aderência do revestimento no substrato.	24
Figura 5 - Microtrincas em revestimento de Zircônia.	26
Figura 6 - Estrutura dos revestimentos gerados por aspersão por chama.	28
Figura 7 - Camadas que compõe o TBC.	29
Figura 8 - Estrutura convencional do revestimento Al_2O_3 -13%p TiO_2 + UltraBond 25000.	30
Figura 9 - Diagrama de Fases TiO_2 - Al_2O_3	33
Figura 10 - Tocha de aspersão utilizada no experimento.	37
Figura 11 - Comparação entre a estrutura convencional e estrutura proposta para o revestimento.	38
Figura 12 - Parâmetros de rugosidade.	39
Figura 13 - Medidor de rugosidade superficial utilizado.	39
Figura 14 – Corpo-de-prova para dobramento.	42
Figura 15 - Padrões para avaliação das trincas em corpos-de-prova de ensaios de dobramento	43
Figura 16 - Esquema ensaio de dobramento.	44
Figura 17 - Configuração da máquina de ensaios universal para o ensaio de dobramento.	44
Figura 18 - Máquina de ensaios universal.	45
Figura 19 - Componentes do corpo de prova para ensaio de adesão.	46
Figura 20 - Dimensões do corpo-de-prova do ensaio de adesão.	47
Figura 21 – Microdurômetro que será utilizado para as medições de dureza Vickers.	48
Figura 22 - Princípio de funcionamento do ensaio de microdureza Vickers.	49
Figura 23 - Indentador e parâmetros da medição de dureza Knoop.	50
Figura 24 - Microscópio ótico utilizado para análise metalográfica.	52
Figura 25 - Representação esquemática de um difratômetro de raio X.	53
Figura 26 - Esquema do ensaio térmico.	55
Figura 27 - Corpo-de-prova chapa metálica.	58

Figura 28- Corpo-de-prova de adesão antes da aspersão térmica.	58
Figura 29 - Corpo-de-prova dobramento 2575.	59
Figura 30 - Corpo-de-prova dobramento 5050.	60
Figura 31 - Corpo-de-prova dobramento UltraBond 25000.	61
Figura 32 - Corpo-de-prova dobramento método convencional.	62
Figura 33 - Corpos-de-prova de adesão antes do ensaio de adesão.....	65
Figura 34 - Corpo-de-prova de adesão UltraBond 25000 após ensaio.	66
Figura 35 - Corpo-de-prova de adesão 2 camadas após ensaio.....	66
Figura 36 - Corpo-de-prova de adesão 5050 após ensaio.	67
Figura 37 - Gráfico comparativo entre a adesão dos corpos-de-prova.	67
Figura 38 - Metalografia da amostra com mistura 2575.	69
Figura 39 - Metalografia da amostra com mistura 5050.	70
Figura 40 - Metalografia da amostra com UltraBond 25000.	71
Figura 41 - Metalografia da amostra do método convencional.....	72
Figura 42 - Difratoograma de raios X para a mistura 2575.	73
Figura 43 - Difratoograma para a mistura 5050.....	74
Figura 44 - Difratoograma para UltraBond 25000.	75
Figura 45 - Difratoograma para o pó Al ₂ O ₃ 13%p TiO ₂	76
Figura 46 - Difratoograma para o revestimento aspergido de Al ₂ O ₃ 13%p TiO ₂	77
Figura 47 - Tempo de aquecimento x ligas aspergidas.	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos processos de aspersão.....	16
Tabela 2 - Comparativo entre os revestimentos dos processos de aspersão térmica.	17
Tabela 3 - Temperatura da chama para misturas de gases combustíveis.	19
Tabela 4 - Caracterização termomecânica dos óxidos.....	25
Tabela 5 – Características das ligações químicas dos pós.....	27
Tabela 6 - Propriedades mecânicas da alumina.	31
Tabela 7 - Propriedades do compósito Al_2O_3 -13%pTiO ₂	31
Tabela 8 - Parâmetros para aspersão por chama de Al_2O_3 -TiO ₂	32
Tabela 9 - Composição química pós a base de Al_2O_3 -13%p TiO ₂	35
Tabela 10 - Composição química UltraBond 25000.	35
Tabela 11 - Nomenclatura da mistura de pós.....	36
Tabela 12 - Critério de avaliação da espessura da camada aspergida para chapas metálicas.	54
Tabela 13 - Rugosidade dos corpos-de-prova.	57
Tabela 14 - Medições de dureza do corpo-de-prova 2575.....	63
Tabela 15 - Medição de dureza do corpo-de-prova 5050.....	63
Tabela 16 - Medição de dureza do corpo-de-prova com o método convencional.	63
Tabela 17 - Medições de dureza do corpo-de-prova UltraBond 25000.	63
Tabela 18 - Espessura da camada aspergida dos corpos-de-prova de adesão.....	64
Tabela 19 -Espessura da camada aspergida dos corpos-de-prova de chapas metálicas.	78

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO GERAL	13
2.2.1	Objetivos específicos	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1	ASPERSÃO TÉRMICA	15
3.1.1	Aspersão térmica por chama convencional	18
3.1.1.1	Aspersão por chama de pó	19
3.2	CARACTERÍSTICAS DOS REVESTIMENTOS	21
3.2.1	Porosidade	23
3.2.2	Adesão	23
3.2.3	Microtrincas	25
3.3	PÓS PARA ASPERSÃO TÉRMICA	27
3.4	REVESTIMENTOS PARA BARREIRA TÉRMICA	28
3.4.1	Revestimentos cerâmicos obtidos por aspersion térmica	30
4	MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1	PÓS UTILIZADOS NA ASPERSÃO TÉRMICA	35
4.2	GERAÇÃO DO REVESTIMENTO POR ASPERSÃO TÉRMICA	36
4.2.1	Preparação da superfície	38
4.3	CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE	40
4.3.1	Verificação das propriedades mecânicas do revestimento	41
4.3.1.1	Ensaio de dobramento	41
4.3.1.2	Ensaio de adesão	45
4.3.1.3	Ensaio de microdureza	47
4.3.2	Verificação das propriedades microestruturais do revestimento	51
4.3.2.1	Análise metalográfica	51
4.3.2.2	Análise por difração por raio X	52
4.3.2.3	Análise da espessura	54
4.3.3	Verificação das propriedades térmicas	54
4.3.3.1	Ensaio de condutividade térmica do revestimento	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5.1	RESULTADOS DA PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE	57

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS	59
5.2.1 Resultado do ensaio de dobramento.....	59
5.2.2 Resultados do ensaio de microdureza	62
5.2.3 Resultados do ensaio de adesão	64
5.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO REVESTIMENTO.....	68
5.3.1 Resultados da metalografia.....	68
5.3.2 Resultados da análise por difração de raio X.....	73
5.3.3 Resultados da análise de espessura camada aspergida	78
5.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS TÉRMICOS DO REVESTIMENTO	78
6 CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS.....	83
APÊNDICE A – Medidas das espessuras do corpo-de-prova chapa metálica ...	85
APÊNDICE B – Medidas das espessuras do corpo-de-prova de adesão	87
ANEXO A – Folheto técnico do produto UltraBond 25000.....	89
ANEXO B – Composição UltraBond 25000	91

1 INTRODUÇÃO

O recobrimento de superfícies é utilizado há milhares de anos pela humanidade, inicialmente apenas de maneira decorativa, porém com o passar do tempo, outras funções foram incorporadas à utilização destes revestimentos. Entre as principais funções que atualmente se espera nesses revestimentos, pode-se citar, resistência a temperatura, resistência a corrosão, resistência ao desgaste e dureza superficial.

A aspersão térmica é um processo de obtenção de revestimentos que vem passando por grandes avanços tecnológicos, possibilitando uma diversidade de materiais para revestimentos, desde metais, cerâmicos e até mesmo compósitos. Além disso, diferentes métodos de aspersão surgem, com características distintas, para se adaptar com as diferentes necessidades.

Uma das aplicações mais comuns dos revestimentos são as barreiras térmicas, recobrimentos que visam conceder resistência térmica para a superfície que será aspergida. Há décadas vem-se utilizando revestimentos para barreira térmica em vários segmentos industriais, pode-se citar a aeronáutica, aeroespacial e automobilística (LIMA, 2014). Um dos principais materiais de deposição para recobrimentos de barreira térmica são os materiais cerâmicos, a base de alumina (Al_2O_3), devido a suas propriedades térmicas, químicas e mecânicas.

Uma característica dos revestimentos cerâmicos aspergidos é a porosidade, fator que impacta diretamente na vida útil do recobrimento, sendo assim, considerado como uma limitação para a sua aplicação.

Em geral a aplicação de revestimentos cerâmicos é feita por meio de processos de aspersão a plasma, que normalmente acarretam menores porosidades no recobrimento. No entanto, é possível tal aplicação com aspersão térmica por chama, um processo de menor custo, em relação aos modelos de aspersão por plasma.

Surgiram na década de 70 os primeiros estudos sobre revestimentos cerâmicos, e com eles a utilização de camadas de ligação para garantir a aderência do material cerâmico no substrato (AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL, 2004).

Tendo em vista que o processo de aspersão térmica por chama confere menor temperatura e que nos processos convencionais usa-se realizar dois processos

de aspersão para obtenção do revestimento, o presente trabalho visa estudar os efeitos de misturas entre um pó metálico, de uma liga a base de níquel, e um pó cerâmico convencional de aspersão $(Al_2O_3)_{87} / (TiO_2)_{13}$ e o impacto dessas misturas nas propriedades finais do revestimento, tais como as propriedades de barreira térmica e mecânica. Além disso conferir ao processo de aspersão um modo mais simples de deposição de revestimentos de Al_2O_3 13%p TiO_2 .

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho possui como objetivo verificar a viabilidade da aplicação de uma liga metálica a base de níquel (NiAlMoB) na obtenção de revestimentos cerâmicos a base de Al_2O_3 -13%p TiO_2 , obtido pelo processo de aspersão térmica por chama, deste modo facilitando o processo de aplicação do revestimento.

2.2.1 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo proposto, subdivide-se o mesmo da seguinte forma:

- Realizar o processo de aspersão térmica sobre o substrato usando misturas entre os pós;
- Constatar as propriedades mecânicas do revestimento, segundo os seguintes testes e/ou ensaios: dobramento, adesão e microdureza Vickers e Knoop;
- Realizar análise microestrutural do revestimento, por meio dos seguintes testes e/ou ensaios: Análise metalográfica, análise das fases cristalinas presentes por difração de raio X e análise de espessura dos revestimentos aspergidos;
- Verificar as propriedades térmicas do revestimento e se as alterações provenientes da adição da liga à base de níquel no pó Al_2O_3 -13%p TiO_2 para obtenção de revestimentos aspergidos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ASPERSÃO TÉRMICA

Aspersão térmica, ou metalização, pode ser definida como um conjunto de processos onde materiais metálicos, ou não-metálicos, são aspergidos sobre uma determinada superfície, previamente preparada, chamada usualmente de substrato. Normalmente tais materiais são encontrados na forma de pó, ou pequenas partículas e aplicados fundidos ou semifundidos (LIMA; TREVISAN, 2007). O processo de revestimento acontece se as partículas aspergidas se deformam no impacto contra o substrato, porém isso só acontece se tais partículas estiverem em um estado físico e velocidade adequada (PAWLOWSKI, 2008).

O processo de aspersão térmica pode ser classificado pela geração de calor em dois grupos distintos (LIMA; TREVISAN, 2007):

- Grupo I – Combustão: Aspersão Térmica por Chama Convencional, Aspersão por Oxidocombustível de Alta Velocidade (HVOF), Aspersão a Frio, Aspersão por Detonação (*D-Gun*), entre outros;
- Grupo II – Elétrico: Plasma de Arco Não-Transferido (APS), Plasma de Arco Transferido (PTA), Aspersão por Arco Elétrico (EAS), entre outros.

Existem inúmeros processos de aspersão térmica, porém os mais usuais segundo Steffens e Wilden (1996 apud SULZER METCO, 2012) são:

- Aspersão térmica por chama convencional ou (*Flame Spraying - FS*);
- Aspersão térmica por plasma (*Plasma Spray - PS*);
- Aspersão térmica por arco elétrico (*Electric Arc Spraying - EAS*);
- Aspersão térmica oxidocombustível de alta velocidade (*High Velocity Oxidant Fuel - HVOF*).

A Tabela 1 apresenta características para comparação dos processos de aspersão térmica.

Tabela 1 - Características dos processos de aspersão.

Processos	Temperatura média da chama (°C)	Potência (kW)	Custo Relativo (1 a 10)	Taxa de Deposição (kg/h)	Coesão Lamelar	Teor de óxidos (%)
Chama Pó	2200	25 - 75	3	7	Baixa	6
Chama Arame	2800	50 - 100	3	9	Média	4
Arco Elétrico	5500	4 - 6	1	16	Alta	0,5 - 3
Plasma	5500	30 - 80	5	5	Alta	0,5 - 1
HVOF	3100	100 - 250	5	14	Muito alta	0,2
Plasma a Vácuo	8300	50 - 100	10	10	Muito alta	ppm

Fonte: Paredes (2009 p.34 apud Thorpe, 1993).

A partir da análise da Tabela 1, pode-se instintivamente relacionar custo e potência, ou seja, potências maiores demandam de custos de operação maior. Além disso, vale ressaltar que o processo de plasma a vácuo apresenta o maior custo, devido a necessidade de atmosfera controlada.

De modo geral, pode-se também observar que os custos estão relacionados com a qualidade do processo, uma vez que a atmosfera controlada e maior temperatura de chama, promovem um menor número de óxidos presentes na superfície do revestimento aspergido. Um número elevado de óxidos é indesejado nos revestimentos aspergidos, pois afetam diretamente a adesão, diminuindo a coesão lamelar (PAREDES, 2012).

Além das características dos processos de aspersão térmica, outro fator importante para se destacar em relação a qualidade dos revestimentos aspergidos, é os tipos de materiais (metálicos ou não-metálicos) que são usados em cada processo de aspersão. A Tabela 2 mostra algumas características dos revestimentos para cada processo de aspersão térmica disposto.

Tabela 2 - Comparativo entre os revestimentos dos processos de aspersão térmica.

Propriedade/Característica	Tipo de Revestimento	Chama de Arrame	Chama de Pó	Arco Elétrico	HVOF	Plasma arco não transferido	Plasma a vácuo
Resistência Adesiva (MPa)	Metais ferrosos	14-28	14-21	28-41	48-62	21-34	100-400
	Metais não ferrosos	7-34	7-34	14-48	48-62	14-48	400-750
	Cerâmicas	-	14-34	-	-	21-41	24-55
	Carbonetos	-	34-48	-	83	55-69	60-100
Densidade (% de material bruto equivalente)	Metais ferrosos	85 - 90	85 - 90	85 - 90	95 - 98 +	90 - 96	97 - 99 +
	Metais não ferrosos	85 - 90	90 - 95	85 - 95	95 - 98 +	90 - 95	97 - 99 +
	Cerâmicas	-	85 - 90	-	-	90 - 95 +	95 - 98
	Carbonetos	-	-	-	95 - 98 +	90 - 95 +	95 - 98 +
Dureza	Metais ferrosos	84 Ra - 35 Rc	80 Ra - 35 Rc	85 Ra - 40 Rc	90 Ra - 45 Rc	80 Ra - 40 Rc	30 - 50 Rc
	Metais não ferrosos	95 RH - 40 Rc	30 Rh - 20 Rc	40 Rh - 35 Rc	100 Rh - 35 Rc	40 Rh - 50 Rc	45 - 55 Rc
	Cerâmicas	-	40 - 65 Rc	-	-	45 - 65 Rc	50 - 70 Rc
	Carbonetos	-	45 - 55 Rc	-	55 - 72 Rc	50 - 65 Rc	50 - 70 Rc
Permeabilidade	Metais ferrosos	Alta	Média	Média	Insignificante	Média	Nenhuma
	Metais não ferrosos	Alta	Média	Média	Insignificante	Média	Nenhuma
	Cerâmicas	-	Média	-	-	Baixa - média	Insignificante
	Carbonetos	-	Média	-	Insignificante	Baixa - média	Insignificante

Fonte: Adaptado de Lima e Trevisan (2007, p. 47)

No caso dos revestimentos cerâmicos, percebe-se que nos processos de maior temperatura, como ambos os processos de plasma, obtêm-se melhores características adesivas do revestimento. Em relação a densidade do revestimento, fator que impacta diretamente na porosidade do mesmo, pode-se observar que para todos os processos que envolvem materiais de deposição cerâmicos a variação é significativa. Comparando o processo de plasma a vácuo, onde esperava-se os melhores resultados, e o processo de aspersão por chama a pó, observa-se uma diferença de cerca de 3% na densidade do revestimento. A dureza também apresenta-se sem grandes alterações entre todos os processos, porém ainda com ligeira vantagem em processos de plasma. Por fim, quanto a permeabilidade, propriedade diretamente relacionada a densidade, e conseqüentemente a porosidade, os revestimentos gerados por aspersão a plasma apresentam baixa permeabilidade em relação aos demais processos de aspersão (LIMA; TREVISAN, 2007).

3.1.1 Aspersão térmica por chama convencional

O processo de aspersão por chama convencional faz uso do processo de combustão de um gás combustível, para obter energia térmica para fundir o material do revestimento. (LIMA; TREVISAN, 2007).

Segundo Brito (2010) o acetileno é o gás combustível mais utilizado no processo por chama convencional em virtude das características térmicas da chama oxiacetilênica que consegue atingir altas temperaturas, estimasse 3100 °C, além da alta propagação da mesma.

Mendes (2010) exemplifica as temperaturas de combustão de gases na chama oxiacetilênica e outras misturas de gases, conforme apresentado a seguir na Tabela 3.

Tabela 3 - Temperatura da chama para misturas de gases combustíveis.

Gases	Temperatura (°C)
Propano + oxigênio	2640
Gás natural + oxigênio	2735
Hidrogênio + oxigênio	2690
Acetileno + oxigênio	3100

Fonte: Mendes (2010, p.38)

Lima e Trevisan (2007) destacam os principais gases combustíveis utilizados no processo de aspersão térmica por chama convencional.

As tochas de aspersão por chama, em sua maioria, são adaptadas para usar diversas combinações de gases, otimizando os custos e a qualidade do revestimento. Os gases comumente usados são: acetileno, propano, metil-acetilo-propadieno (MAPP) e hidrogênio, combinados juntamente com oxigênio (LIMA; TREVISAN, 2007, p.28).

Segundo Pawlowski (2008) os principais parâmetros do processo de forma genérica encontram-se listados a seguir:

- Razão da mistura de gás de trabalho e oxigênio: atmosfera redutora (1:1) e atmosfera oxidante (1,1:1);
- Temperatura da chama: 2727 a 3227 °C (3000 a 3500 K);
- Velocidade da chama: 80 a 100 m/s;
- Distância recomendada para aspersão: 120 a 250 mm;

A aspersão por chama é capaz de fazer uso dos mais diversos tipos de materiais para deposição, pode-se citar: metais, cerâmicos, polímeros e inclusive refratários (AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL, 2004).

Além disso, o processo de aspersão por chama convencional é classificado de acordo com as características do material para revestimento: aspersão por chama de arame (*wire flame spraying*) e aspersão por chama de pó (*flame powder spray*) (LIMA; TREVISAN, 2007).

3.1.1.1 Aspersão por chama de pó

A energia química gerada na combustão do gás combustível mais o oxigênio é utilizado para gerar o calor da chama na tocha da pistola de aspersão, vale a pena ressaltar que as pistolas utilizadas no processo de aspersão são consideradas bastante simples e leves. A entrada do gás é axial a chama, por outro lado o pó pode

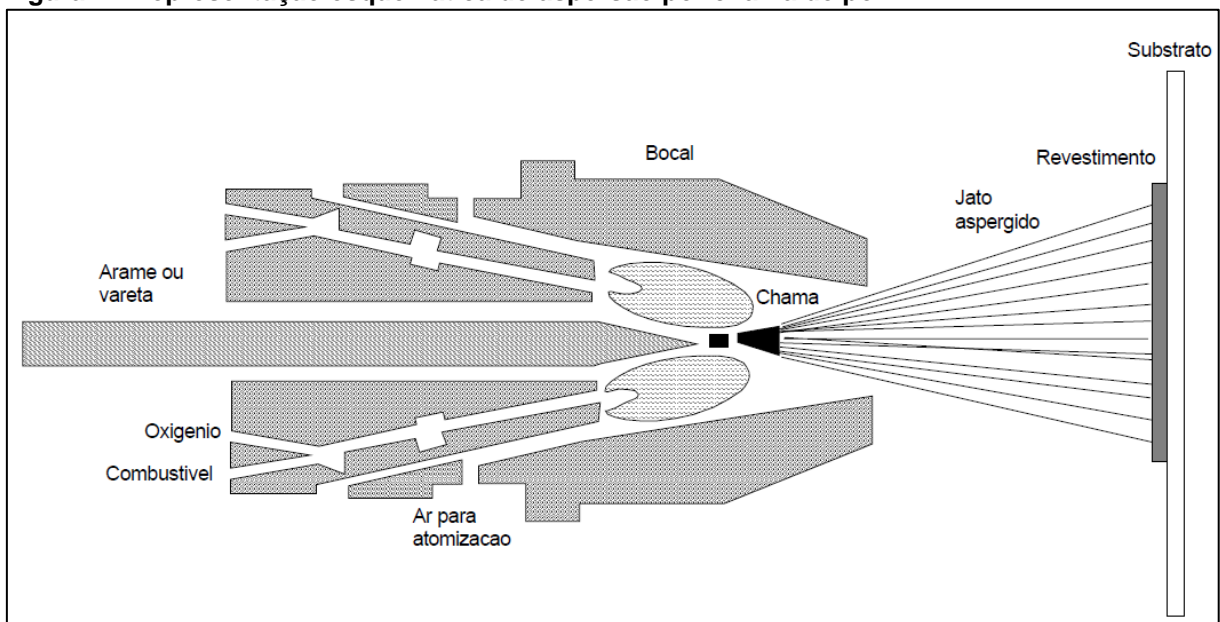
ser introduzido de forma axial ou perpendicular a tocha. As partículas acabam por se fundir na chama e são aceleradas em direção a superfície aspergida (PAWLOWSKI, 2008).

Segundo a American Society For Metals International (2004) os principais componentes de um sistema de aspersão térmica por chama são:

- Suprimento de ar;
- Suprimento de gás combustível;
- Reguladores da mistura de gás combustível, ar e/ou oxigênio;
- Controlador de fluxo de gás;
- Pistola de aspersão térmica;
- Sistema de alimentação.

A Figura 1 ilustra esquematicamente os principais componentes de um sistema de aspersão térmica por chama de pó.

Figura 1 - Representação esquemática de aspersão por chama de pó.



Fonte: Marques (2003, p.4)

A alimentação por pó apresenta uma fácil portabilidade e instalação, podendo ser armazenado em reservatórios que podem ser conectados na tocha de aspersão e são de fácil transporte. Nas tochas mais modernas a injeção do pó é feita axialmente com a utilização de alimentadores remotos, já nas mais antigas a injeção

é realizada verticalmente por meio da ação da gravidade, Figura 1 representa esse método (LIMA; TREVISAN, 2007).

Segundo Pawlowski (2008) os principais parâmetros do processo de *flame spraying* por pó são:

- Tamanho das partículas de pó: 5 a 100 μm ;
- Taxa de alimentação: 50 a 100 g/min;
- Injeção de pó: vertical (tochas mais antigas) e axial (tochas modernas);
- Alimentação do pó: gravitacional (tochas mais antigas) e axial (tochas modernas);
- Taxa de fluxo de gás de transporte: 3 a 5 L/min;
- Temperatura da superfície do substrato recomendada: 100 a 200 $^{\circ}\text{C}$ (273 a 473 K);

3.2 CARACTERÍSTICAS DOS REVESTIMENTOS

Revestimentos são formados a partir do impacto de um jato de partículas no substrato, idealmente todas as partículas que se chocam com o substrato estão fundidas, porém na prática não é isso que ocorre, partículas não totalmente fundidas se chocam com o substrato reduzindo a eficiência da adesão (MCPHERSON, 1989).

Diversos fatores impactam nas características dos revestimentos gerados por aspersão térmica, pode-se citar: distribuição das partículas aspergidas, tempo de solidificação, características do gás utilizado no processo de aspersão, pressão, substrato a ser aspergido, rugosidade superficial e limpeza do substrato (LIMA; TREVISAN, 2007).

A Figura 2 exemplifica a formação do revestimento de forma simplificada.

Figura 2 - Formação do revestimento de aspersão térmica.

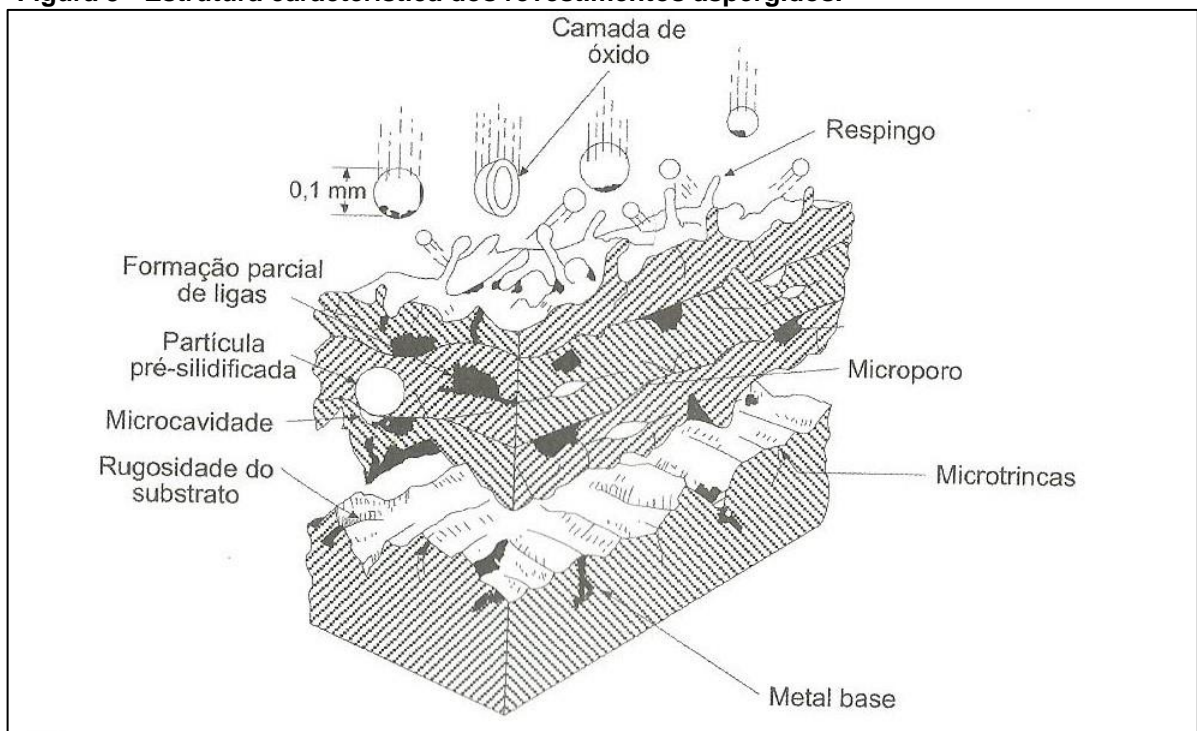


Fonte: Mendes (2010, p.28)

A grande dificuldade dos estudos na formação de revestimentos é o controle da deformação mecânica, achatamento das partículas aspergidas, e também a solidificação das mesmas (MCPHERSON, 1981).

Segundo Lima e Trevisan (2007) o choque das partículas com o substrato gera uma macroestrutura lamelar onde as partículas de revestimento aderem as irregularidades da superfície do substrato. A Figura 3 representa a estrutura característica do revestimento.

Figura 3 - Estrutura característica dos revestimentos aspergidos.



Fonte: Lima e Trevisan (2007, p. 70)

A

Figura 3 consegue representar as diversas camadas que formam o substrato, além de trazer à tona fatores de grande importância na aplicação do revestimento sobre a superfície do substrato, como a rugosidade da superfície, a presença de microtrincas e impurezas na superfície que será aspergida. As gotículas fundidas provenientes da aspersão se chocam e solidificam em contato com o substrato, gerando a característica estrutura lamelar. É possível ver na

Figura 3 os principais defeitos presentes nos revestimentos aspergidos, sendo eles: microporos, respingos, camadas de óxidos, entre outros. A quantidade e a forma que tais defeitos aparecem no revestimento implicam diretamente nas propriedades do mesmo (LIMA; TREVISAN, 2007).

3.2.1 Porosidade

O estudo da porosidade dos revestimentos é de grande valia no processo de caracterização dos revestimentos aspergidos, visando que as camadas aspergidas no geral apresentam porosidade em torno de 20% em sua estrutura, dependendo do material aspergido e condições de aspersão (MCPHERSON, 1989).

Segundo Pawlowski (2008) e Mendes (2010) os revestimentos podem apresentar duas formas de porosidade com as seguintes características:

- Porosidade macroscópica, ou porosidade grosseira: apresenta tamanhos na faixa de décimos de nanômetros até décimos de micrômetros. A formação dos poros grosseiros acontece durante o processo de deposição do revestimento, em função do preenchimento incompleto dos espaços intersticiais presentes no substrato, e também durante os tratamentos pós aspersão térmica.
- Porosidade fina ou porosidade microscópica: apresenta tamanho da ordem de nanômetros. A porosidade fina é produto das características do revestimento aspergido e se formam quando a partícula aspergida não consegue molhar completamente as partículas já presentes nas camadas superiores do substrato, sendo assim surge então uma lacuna entre as duas camadas.

A distribuição do tamanho das partículas, manufatura do pó para aspersão e o grau de fusão das partículas aspergidas são os fatores que mais influenciam na porosidade do revestimento (AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL, 2004).

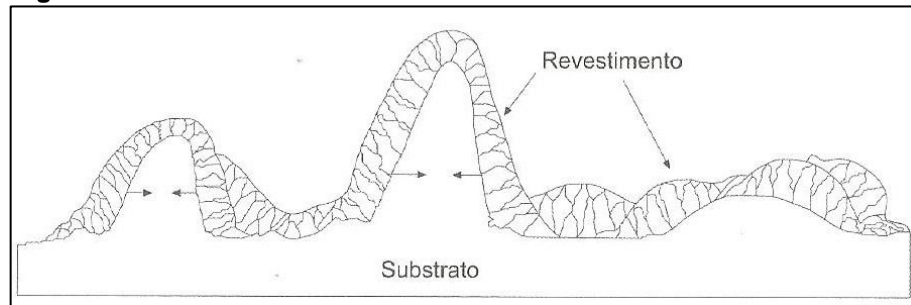
Normalmente a porosidade acaba por comprometer as propriedades mecânicas, térmicas e elétricas dos revestimentos, pode-se citar como propriedades afetadas pela porosidade: condutividade térmica, condutividade elétrica e módulo de elasticidade (LIMA; TREVISAN, 2007)

3.2.2 Adesão

Adesão é o processo mecânico pelo qual a camada aspergida adere ao substrato. As partículas aspergidas se fixam as irregularidades do substrato, com as

sucessivas partículas se chocando com a superfície formando então as camadas, sendo que o conjunto dessas camadas formam o revestimento (PAWLOWSKI, 2008). A Figura 4 representa a adesão do revestimento sob o substrato.

Figura 4 - Aderência do revestimento no substrato.



Fonte: Lima e Trevisan (2007, p. 73)

O mecanismo de adesão é o produto da combinação de três mecanismos. O primeiro mecanismo é a deformação mecânica que as partículas aspergidas sofrem ao se chocarem contra o substrato. O segundo mecanismo é o processo químico/metalúrgico proveniente do calor gerado durante esse choque que pode acabar fundindo as partículas ou gerando processos chamados de microsoldagem. Por fim o terceiro mecanismo, considerado um mecanismo secundário, são as ligações de Van der Waals que podem ou não ocorrer durante os dois outros mecanismos (CORTÉS; BUSCHINELLI; PIZA, 2000)

A área de contato do substrato com as partículas aspergidas é chamada de zona ativa, onde as resistências adesivas e coesivas de um revestimento são diretamente dependentes da área de zona ativa (LIMA; TREVISAN, 2007).

Segundo Pawlowski (2008) as áreas das zonas ativas diminuem pelos seguintes motivos:

- Óxidos no revestimento;
- Ar e/ou gás de trabalho dissolvido nas partículas fundidas;
- Ar e/ou gás preenchendo as vacâncias e/ou poros no substrato.

É de conhecimento que as camadas do revestimento, lamelas, não estão em contato perfeito com o substrato/superfície. Esse fato ocorre, principalmente, devido a existência de lamelas e/ou camadas de impurezas e/ou óxidos presentes entre a estrutura lamelar (LIMA; TREVISAN, 2007).

Como visto previamente na literatura segundo Pawlowski (2008), a ideia de Lima e Trevisan (2007) reforçam a ideia de que os óxidos são o principal fator que dificulta a adesão do revestimento no substrato.

Um fator de grande importância na facilidade de fusão do material que será aspergido é o calor latente, ou seja, calor por unidade de volume. Além disso, pode-se dizer que a permanência da partícula que será aspergida é proporcional a $\rho^{-1/2}$, onde ρ é a densidade da partícula. A Tabela 4 apresenta características térmicas para alguns materiais, uma delas é o fator de dificuldade de fusão, baseado na densidade e calor latente de fusão (DMF). Conclui-se $DMF = \Delta H_m \rho^{-1/2}$ (MCPHERSON, 1981).

Tabela 4 - Caracterização termomecânica dos óxidos.

MATERIAL	PONTO DE FUSÃO (°C)	DENSIDADE (g/cm ³)	CALOR LATENTE DE FUSÃO ΔH_M (cal/cm ³)	DIFICULDADE DE FUSÃO DMF $\Delta H_M (\rho^{-1/2})$
Al ₂ O ₃	2050	4	3900	1450
Zr ₂ O ₃	2715	5,6	3470	1446
TiO ₂	1870	4,3	2550	1214
Cr ₂ O ₃	2265	5,2	2600	1130
Fe	1536	7,9	2177	780
Mo	2619	10,2	2233	700
W	3427	19,35	2709	616

Fonte: MCPHERSON (1981, p. 300)

Segundo a Tabela 4 pode-se observar que os óxidos utilizados como materiais de deposição para revestimentos possuem temperaturas de fusão menores, porém apresentam dificuldade de fusão (DMF) superiores a metais refratários, isto devido aos óxidos possuírem baixa densidade e calor de fusão elevado (LIMA; TREVISAN, 2007)

Para evitar a possível presença de impurezas na superfície do substrato que será aspergido, e conseqüentemente o comprometimento das propriedades térmicas, elétricas e mecânicas do revestimento e substrato, a preparação da superfície demonstra sua importância para o procedimento adequado da aspersão térmica (LIMA; TREVISAN, 2007).

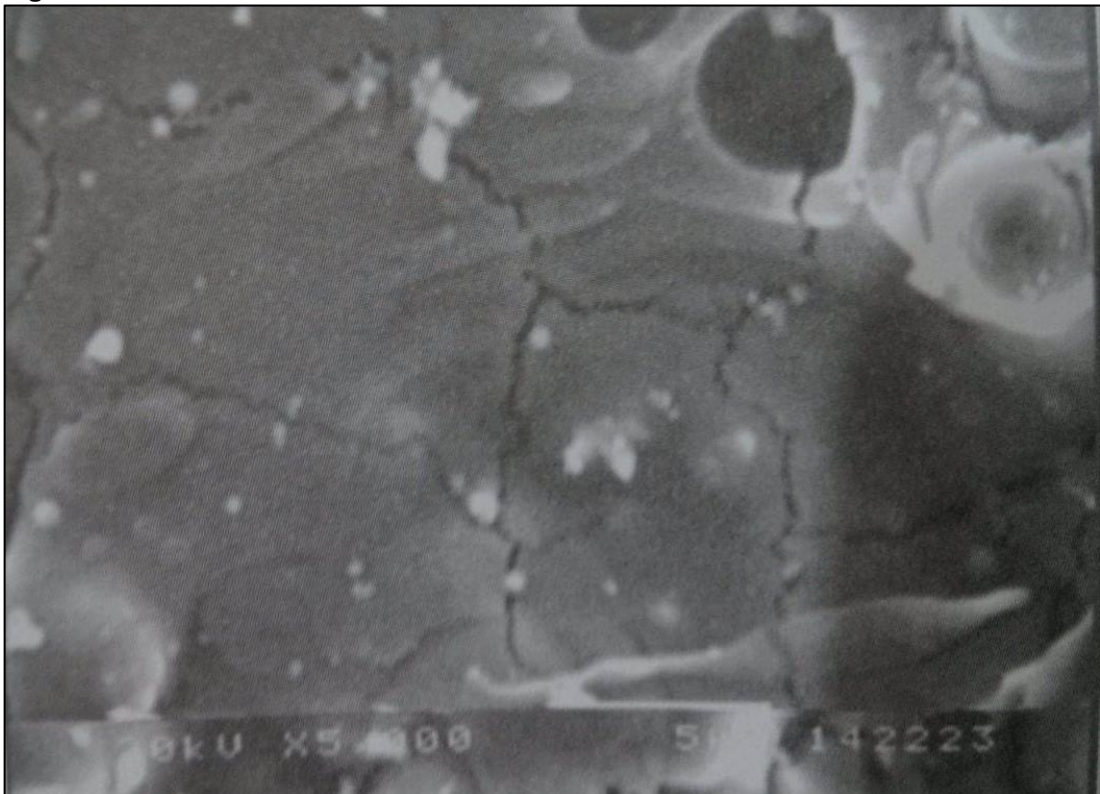
3.2.3 Microtrincas

Segundo Lima (1996 apud Mendes, 2010) são encontradas microtrincas em revestimentos aspergidos, entretanto apenas em revestimentos de origem

cerâmica tal fenômeno não é totalmente indesejado. As microtrincas formam uma pequena camada perpendicular ao plano das lamelas do revestimento e até um certo grau estas microtrincas acabam sendo benéficas ao revestimento, pois funcionam como uma barreira para o crescimento de trincas maiores, tornando o revestimento mais resistente a fadiga e deformação. Porém, se o número de microtrincas for muito elevado pode acabar por comprometer as propriedades mecânicas do revestimento.

A Figura 5 detalha como são vistas as redes de microtrincas com auxílio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) (LIMA; TREVISAN, 2007).

Figura 5 - Microtrincas em revestimento de Zircônia.



Fonte: Lima e Trevisan (2007, p. 78)

As barreiras térmicas, ou revestimentos aspergidos que funcionam como barreira térmica, podem ser aperfeiçoados com um controle eficaz da porosidade e das microtrincas (ANTOU et al., 2003).

3.3 PÓS PARA ASPERSÃO TÉRMICA

Os pós são um dos principais materiais usados na deposição na aspersão térmica. As características dos pós influenciam diretamente na qualidade dos revestimentos, sendo assim faz-se necessário a caracterização precisa dos mesmos. Pode-se classificar as propriedades dos pós em químicas e físicas. As principais características físicas dos pós são (PAWLOWSKI, 2008):

- Granulometria;
- Morfologia;
- Densidade;
- Fluidez;
- Propriedades térmicas.

A granulometria é a área responsável pelas características do tamanho das partículas do pó. Normalmente o pó para aspersão tem limites superiores e inferiores para tamanho de partícula. Pode-se citar, por exemplo, que a distribuição de tamanho de partículas do pó para aspersão a plasma deve apresentar no mínimo 80% de suas partículas entre 10 e 44 μm permitindo 10% de partículas acima de 44 μm e 10% abaixo de 10 μm (AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL, 2004).

Segundo Holleck e Schier (1995 apud Pawlowski, 2008) a ligação química é a propriedade de maior influência no revestimento, se tratando de propriedades químicas. Pode-se relacionar tais características conforme disposto na Tabela 5.

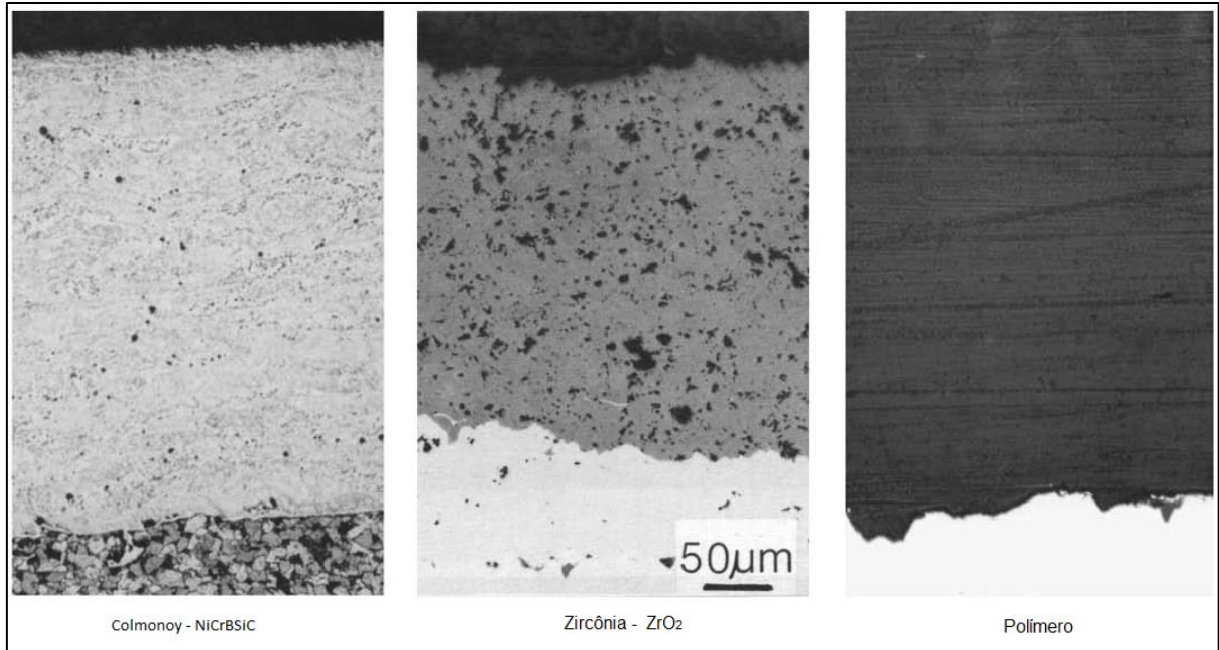
Tabela 5 – Características das ligações químicas dos pós.

Tipo de Ligação	Características
Ligação Iônica	Encontradas principalmente em materiais inertes e quimicamente estáveis, como Al_2O_3 e ZrO_3
Ligação Covalente	Encontradas principalmente em materiais duros e resistentes, como diamantes, SiC e Si_3N_4
Ligação Metálica	Encontrado principalmente em ligas metálicas, e alguns carbetos, como WC, TiC, TaN e CrN

Fonte: Holleck e Schier (1995 apud Pawlowski, 2008)

A Figura 6 representa diferentes estruturas de revestimento para diferentes materiais de deposição (AMERICAN WELDING SOCIETY, 2004).

Figura 6 - Estrutura dos revestimentos gerados por aspersão por chama.



Fonte: Adaptado de American Society For Metals International (2004, p. 56)

Segundo American Society For Metals International (2004), a camada de revestimento metálico, neste caso NiCrBSiC/Colmonoy, feito por aspersão por chama e depois passando por um processo de refusão, supõe que os óxidos presentes na camada são todos provenientes das características oxidantes do processo de aspersão por chama. A camada de cerâmica de Zircônia foi gerada por aspersão térmica por plasma, apresenta uma grande quantidade de poros. Por fim no revestimento polimérico, gerado por aspersão térmica por chama, podemos ver uma estrutura densa e bem ligada com o substrato

3.4 REVESTIMENTOS PARA BARREIRA TÉRMICA

Revestimentos para barreira térmica, comumente chamados de *Thermal Barrier Coatings* (TBC) são uma das mais tradicionais aplicações de revestimentos no ramo industrial. O TBC consiste na aplicação de uma camada, revestimento, sobre uma superfície com o intuito de funcionar como um revestimento térmico. Atualmente

suas principais aplicações industriais são como revestimentos de turbinas a gás e motores diesel (LIMA, 2014)

Geralmente revestimentos cerâmicos e metálicos são utilizados em conjunto devido a diferença de condutividade térmica entre os dois materiais, desta forma aumentando a vida útil do conjunto (OLIVEIRA; DUARTE, 2013).

Normalmente o TBC é composto, normalmente de camadas distintas. A primeira é o substrato, a superfície onde será aplicado o recobrimento. A segunda é uma camada de material metálico, que recebe o nome de camada de ligação (*bond coat*). A terceira é a camada externa cerâmica (*top coat*). Além disso, para certos substratos uma camada de óxido termicamente crescido (*thermally grown oxide - TGO*), pode ser localizada na interface entre a camada de ligação e terceira camada, gerada durante o período de exposição a alta temperatura (LIMA, 2014).

A Figura 7 demonstra a disposição das camadas que formam o TBC sobre uma liga de níquel.

Figura 7 - Camadas que compõe o TBC.

	Camada	Função	
$ZrO_2 + (6-8\%)Y_2O_3$ Al_2O_3 MCrAlY (20%Cr-12%Al)	Camada Externa Cerâmica	Isolamento Térmico	TBC
	TGO	Barreira de oxidação	
	Camada de Ligação	Ligação das Camadas e Proteção Contra Óxidos	
Super liga de Níquel	Substrato		

Fonte: Adaptado de Moskal (2009, p.324)

Top Coat é a região externa do revestimento, normalmente cerâmica e visando resistência térmica. Para *top coats* cerâmicos a espessura encontra-se normalmente na faixa de 250 a 375 μm (MOSKAL, 2009).

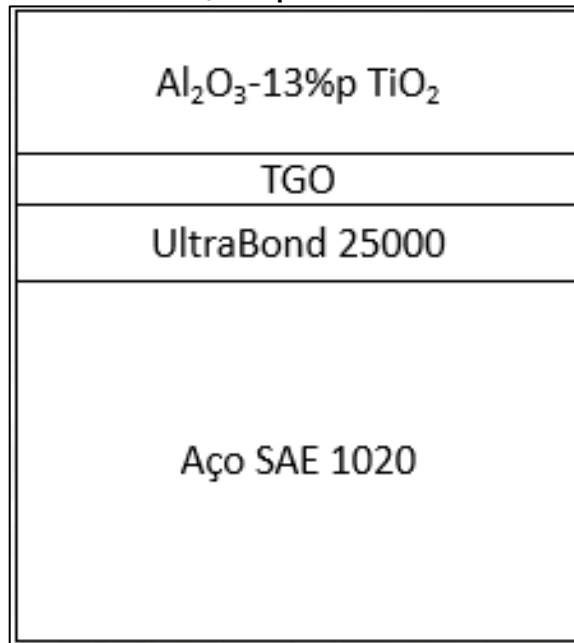
A camada de óxido termicamente crescido, TGO, difere das outras camadas do revestimento por não ser um revestimento depositado, esta camada se forma a partir da oxidação que ocorre entre a *bond coat* e a *top coat*. A função principal

do TGO é garantir a aderência entre os dois revestimentos (cerâmico e metálico) e dificultar a oxidação da *bond coat* (SUCHARSKI, 2012).

O *bond coat* é a camada de ligação entre o substrato e o *top coat* e apresenta duas funções bem definidas, garantir a aderência do revestimento cerâmico no substrato e proteger o substrato da corrosão a quente e oxidação (SUCHARSKI, 2012).

No presente trabalho, a estrutura convencional para um revestimento aspergido, obtido a partir dos pós UltraBond 25000 e Al_2O_3 -13%p TiO_2 é demonstrada na Figura 8.

Figura 8 - Estrutura convencional do revestimento Al_2O_3 -13%p TiO_2 + UltraBond 25000.



Fonte: Autoria própria.

3.4.1 Revestimentos cerâmicos obtidos por aspersão térmica

Materiais cerâmicos são os principais tipos de materiais usados como revestimentos para barreira térmica aspergidos. Normalmente materiais cerâmicos são utilizados na forma de pó para aspersão, devido a sua fragilidade que dificulta a confecção de arames (BRITO, 2010).

A alumina (Al_2O_3), ou óxido de alumínio é um material cerâmico conhecido por sua estabilidade química e robustez. A dureza da alumina é extremamente alta, resultando em uma baixa resistência. Aditivos podem ser adicionados a alumina para

aumentar características desejáveis no material. Um exemplo desses aditivos é o óxido de titânio (TiO_2), material que aumenta consideravelmente a resistência a fratura da alumina (KUMARI, 2013).

A Tabela 6 mostra as principais propriedades mecânicas da alumina na faixa de 99 a 99,9% de pureza.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas da alumina.

Propriedade	Valor
Dureza (GPa)	15 - 16
Resistência a flexão (MPa)	550
Resistência a tração (MPa)	310
Resistência a compressão (MPa)	3790
Resistência a fratura (MPa)	4
Módulo de elasticidade (GPa)	330 - 400

Fonte: Kumari (2013, p.6)

A Tabela 6 ressalta a elevada dureza da alumina, além de sua baixa resistência a fratura, característica clássica dos cerâmicos (KUMARI, 2013).

Normalmente revestimentos compostos de 87%p Al_2O_3 e 13%p TiO_2 são aplicados pelos processos de aspersão por plasma e aspersão por chama (KUSOGLU et al., 2005). Tais recobrimentos são utilizados para aumentar a resistência a desgaste, corrosão e erosão de aços. Na aspersão por plasma desse tipo de compósito, um típico exemplo de pó usado para esse método é o Metco-130 da companhia Sulzer Metco, apresenta diâmetro entre 30 e 50 μm (BANSAL; PADTURE; VASILIEV, 2003)

A Tabela 7 mostra as principais propriedades mecânicas do compósito Al_2O_3 -13%p TiO_2 .

Tabela 7 - Propriedades do compósito Al_2O_3 -13%p TiO_2 .

Propriedade	Valor
Resistência a flexão (MPa)	23,53
Dureza Vickers (GPa)	12,63
Densidade a 1600 °C (g/cm^3)	3,589
Densidade Relativa	91,09
Fases Presentes Al_2O_3 - Al_2TiO_3 - TiO_2 (%)	85-9-6

Fonte: Adaptado de Kumari (2013)

Comparando as Tabelas 6 e 7, é possível ver os efeitos causados pela adição de óxido de titânio (TiO_2) na alumina (Al_2O_3). Conforme aumenta a adição do

óxido de titânio o compósito tende a reduzir sua dureza. A partir da Tabela 7 percebe-se que o compósito com até 13%p de TiO_2 mantém-se como um material de dureza alta. Outra propriedade mecânica que apresenta a maior mudança, é a redução da resistência a flexão, devido a formação de titanato de alumínio (Al_2TiO_5) (KUMARI, 2013).

A Tabela 8 mostra os principais parâmetros da aspersão por chama, onde Al_2O_3 é aplicado como *top coat*, sobre uma *bond coat* de NiCrMo (KUSOGLU et al., 2005).

Tabela 8 - Parâmetros para aspersão por chama de Al_2O_3 - TiO_2 .

Parâmetros da aspersão	NiCrMo	Al_2O_3 - TiO_2
Velocidade de alimentação de pó (lb/min)	4	4
Distância do jato (mm)	150	120 - 150
Pressão do oxigênio (bar)	0,4	0,4
Pressão do gás combustível (bar)	0,7	0,7
Tamanho das partículas do pó (μm)	65 - 125	45 - 60

Fonte: Adaptado de Kusoglu et al.,(2005, p.1174)

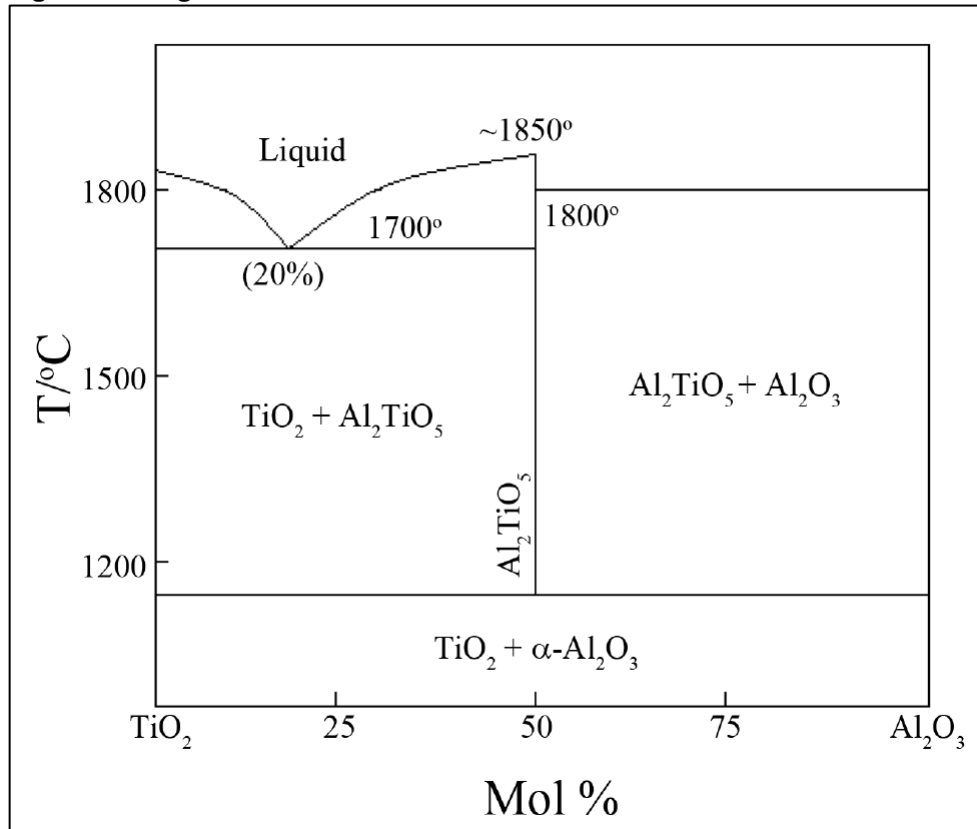
É possível ver na Tabela 8 uma grande semelhança entre os parâmetros para aplicação da *bond* e *top coat*, ou seja, da camada de Al_2O_3 - TiO_2 e NiCrMo, as maiores diferenças se verificam no tamanho de partículas de cada pó e ligeiramente na distância do jato de aspersão (KUSOGLU et al., 2005).

Para ser utilizado como em sistemas TBC, como *top coat*, um material cerâmico deve possuir algumas propriedades específicas, são elas: baixa condutividade térmica, coeficiente de expansão próximo ao do material utilizado na *bond coat*, alto ponto de fusão, propriedades mecânicas boas em temperaturas elevadas (OLIVEIRA; DUARTE, 2013).

Um dos principais componentes do TGO é a alumina alfa (α - Al_2O_3), uma polimorfia da alumina, gerado normalmente por um efeito de difusão do oxigênio para dentro do revestimento, entretanto o oxigênio pode vir da atmosfera ou da própria composição das outras camadas do revestimento (SUCHARSKI, 2012). Porém também é encontrado as fases γ , δ e θ , que são meta estáveis. Porém a fase α é a fase da alumina mais desejada devido a sua relativamente alta resistência a corrosão, resistência química e dureza (WANG et al., 2000).

O diagrama de fases da Figura 9 exemplifica as principais fases presentes no compósito Al_2O_3 - TiO_2 .

Figura 9 - Diagrama de Fases TiO₂ - Al₂O₃.



Fonte: Abali (2011 apud KUMARI, 2013, p.9).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PÓS UTILIZADOS NA ASPERSÃO TÉRMICA

Para a deposição do revestimento, serão utilizados dois pós para aspersão, um composto Al_2O_3 -13%p TiO_2 e uma liga a base de níquel. Ambos os pós serão misturados, onde o composto a base de alumina será a matriz predominante visando que o revestimento não perca as características de barreira térmica comum dos revestimentos de Al_2O_3 .

O pó composto utilizado é fornecido pela empresa Saint-Gobain, poderá ser utilizado o #103, #106 ou #107 Alumina Titânia. Segundo o próprio fabricante tais pós são equivalentes ao de outra empresa produtora de pós, a empresa Metco. A Tabela 9 mostra algumas características desses pós. Onde o Amdry 6228, da Metco equivale ao #106 da Saint-Gobain e o Metco Amdry 6224 ao #107 Saint-Gobain.

Tabela 9 - Composição química pós a base de Al_2O_3 -13%p TiO_2 .

Pó	Al_2O_3 (%)	TiO_2 (%)	SiO_2 (máximo) (%)	Fe_2O_3 (máximo) (%)	MgO (máximo) (%)	CaO (máximo) (%)
Amdry 6224	87 - 85	12 - 14	0,5	0,2	0,2	0,1
Amdry 6228	87 - 85	12 - 14	0,5	0,2	0,2	0,1

Fonte: Adaptado de catálogos Metco.

O pó metálico a base de níquel utilizado é fornecido pela empresa Eutectic + Castolin, de tipo UltraBond 25000. A Tabela 10 mostra a composição do mesmo.

Tabela 10 - Composição química UltraBond 25000.

Elemento Químico	% em peso
Alumínio (Al)	5,550
Boro (B)	0,040
Molibdênio (Mo)	5,130
Níquel (Ni)	89,280

Fonte: Adaptado de catálogos Eutectic + Castolin

Pode-se citar ainda como características da aplicação do revestimento de UltraBond os seguintes parâmetros:

- Dureza superficial entre 72 e 84 Rockwell B;
- Limites para espessura da camada aspergida de 6,3mm;

- Temperatura máxima de serviço de 700°C;
- Temperatura de ligação inferior a 260°C;

Para facilitar o entendimento e reprodutividade do trabalho, optou-se por criar uma nomenclatura para as diferentes misturas de pós realizadas. Como visto nos tópicos anteriores, será realizada a mistura do pó UltraBond 25000 e o Saint Gobain 106.

Os primeiros 2 dígitos serão referentes a porcentagem em peso do pó UltraBound 25000 e os 2 últimos dígitos a porcentagem em peso do pó Saint Gobain 106. A Tabela 11 representa a nomenclatura das composições de pós propostas para estudo.

Tabela 11 - Nomenclatura da mistura de pós.

Nomenclatura	UltraBond 25000 (Porcentagem em peso)	Saint Gobain 106 (Porcentagem em peso)
2575	25	75
3565	35	65
5050	50	50
00100	0	100

Fonte: Aatoria própria

4.2 GERAÇÃO DO REVESTIMENTO POR ASPERSÃO TÉRMICA

Para o estudo será realizado um processo de aspersão térmica por chama convencional, onde a mistura do pó compósito e do pó a base de níquel será aspergido sobre um substrato de aço SAE1020. O processo utilizado para realizar deposição do revestimento será o RotoTec 1A, da empresa Eutectic + Castolin. A Figura 10 mostra a pistola de aspersão utilizada no processo.

Figura 10 - Tocha de aspersão utilizada no experimento.



Fonte: Autoria própria

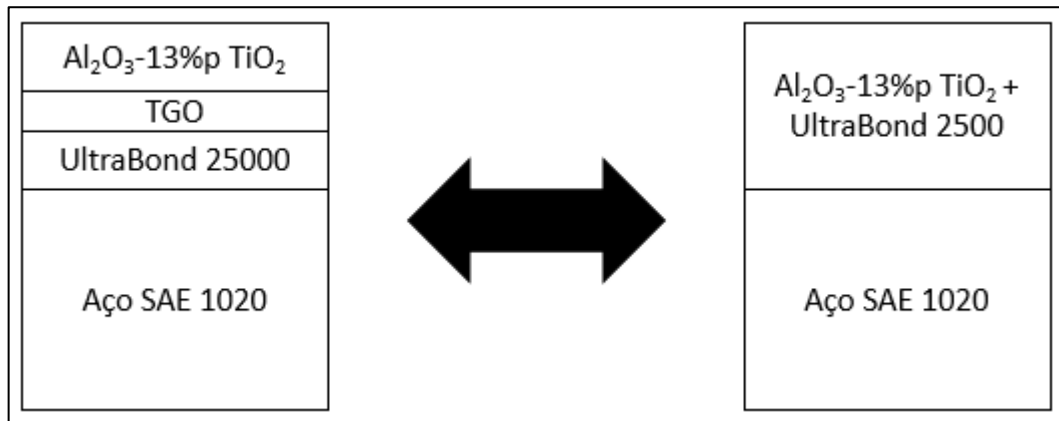
Os equipamentos necessários para o processo RotoTec 1A, segundo Eutectic + Castolin são:

- Cilindro de acetileno, regulador e manômetros;
- Cilindro de oxigênio, regular e manômetros;
- Lápis térmico indicador 95°C;
- Ferramenta de corte;
- Torno (em caso de peças cilíndricas);
- Equipamento de jateamento com granada de aço;
- Retífica para acabamento de revestimentos de maior dureza;
- Solvente para desengraxar a superfície a ser aspergida;
- Solução de proteção para áreas adjacentes a que recebera o revestimento.

Vale ressaltar que o método convencional de geração de revestimentos, propostos pela empresa Eutectic + Castolin, consiste na aplicação de um pó de ligação, neste caso UltraBond 25000, em uma camada fina sobre o substrato e então posteriormente uma camada do pó desejado (Al_2O_3 -13%p TiO_2), para mais informações ver Anexo A.

A Figura 11 demonstra a estrutura convencional do revestimento, para os pós que foram utilizados e também a estrutura proposta.

Figura 11 - Comparação entre a estrutura convencional e estrutura proposta para o revestimento.



Fonte: Autoria própria.

4.2.1 Preparação da superfície

Nesta etapa serão realizadas operações para garantir a adequação do substrato para o processo de aspersão, segundo as recomendações da empresa Eutetic + Castolin, criadora do processo, em conjunto com as normas da empresa Petrobras, N-2588 revisão B, datado de maio de 2011.

A preparação das superfícies ocorreu de acordo com as seguintes etapas:

- Limpeza da superfície;
- Texturização superficial (obtenção da rugosidade superficial por meio de lixamento) em duas etapas:
 - Jateamento com granalha de aço;
 - Lixamento.
- Pré-aquecimento com a chama da tocha de aspersão;
- Polimento com pó de diamante.

Para eliminar as impurezas da superfície foi executado o processo de limpeza, onde após tal processo a superfície deve estar limpa, com o mínimo de umidade possível, ferrugem, óleo e tintas. Nesta etapa será realizada a remoção de tais impurezas com auxílio de ácido fosfórico 40% e álcool (LIMA; TREVISAN, 2007).

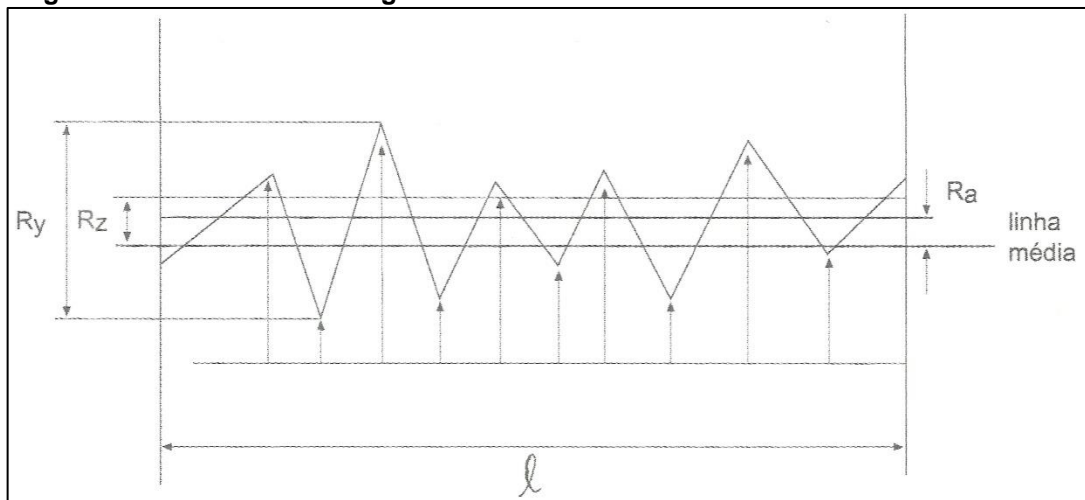
O processo de texturização deve ser realizado após a limpeza e visa promover uma determinada rugosidade na superfície, a qual é necessária para o processo de geração do revestimento por aspersão.

Segundo a norma ABNT NBR 6405, os parâmetros para avaliação da rugosidade são:

- Rugosidade média (R_a);
- Rugosidade média parcial (R_z);
- Máxima distância de pico vale (R_y).

Pode-se verificar os parâmetros R_a , R_z e R_y para um comprimento qualquer (L) esquematicamente na Figura 12.

Figura 12 - Parâmetros de rugosidade.



Fonte: Associação Brasileira De Normas Técnicas (1988)

Segundo Lima e Trevisan (2007), geralmente a rugosidade superficial apropriada para a maior parte dos revestimentos são as que apresentam R_a na faixa de 2,5 a 13 μm .

O instrumento utilizado para medida da superfície é o medidor de rugosidade superficial Mitutoyo, modelo SJ-201. A

Figura 13 mostra o medidor de rugosidade superficial utilizado, juntamente com a placa de rugosidade padrão, fornecida pelo fabricante para fins de calibração.

Figura 13 - Medidor de rugosidade superficial utilizado.



Fonte: Autoria própria

O processo de medição foi baseado no manual fornecido pelo fabricante e encontra-se listado a seguir:

- Setar o medidor de rugosidade superficial SJ-201;
- Ligar a energia de alimentação (adaptador AC ou bateria);
- Executar a medição;
- Manutenção e inspeção do medidor de rugosidade superficial SJ-201.

Os dados de entrada no medidor de dureza, para todas as medições foram:

- Cutoff: 0,8;
- Número de cutoff: 5.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DA SUPERFÍCIE

É de extrema importância caracterizar os diferentes revestimentos obtidos nos experimentos, a fim de estimar a porcentagem de pó metálico a base de níquel que deve ser misturado ao compósito Al_2O_3 -13%pTiO₂. No presente trabalho a superfície do revestimento será caracterizada da seguinte forma:

- Verificação das propriedades mecânicas;
- Verificação das propriedades microestruturais;
- Verificação das propriedades térmicas.

4.3.1 Verificação das propriedades mecânicas do revestimento

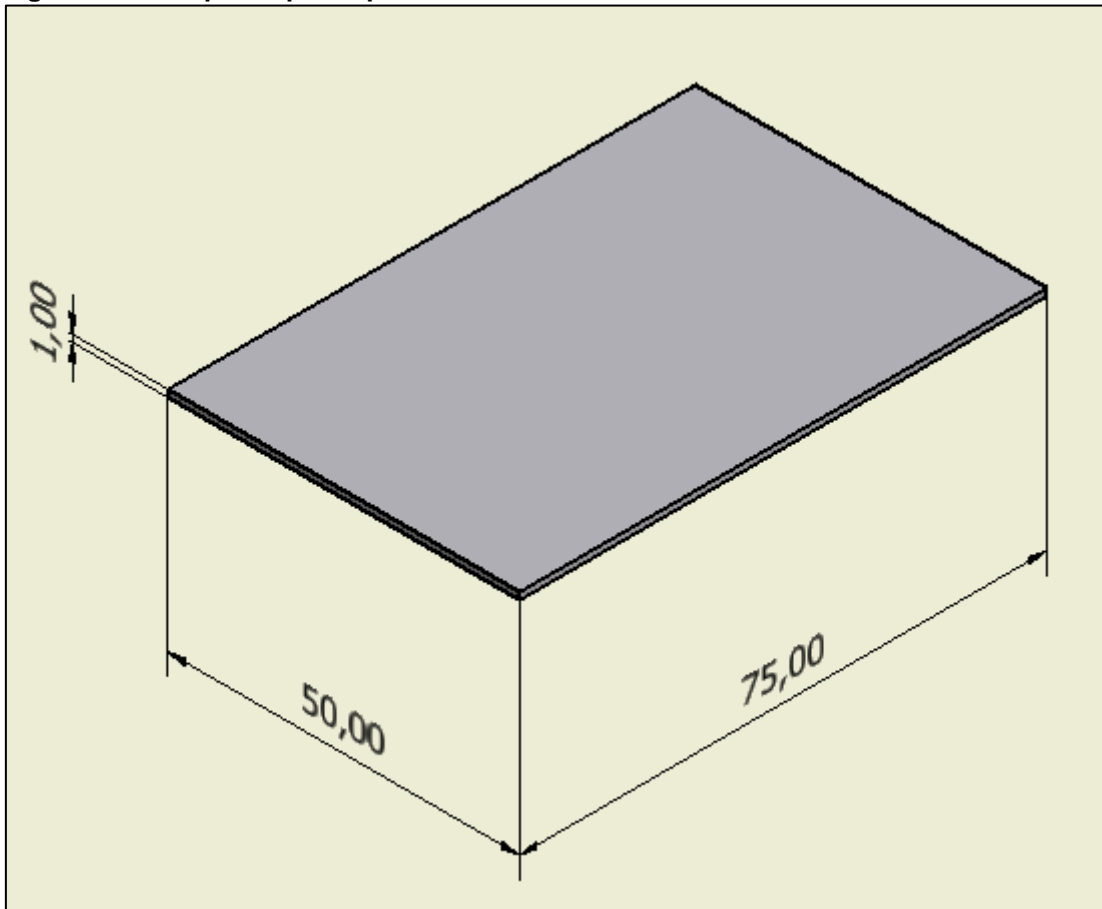
Nesta etapa foram verificadas as propriedades mecânicas dos revestimentos, obtidos para as diferentes configurações de composições. Para isso serão realizadas as seguintes verificações:

- Ensaio de dobramento;
- Ensaio de adesão;
- Ensaio de microdureza Vickers.

4.3.1.1 Ensaio de dobramento

Foram realizadas as aspersões sobre chapas de aço SAE 1020 segundo adaptado das normas propostas na N-2568 da Contec – Comissão de Normalização Técnica da Petrobras. O formato dos corpos de prova, com dimensões em milímetros, é representado na Figura 14. Os corpos de prova devem ser aspergidos em uma de suas faces mais largas (PETROBRAS, 2011).

Figura 14 – Corpo-de-prova para dobramento.



Fonte: Adaptado de Petrobras (2011)

No ensaio de dobramento o corpo de prova é posicionado bi-apoiado em suas extremidades e então uma força aplicada no seu centro até que o mesmo atinja o ângulo de 180°.

Após a execução do ensaio de dobramento, os critérios de avaliação do procedimento são (PETROBRAS, 2011):

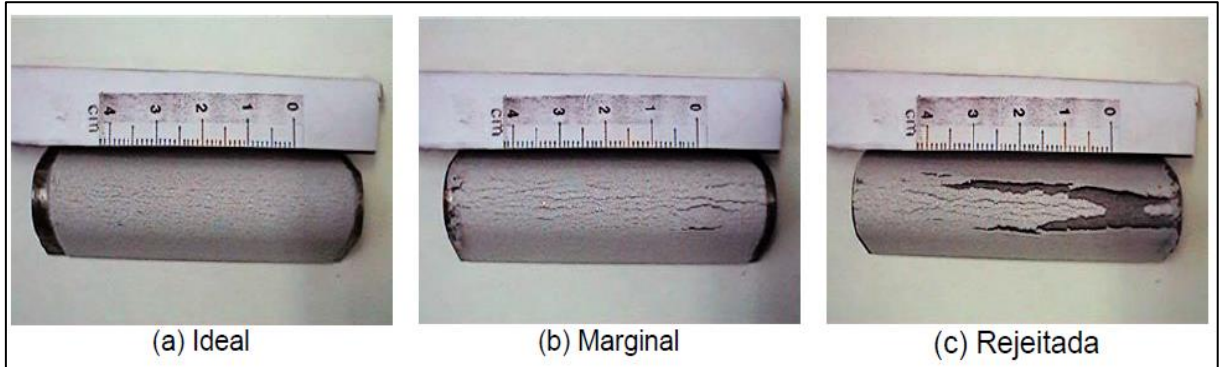
Quadro 1 - Critério de avaliação dos ensaios de dobramento.

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

Fonte: Adaptado de Petrobras (2011, p.20)

A Figura 15 exemplifica os padrões para avaliação das trincas em corpos-de-prova para ensaios de dobramento.

Figura 15 - Padrões para avaliação das trincas em corpos-de-prova de ensaios de dobramento

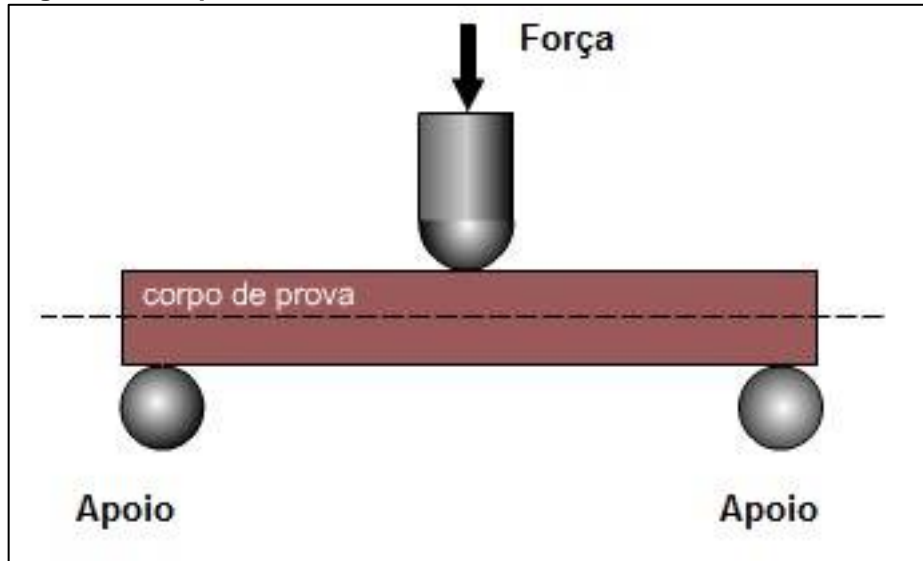


Fonte: Petrobras (2011, p.21)

A máquina de ensaios universal utilizada é comercializada oficialmente no Brasil pela empresa Aroutec Ltda, a empresa que produz a máquina é chinesa *Beijing TIME High Technology Ltda*.

O esquema do ensaio de dobramento pode ser exemplificado de acordo com a Figura 16 a seguir.

Figura 16 - Esquema ensaio de dobramento.



Fonte: Centro de informações metal mecânicas (2016)

O ensaio de dobramento foi realizado pela máquina de ensaios universal, segundo as normas da N-2568. A Figura 17 mostra a configuração que foi utilizada na máquina de ensaios universal.

Figura 17 - Configuração da máquina de ensaios universal para o ensaio de dobramento.



Fonte: Autoria própria

Para realizar o processo de dobramento, como descrito anteriormente, foi utilizado os seguintes parâmetros:

- Velocidade de avanço: 1 mm/min;
- Distância entre apoios: 30 mm.

4.3.1.2 Ensaio de adesão

O ensaio foi realizado de acordo com a Norma ASTM-C633-01 de 2008, que fornece um método de teste para determinação da força de adesão de revestimentos gerados por aspensão térmica (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010)

Os corpos-de-prova cilíndricos foram unidos por meio de um adesivo, epóxi, então separados pela força mecânica proveniente de uma máquina de ensaios universal, neste caso a mesma utilizada no ensaio de dobramento.

A Figura 18 mostra a máquina de ensaios que será utilizada neste ensaio.

Figura 18 - Máquina de ensaios universal.



Fonte: Autoria própria

O procedimento ocorreu com a carga aplicada aumentando de forma constante entre 0,0013 mm/s e 0,0021 mm/s até o ponto onde ocorrer a ruptura, então

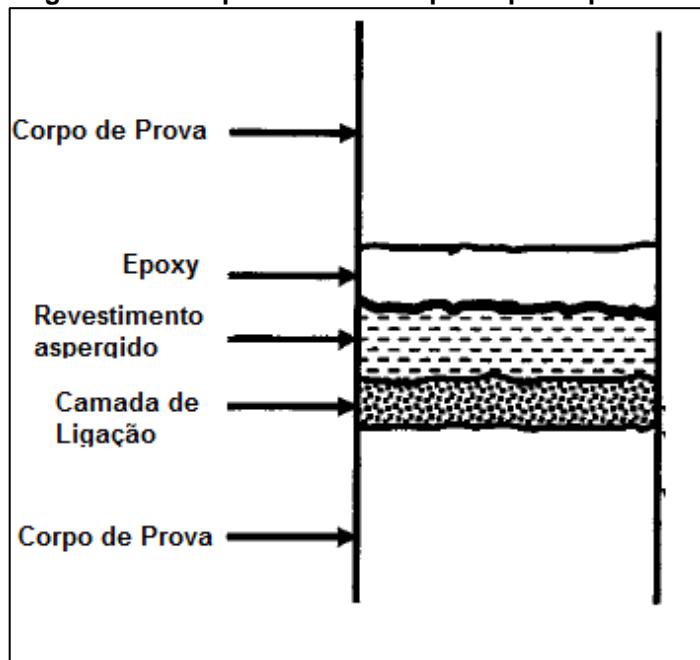
anotado o valor máximo da carga aplicada. Além disso, deve-se obter uma espessura mínima para a camada aspergida, de no mínimo 380 μm (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010).

Por fim, a força de adesão pode ser calculada relacionando a carga máxima suportada (P_{max}) e a área do corpo de prova (A), como mostra a equação a seguir:

$$\sigma_{max} = \frac{P_{max}}{A}$$

A Figura 19 exemplifica os componentes do corpo-de-prova que passou pelo ensaio de adesão:

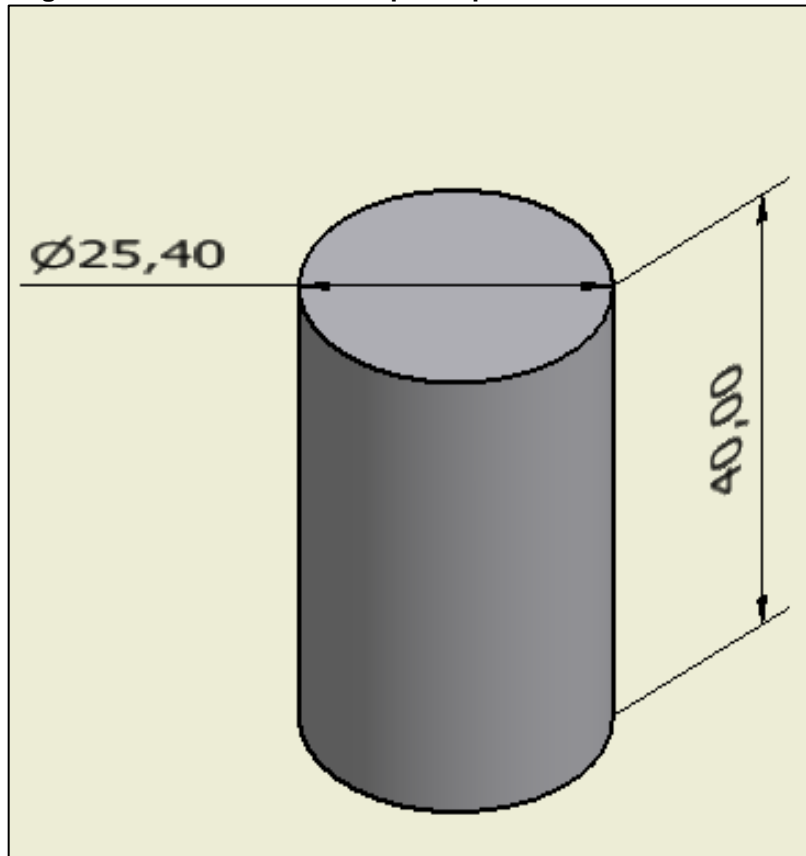
Figura 19 - Componentes do corpo de prova para ensaio de adesão.



Fonte: American Society For Testing And Materials (2010, p.5)

As dimensões úteis, em milímetros, do corpo-de-prova, segundo a norma ASTM C633 estão dispostas na Figura 20 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010).

Figura 20 - Dimensões do corpo-de-prova do ensaio de adesão.



Fonte: Adaptado American Society For Testing And Materials (2010, p.2).

4.3.1.3 Ensaio de microdureza

Para cada combinação dos pós UltraBond e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%pTiO}_2$ foi obtido um revestimento diferente, ou seja, um corpo-de-prova para cada configuração. Então foram efetuadas medições de dureza com o microdurômetro (em cada corpo-de-prova).

Para tentar reduzir o impacto da anisotropia dos revestimentos foi feito um número elevado de indentações, utilizando a média das medidas para representar a microdureza da região (LIMA; TREVISAN, 2007).

O microdurômetro utilizado é produzido pela empresa *Beijing TIME High Technology Ltda* e o modelo TH710. A Figura 21 mostra o microdurômetro a ser utilizado no processo de medição da dureza Vickers do revestimento.

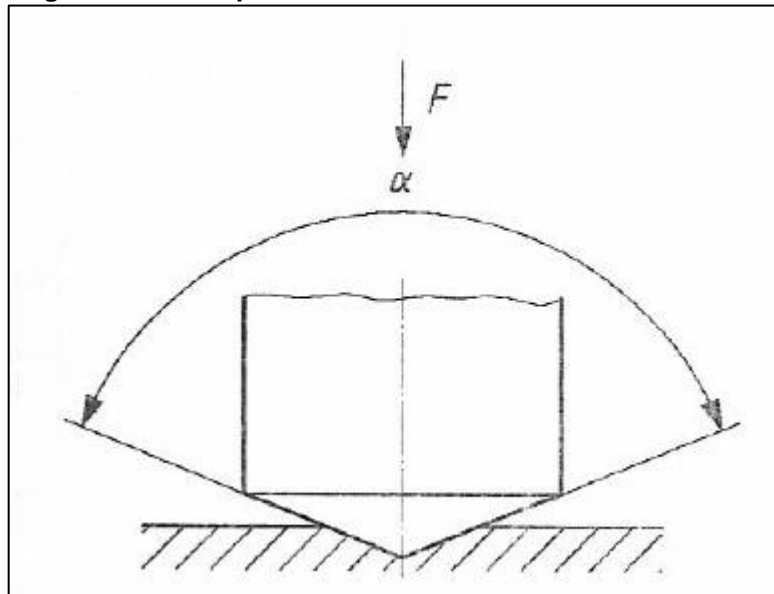
Figura 21 – Microdurômetro que será utilizado para as medições de dureza Vickers.



Fonte: Autoria própria

O processo de medição da dureza Vickers ocorreu de acordo com a Norma ISO 6507-1, onde o penetrador de diamante, no formato de uma pirâmide de base quadrada, com um ângulo de 120° é pressionado contra a superfície do corpo de prova, a Figura 22 mostra o princípio de ensaio.

Figura 22 - Princípio de funcionamento do ensaio de microdureza Vickers.



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008, p.7)

Segundo a Norma ISO 6507-1, o método pelo qual é calculado a dureza Vickers pode ser dada pela seguinte equação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008):

$$\text{Dureza Vickers} = 0,102 \times \frac{\text{Força do ensaio}}{\text{Área da penetração}}$$

Para a medição da dureza Vickers os dados de entrada no aparelho foram:

- Tempo de indentação: 15 segundos;
- Força: 0,245 N.

Visando valores elevados de dureza para as camadas predominantemente cerâmicas, foi utilizado também o método de medição de dureza Knoop.

A dureza Knoop pode ser expressa pela seguinte equação (INTERNACIONAL STANDARD, 2005):

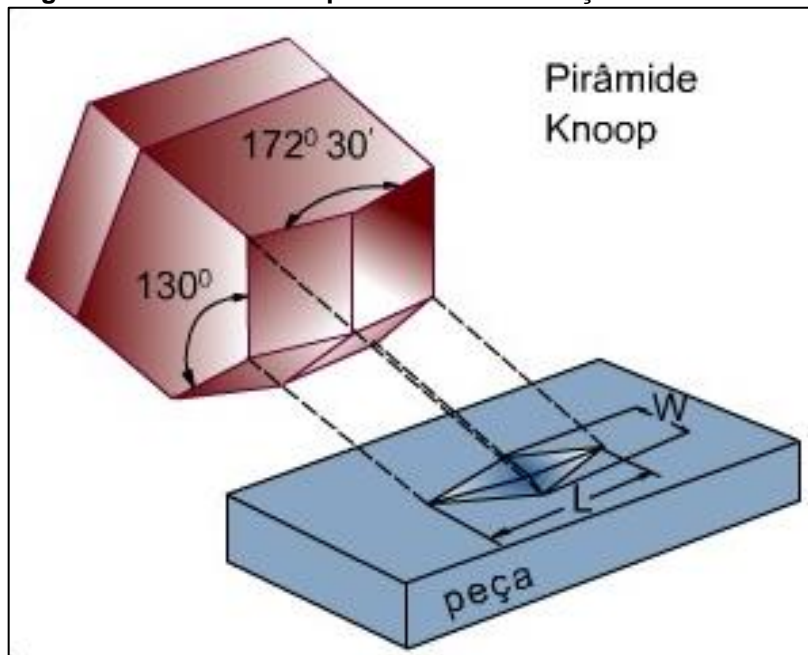
$$KN = \frac{1}{g} \times \frac{\text{Carga aplicada}}{\text{Área projetada}} = \frac{1}{g} \times \frac{F}{cd^2}$$

Onde:

- g é a aceleração da gravidade medida em kgf;
- F é a carga aplicada durante o teste;
- c é a constante do indentedor, normalmente 0,007028;
- d é o comprimento da diagonal maior em milímetros;

A Figura 23 representa os parâmetros do indentedor Knoop.

Figura 23 - Indentedor e parâmetros da medição de dureza Knoop.



Fonte: Autoria própria.

Para a medição da dureza os dados de entrada no aparelho foram:

- Tempo de indentedação: 15 segundos;
- Força: 0,245 N.

Com os parâmetros de entrada, sabe-se que o ensaio de dureza Knoop, ocorreu de acordo com a escala de força HK 0,025. Devido ao fato de não haver forma de conversão de Knoop com alta precisão, será extrapolado a conversão de Knoop HK 0,5, ou seja, Knoop com força de aplicação de 500 gf (4,903 N), para as medidas obtidas com HK 0,025, podendo assim comparar com os valores de dureza em Vickers e Knoop (INTERNACIONAL STANDARD, 2005).

4.3.2 Verificação das propriedades microestruturais do revestimento

Nesta etapa foi realizada a análise microestrutural dos revestimentos, obtidos para as diferentes composições de pós. Para isso foram realizadas as seguintes verificações:

- Análise metalográfica;
- Análise de difração por raio X;
- Análise da espessura por ultrassom.

4.3.2.1 Análise metalográfica

Após devidamente preparadas e embutidas na baquelite as amostras foram lixadas com lixas das seguintes granulometrias: 100, 220, 320, 400 e 600. Após o lixamento foram polidos os corpos de prova. No caso do estudo do revestimento aspergido não se necessita de ataque químico (BRITO, 2010).

Esta fase do processo tem por objetivo ver as características da estrutura do revestimento, analisando as fases presentes e, na medida do possível, constatar as características superficiais. Para este ensaio foram obtidas imagens com aproximações de 50x, 100x, 200x e 400x.

A Figura 24 mostra o equipamento utilizado para tais verificações.

Figura 24 - Microscópio óptico utilizado para análise metalográfica.



Fonte: Autoria própria

4.3.2.2 Análise por difração por raio X

Esta técnica foi utilizada a fim de verificar as fases cristalinas presentes nos revestimentos obtidos pela aspensão térmica por chama. Os ensaios de difração de raio X ocorreu em parceria com Pólo de Tecnologia do Sudoeste (POLITEC), localizado na UTFPR - PB.

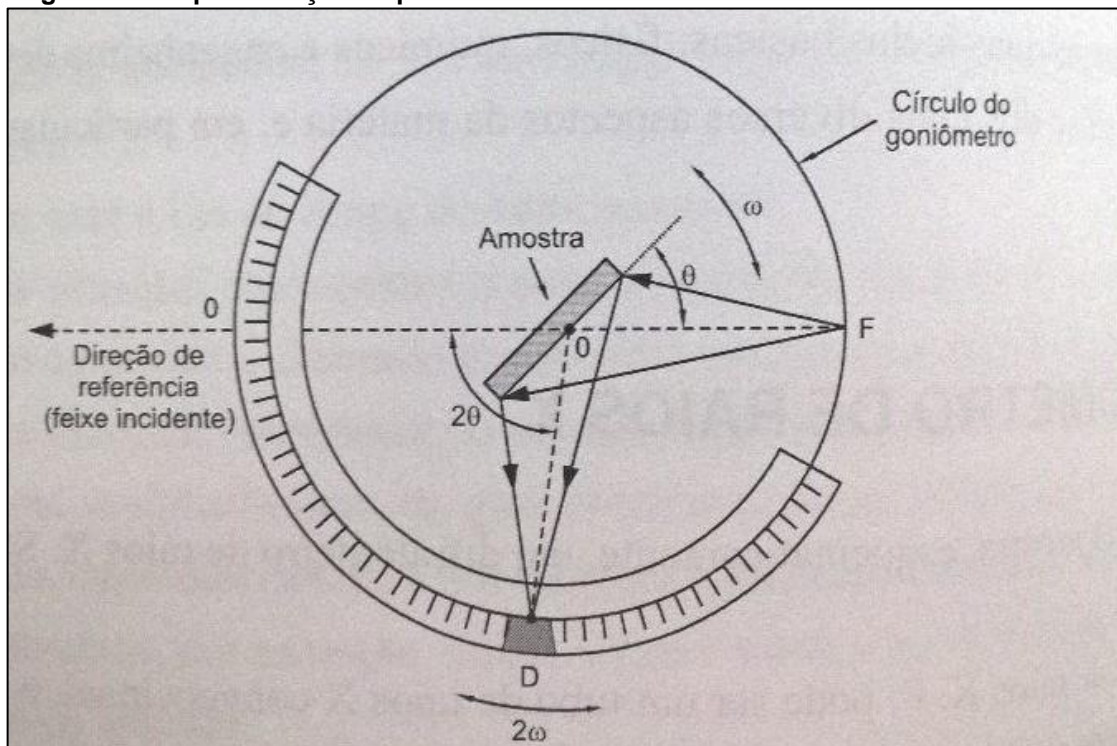
O procedimento de obtenção de um difratograma conste nos seguintes passos (RODRIGUES, 2009):

- Fixação da amostra no porta-amostra;
- Fixação do porta-amostra na mesa;

- Posicionamento do detector no início da faixa de ângulos a ser percorrida;
- Ativação dos tubos de raio x;
- Geração do feixe de raio x;
- Início dos movimentos da mesa e do detector;
- Gravação dos raios que chegam ao detector.

Os quatro principais componentes de um difratômetro de raio X são: a fonte de raio X, o detector de raio X, o goniômetro e a mesa do porta-amostra. A Figura 25 demonstra esquematicamente um difratômetro de raios x.

Figura 25 - Representação esquemática de um difratômetro de raio X.



Fonte: Rodrigues (2009, p.32)

As condições de realizado dos difratogramas realizados para todas as amostras, segundo o POLITEC, são:

- Raio X: 40kV, 15mA;
- Goniômetro: MiniFlex 300/600;
- Filtro: Nenhum;
- Detector: SC-70;
- Modo de escaneamento contínuo;

- Velocidade de escaneamento/Tempo de duração: 0,500 graus/minuto;
- Eixo de escaneamento: Theta/2-theta;
- Intervalo angular de varredura: 20,000 a 90,00°;
- Ângulo de incidência: 1,250°;
- Fenda limitadora: 10,000mm;

4.3.2.3 Análise da espessura

Nesta etapa com o auxílio de um micrômetro IP54, foi medido a espessura e do corpo-de-prova, chapa metálica SAE 1020, antes $e_{sem\ aspersão}$ e depois da aspersão $e_{após\ aspersão}$.

$$e = e_{sem\ aspersão} - e_{após\ aspersão}$$

Portanto, a espessura do revestimento é a diferença entre a medição inicial e a final, ou seja, diferença entre a medição dos corpos-de-prova antes e depois da aspersão térmica.

Para avaliação da espessura de corpos-de prova no formato chapa metálica, a norma N-2586 da Petrobras apresenta um critério de avaliação. A Tabela 12 apresenta a adaptação dessa norma para ser utilizada neste trabalho (PETROBRAS, 2011).

Tabela 12 - Critério de avaliação da espessura da camada aspergida para chapas metálicas.

Critério	Espessura do Material μm
Reprovado	< 225
Aprovado	\geq 225

Fonte: Adaptado de Petrobras (2011, p.20).

4.3.3 Verificação das propriedades térmicas

Nesta etapa foram verificadas as propriedades térmicas dos revestimentos, obtidos para as diferentes configurações de pós. Para isso, foi realizado um ensaio de condutividade térmica.

4.3.3.1 Ensaio de condutividade térmica do revestimento

Para este ensaio, os corpos-de-prova, com e sem revestimento aspergido, foram deixados em contato com a superfície aquecida, utilizando um agitador magnético, com a superfície aspergida voltada para cima. Na sequência, foi medido o tempo que a face que não estava em contato com a superfície aquecida levava para atingir a temperatura fixada de 150°C.

Para realizar este procedimento foi utilizado os seguintes equipamentos:

- Agitador magnético com aquecimento;
- Termômetro com termopar tipo K;
- Cronometro digital.

Figura 26 - Esquema do ensaio térmico.



Fonte: Autoria própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADOS DA PREPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Após a preparação em cada corpo-de-prova, foi verificado sua rugosidade, buscando conferir se tal propriedade atendia os requisitos adotados para a rugosidade R_a , conforme o item 3.2.1, ou seja, entre $2,5 \mu\text{m}$ e $13 \mu\text{m}$ (LIMA; TREVISAN, 2007).

A Tabela 13 mostra os valores para os corpos-de-prova, que foram aspergidos com a mistura 2575, e o outro que passou pelo processo de aspersão com a mistura 5050. Todos os demais corpos de prova passaram pelo mesmo processo de preparação superficial. Em todos os casos os valores de rugosidade estão dentro dos padrões estabelecidos.

Tabela 13 - Rugosidade dos corpos-de-prova.

Corpos-de-prova	Rugosidade (R_a)
Amostra 2575	5,733
	5,662
	5,349
Amostra 5050	6,233
	6,244
	6,247

Fonte: Autoria própria.

Foram confeccionados 4 corpos-de-prova para cada mistura de pó, que passaram pelo processo de aspersão térmica. Dois modelos distintos, um modelo no formato de chapa, que foi utilizado para os ensaios de dobramento e térmicos, deste modelo foram confeccionados 3 corpos-de-prova para cada mistura. O segundo modelo, de formato cilíndrico, conforme descrito na Figura 20, deste modelo foram fabricados 1 modelo apenas para cada mistura, que foi utilizado nos ensaios de adesão.

A Figura 27 mostra o modelo de corpo-de-prova no formato de chapa, antes do processo de aspersão térmica por chama convencional, mas com sua superfície já devidamente preparada.

Figura 27 - Corpo-de-prova chapa metálica.



Fonte: Autorial própria.

A Figura 28 mostra o modelo de corpo-de-prova no formato de chapa, antes do processo de aspersão térmica por chama convencional.

Figura 28- Corpo-de-prova de adesão antes da aspersão térmica.



Fonte: Autorial própria.

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Neste tópico serão apresentados os ensaios que visam caracterizar propriedades mecânicas superficiais do revestimento obtido por aspersão térmica, conforme especificado no item 3.4.1

5.2.1 Resultado do ensaio de dobramento

Para as determinadas misturas de pós foi realizado um ensaio de dobramento, segundo a norma N-2568 da Contec e visualmente avaliado o revestimento. Conforme explicitado no item 3.4.1.1.

A Figura 29 mostra o corpo-de-prova aspergido com a mistura 2575, após o ensaio de dobramento.

Figura 29 - Corpo-de-prova dobramento 2575.



Fonte: Autoria própria

A partir da análise da Figura 29 e Figura 15, pode-se afirmar que o corpo-de-prova aspergido com a mistura 2575, deveria ser rejeitado, segundo as normas da Contec, pois apresenta trincas e fendas com desgarramento e deslocamento da camada aspergida (PETROBRAS, 2011).

A Figura 30 mostra o corpo-de-prova aspergido com a mistura 5050 após o ensaio de dobramento.

Figura 30 - Corpo-de-prova dobramento 5050.



Fonte: Aatoria própria.

A partir da análise da Figura 30 e Figura 15, pode-se afirmar que o corpo-de-prova aspergido com a mistura 5050, apresenta características predominantemente ideais, segundo as normas da Contec, pois não apresenta microtrincas ou microtrincas superficiais, ou deslocamento e desgarramento da camada aspergida (PETROBRAS, 2011).

A Figura 31 mostra o corpo-de-prova aspergido com UltraBond 25000 após o ensaio de dobramento.

Figura 31 - Corpo-de-prova dobramento UltraBond 25000.



Fonte: Aatoria própria.

A partir da análise da Figura 31 e Figura 15, pode-se afirmar que o corpo-de-prova aspergido com o pó UltraBond 25000, apresenta características predominantemente ideais, segundo as normas da Contec, pois não apresenta microtrincas ou microtrincas superficiais, ou deslocamento e desgarramento da camada aspergida (PETROBRAS, 2011).

A Figura 32 mostra o corpo-de-prova aspergido o método tradicional, uma UltraBond 25000 e sobre esta uma camada de Al_2O_3 -13%pTiO₂ após o ensaio de dobramento.

Figura 32 - Corpo-de-prova dobramento método convencional.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise da Figura 32 e Figura 15, pode-se afirmar que o corpo-de-prova aspergido da forma convencional, apresenta características predominantemente ideais, segundo as normas da Contec, pois não apresenta microtrincas ou microtrincas superficiais, ou deslocamento e desgarramento da camada aspergida (PETROBRAS, 2011).

5.2.2 Resultados do ensaio de microdureza

No equipamento de medição de dureza, duas fases distintas, sendo uma delas escura e a outra clara, supõe-se que a clara é a fase metálica que reflete melhor a luz no microscópio e a escura a parte cerâmica.

Para se comparar as medidas de microdureza Vickers e Knoop, utilizou-se a Norma ASTM E-140, que fornece as conversões de microdureza Knoop HK 0,5 para microdureza Vickers (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2002).

Pode-se verificar os valores médios de dureza para o corpo-de-prova 2575 na Tabela 14.

Tabela 14 - Medições de dureza do corpo-de-prova 2575.

Misturas		Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média (HV)
	Fase clara	182 HV	192 HV	288 HV	221
2575	Fase escura	676,2 HK	679,9 HK	695 HK	647

Fonte: Autoria própria.

Por sua vez pode-se verificar os valores médios de dureza Vickers para o corpo-de-prova 5050 na Tabela 15.

Tabela 15 - Medição de dureza do corpo-de-prova 5050.

Mistura		Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média (HV)
	Fase clara	196,2 HV	206,1 HV	255 HV	219
5050	Fase escura	534,1 HK	534,9 HK	517,6 HK	504

Fonte: Autoria própria.

Pode-se verificar os valores médios de dureza Vickers para o corpo-de-prova aspergido com método convencional, uma com a liga à base de níquel, Ultrabond 25000, e então sobre essa a camada de Al₂O₃-13%pTiO₂.

Tabela 16 - Medição de dureza do corpo-de-prova com o método convencional.

Mistura		Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média (HV)
	Fase clara	34,45 HV	36,02 HV	35,01 HV	35
Convencional	Fase escura	884 HK	935,6 HK	894,75 HK	917

Fonte: Autoria própria.

Pode-se agora verificar os valores médios de dureza Vickers para o corpo-de-prova aspergido com a liga à base de níquel, UltraBond 25000 na Tabela 17.

Tabela 17 - Medições de dureza do corpo-de-prova UltraBond 25000.

Mistura		Medição 1	Medição 2	Medição 3	Média (HV)
UltraBond 2500	Fase única	32,11 HV	35 HV	36,23 HV	34

Fonte: Autoria própria.

Comparando a Tabela 16, a Tabela 17 e o Anexo A, percebe-se que a fase única presente no revestimento de UltraBond 25000 apresenta a mesma dureza informada pelo fabricante, sendo assim a fase clara do revestimento gerado com 2 camadas é composta de UltraBond 25000, conforme mostra o Anexo B.

Segundo The American Ceramic Society (2012) pode-se afirmar que a dureza de revestimentos de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%pTiO}_2$ é de aproximadamente 976,5 HV, assim, estima-se que a camada escura, do revestimento obtido pelo método convencional é composta predominantemente de alumina-titânia $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%pTiO}_2$

Comparando os valores de durezas obtidos para as misturas 5050 e 2575, pode-se perceber que tanto as fases escuras quanto as fases claras das duas ligas, não são fases de UltraBond 25000 e $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%pTiO}_2$ e sim, provavelmente, novas fases, obtidas através da mistura dos dois pós.

5.2.3 Resultados do ensaio de adesão

Após o devido preparo e aspersão térmica, os corpos-de-prova de adesão foram submetidos ao ensaio de adesão, conforme descrito no item 3.4.1.2.

Três corpos-de-prova foram analisados nesse ensaio, corpo-de-prova aspergido com mistura 5050, corpo-de-prova aspergido com UltraBond 25000 e um corpo de prova aspergido convencionalmente, uma de UltraBond e sobre ela uma camada de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%pTiO}_2$. Optou-se por não realizar ensaio de adesão para corpos-de-prova da mistura 2575, uma vez que foi constatado que o revestimento gerado por essa mistura tinha baixa adesão com o ensaio de dobramento.

A Tabela 18 mostra as médias das espessuras iniciais, antes da aspersão térmica e finais, após a aspersão térmica para os corpos-de-prova usados no ensaio de adesão.

Tabela 18 - Espessura da camada aspergida dos corpos-de-prova de adesão.

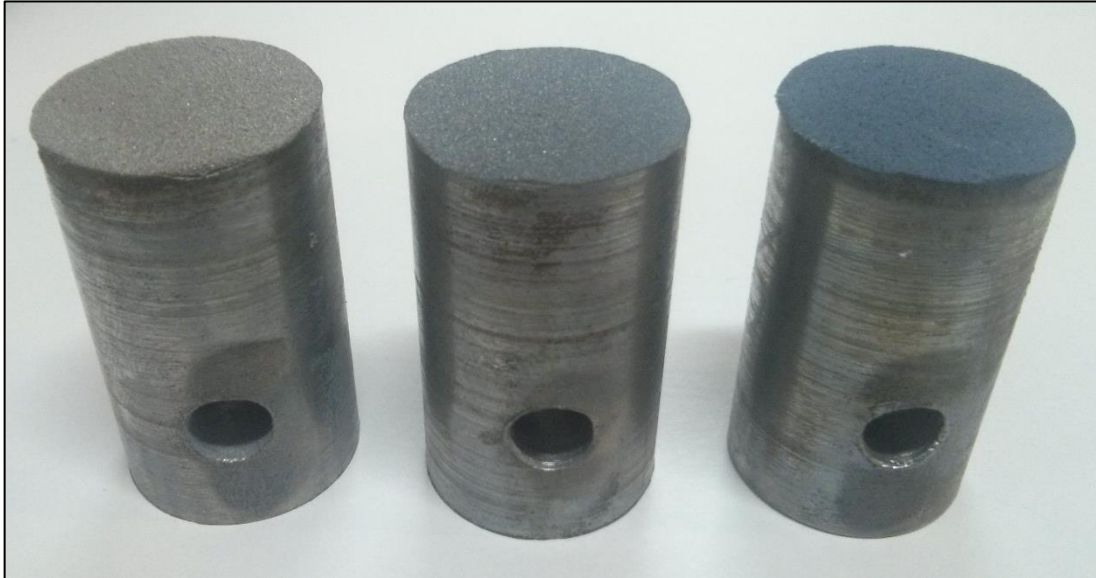
Mistura/Liga	Média Inicial (mm)	Média Final (mm)	Camada Aspergida (μm)
UltraBond 25000	39,750	40,267	516,667
5050	39,717	40,150	433,333
Método Convencional	39,833	40,250	416,667

Fonte: Autoria própria.

Com os resultados obtidos para a espessura da camada aspergida, demonstrados na Tabela 18, é possível perceber que a camada aspergida está dentro das normas propostas na Norma ASTM-C633-01, lembrando que a mesma estipula uma espessura mínima de 380 mm de camada aspergida para a realização do ensaio (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2010).

A Figura 33 mostra os 3 corpos-de-prova, para as 3 determinadas misturas, antes da união com os corpos-de-prova sem aspensão e também antes do ensaio de adesão.

Figura 33 - Corpos-de-prova de adesão antes do ensaio de adesão.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 33, da esquerda para a direita é possível observar, respectivamente, um corpo-de-prova aspergido com UltraBond 25000, um corpo-de-prova aspergido com a mistura 5050 e por fim um corpo-de-prova aspergido pelo método convencional (UltraBond 25000 + $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{87}/(\text{TiO}_2)_{13}$).

A Figura 34 mostra o corpo-de-prova aspergido com UltraBond 25000 após o término do ensaio de adesão.

Figura 34 - Corpo-de-prova de adesão UltraBond 25000 após ensaio.



Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar na Figura 34 que o rompimento ocorreu na interface entre a camada aspergida e o substrato.

A Figura 35 mostra o corpo-de-prova aspergido com 2 camadas após o término do ensaio de adesão.

Figura 35 - Corpo-de-prova de adesão 2 camadas após ensaio.



Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar na Figura 35 que o rompimento ocorreu na interface entre a camada de UltraBond 25000 e a camada de alumina-titânia.

A Figura 36 mostra o corpo-de-prova aspergido com a mistura 5050 após o término do ensaio de adesão.

Figura 36 - Corpo-de-prova de adesão 5050 após ensaio.

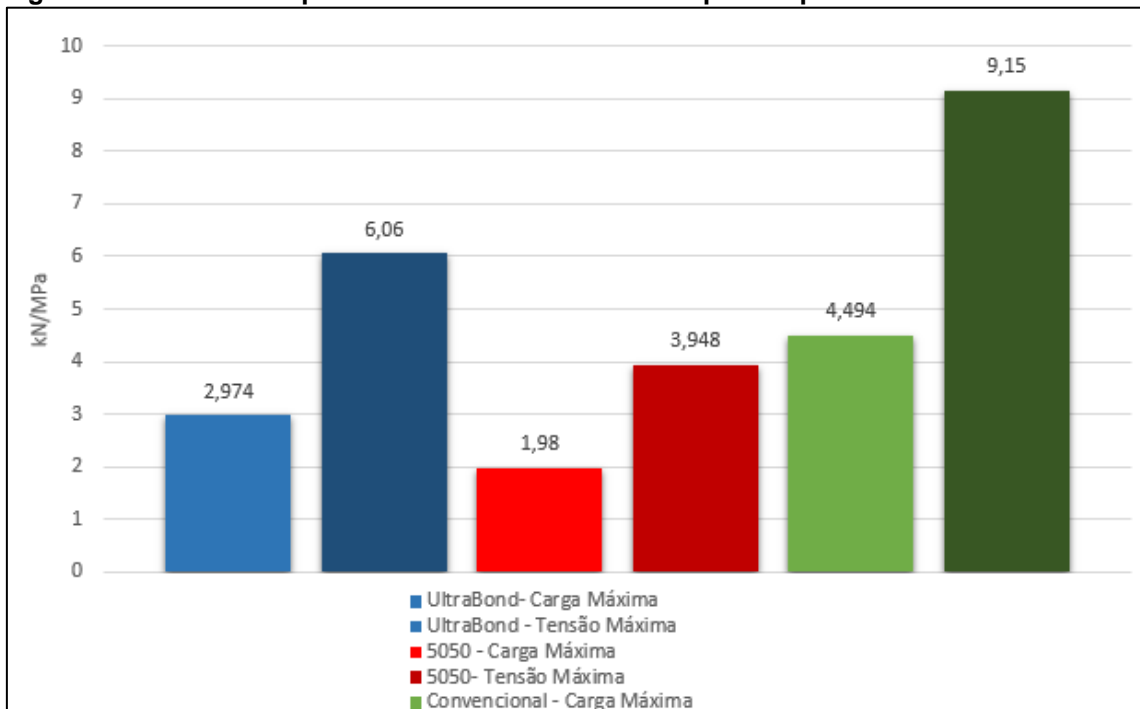


Fonte: Autoria própria.

O corpo-de-prova aspergido com a mistura 5050, apresentou os rompimentos: na interface de ligação com o substrato e entre meio a camada aspergida com 5050.

A Figura 37 apresenta um comparativo entre a tensão adesiva e a carga de resistência a adesão para os corpos-de-prova aspergidos com a liga 5050, a liga UltraBond 25000 e o corpo-de-prova aspergido com duas camadas.

Figura 37 - Gráfico comparativo entre a adesão dos corpos-de-prova.



Fonte: Autoria própria.

A partir da análise da Figura 37, observa-se que o corpo-de-prova aspergido de modo convencional, apresentou uma adesão superior aos outros dois corpos-de-prova, percebeu-se também que a mistura 5050 apresenta aproximadamente 35% menos tensão adesiva que o revestimento de UltraBond, e ainda a tensão adesiva da mistura 5050 é 57% menos que do corpo-de-prova aspergido de forma convencional.

Além disso, pode-se observar que a liga à base de níquel, UltraBond, atua benéficamente na adesão da alumina-titânia, que só foi possível a adesão após a aspersão prévia da UltraBond sob o substrato. Foi possível constatar que mistura de UltraBond com a alumina-titânia 50% em peso, não resultou em uma adesão tão efetiva, quanto o método convencional, porém ainda assim, possibilitou a adesão do compósito cerâmico (alumina-titânia).

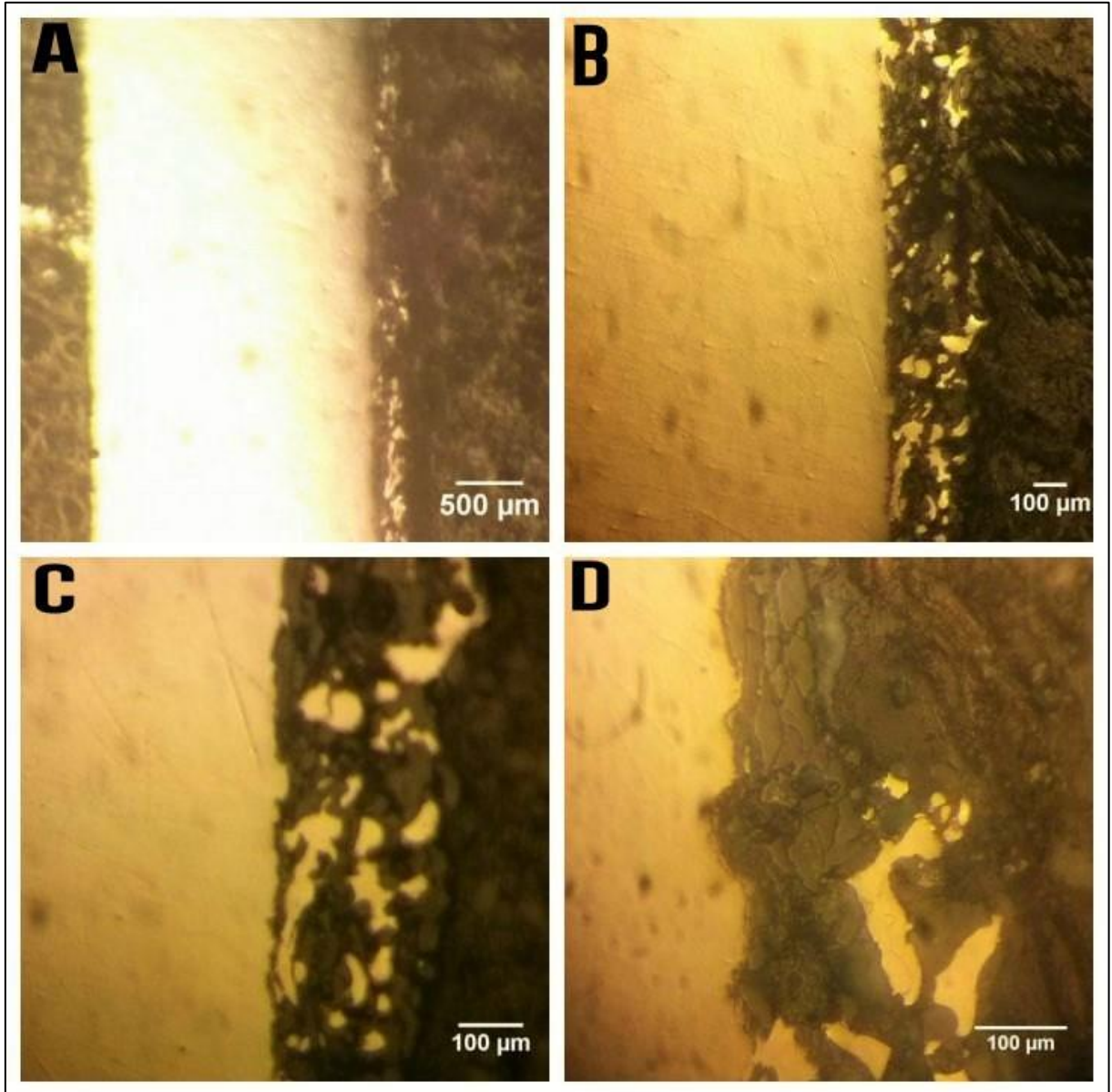
5.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS DA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL DO REVESTIMENTO

5.3.1 Resultados da metalografia

Após o devido preparo e embutimento das amostras, foi realizado o ensaio metalográfico. Pode-se constatar a presença de pelo menos duas fases distintas, uma microscopicamente mais clara e outra microscopicamente mais escura. Os índices representam as aproximações obtidas no microscópio, sendo A de 50x, B de 100x, C de 200x e D de 400x.

A Figura 38 mostra os resultados obtidos para metalografia de um corpo-de-prova aspergido com a mistura 2575.

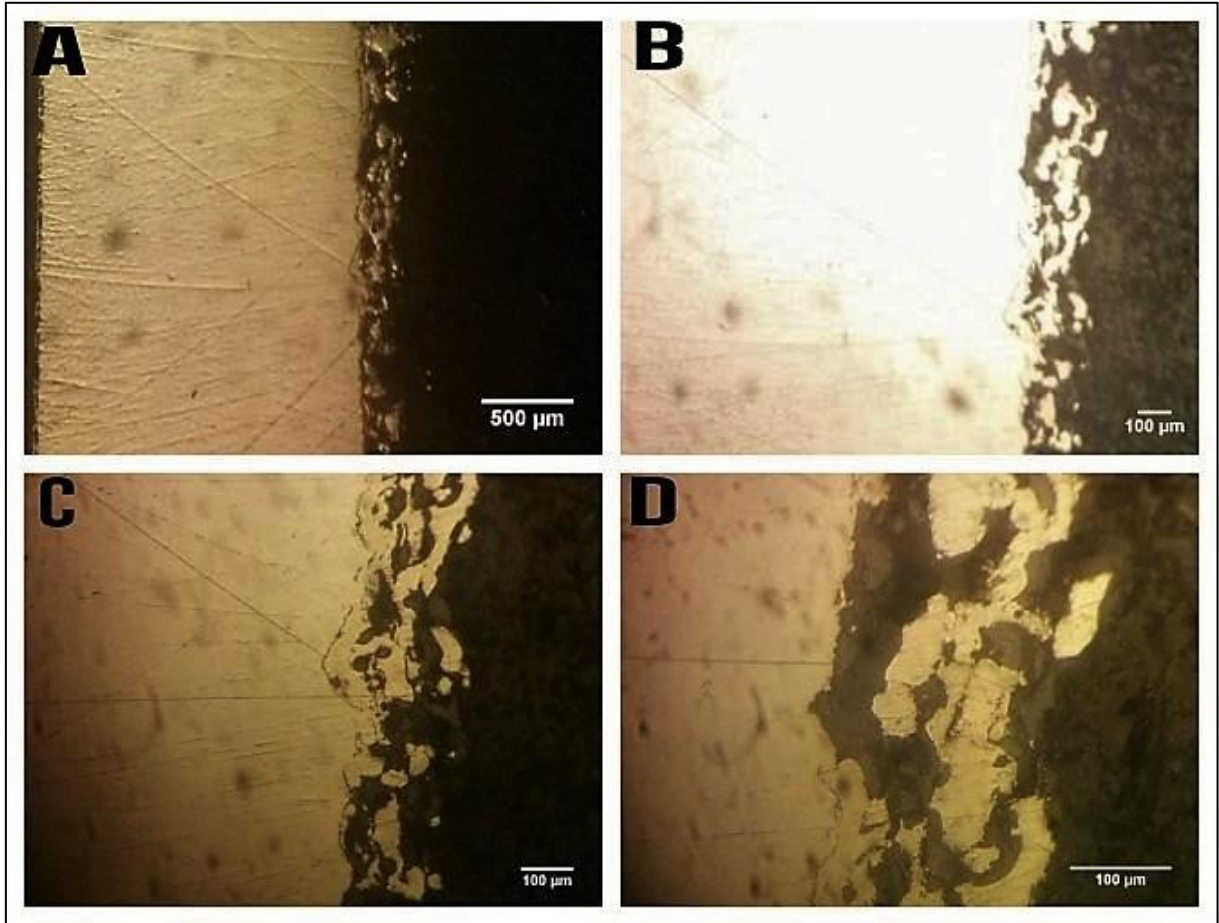
Figura 38 - Metalografia da amostra com mistura 2575.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 39 mostra os resultados obtidos com a metalografia de um corpo-de-prova aspergido com a mistura 5050.

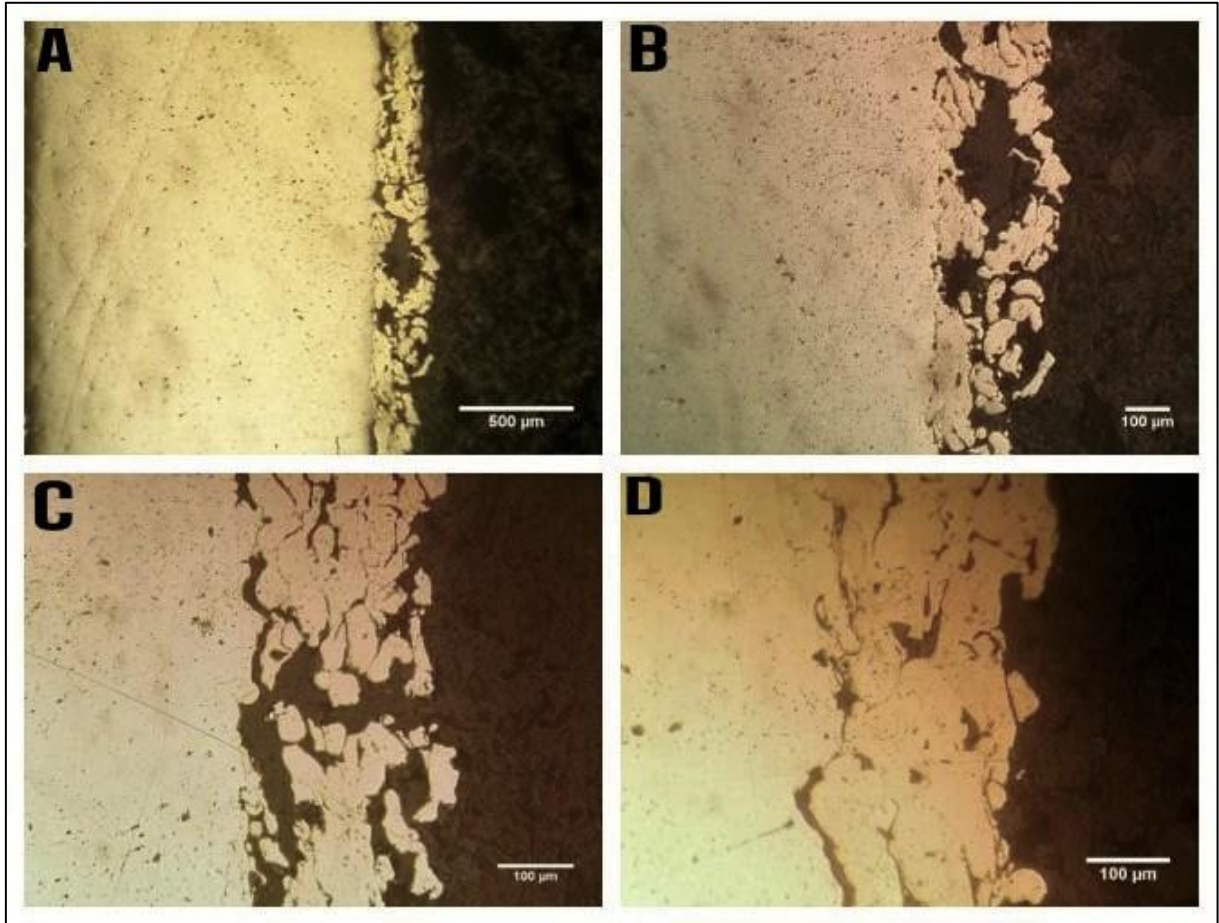
Figura 39 - Metalografia da amostra com mistura 5050.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 40 mostra os resultados obtidos com a metalografia de um corpo-de-prova aspergido com o pó UltraBond 25000.

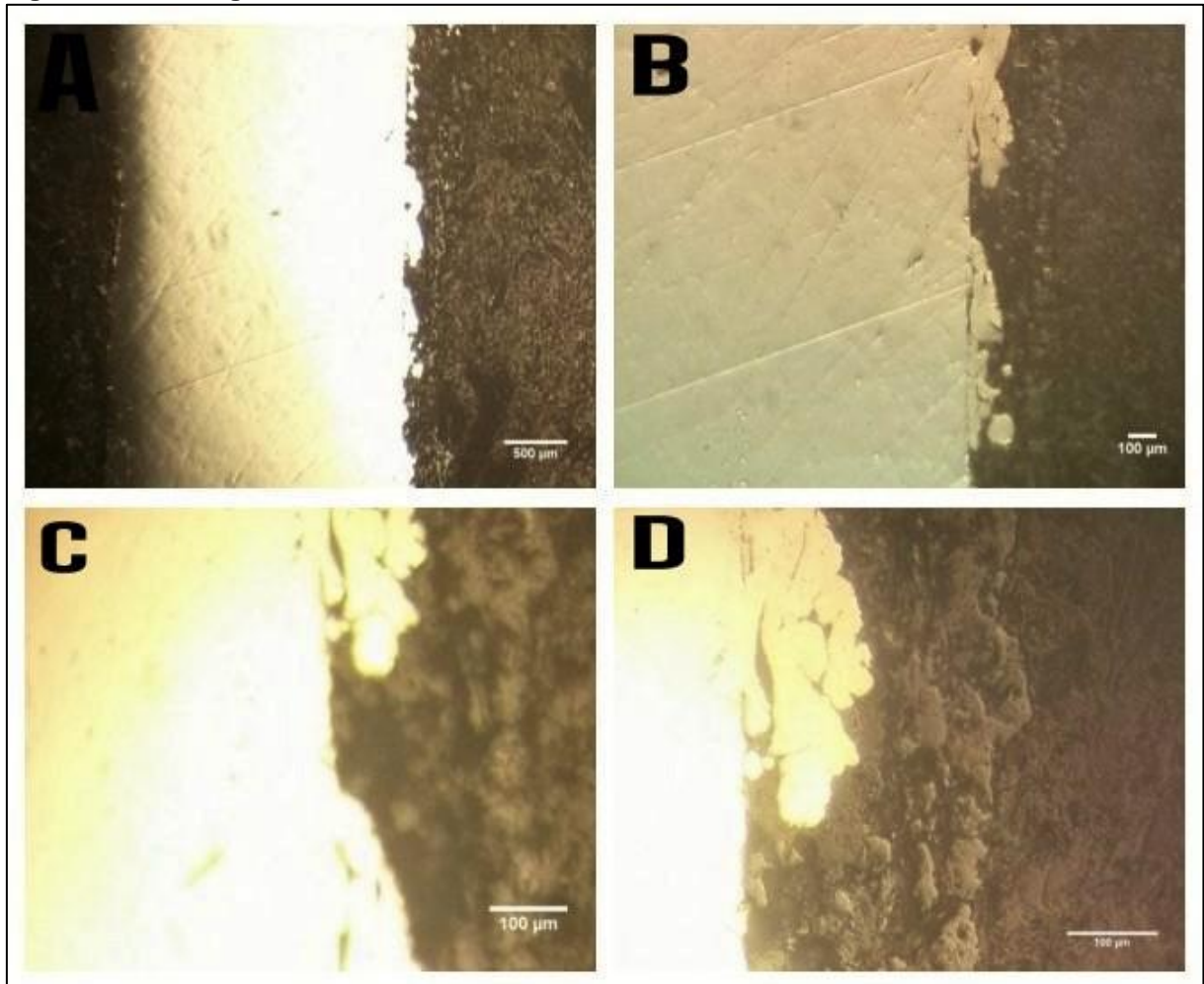
Figura 40 - Metalografia da amostra com UltraBond 25000.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 41 mostra os resultados obtidos com a metalografia de um corpo-de-prova aspergido com uma camada de UltraBond 25000 e sobre ela uma camada de $(\text{Al}_2\text{O}_3)_{87} (\text{TiO}_2)_{13}$.

Figura 41 - Metalografia da amostra do método convencional.



Fonte: Autoria própria.

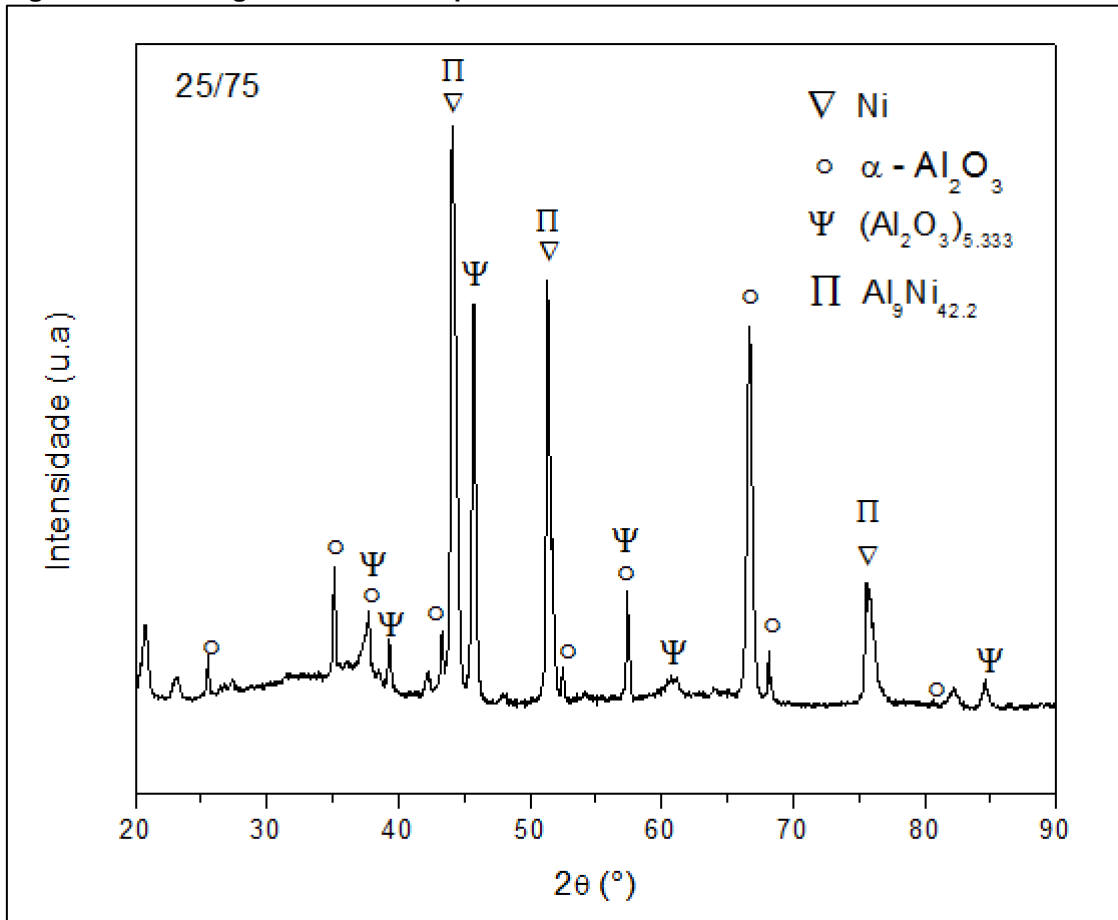
Supõe-se que a fase escura é a fase composta predominantemente de Al_2O_3 , ou fase predominantemente cerâmica, pois reflete menos luz no microscópio e apresenta coloração mais escura. Pelo mesmo motivo acredita-se que a fase clara, é a fase predominantemente metálica, proveniente do pó UltraBond 25000, pois é um pó a base de níquel e outros metais, que refletem melhor a luz, tornando-se mais claros ao serem observados no microscópio.

A suposição de que a fase clara é predominantemente metálica coincide com os valores de dureza obtidos para esta fase, que está muito perto dos valores de dureza fornecidos pela fabricante do pó de ligação, UltraBond 25000, como visto anteriormente na Tabela 10.

5.3.2 Resultados da análise por difração de raio X

Para a mistura 2575 foi realizado a difração de raio X de acordo com o item 3.4.2.2. A Figura 42 mostra os resultados da difratograma para tal mistura.

Figura 42 - Difratograma de raios X para a mistura 2575.

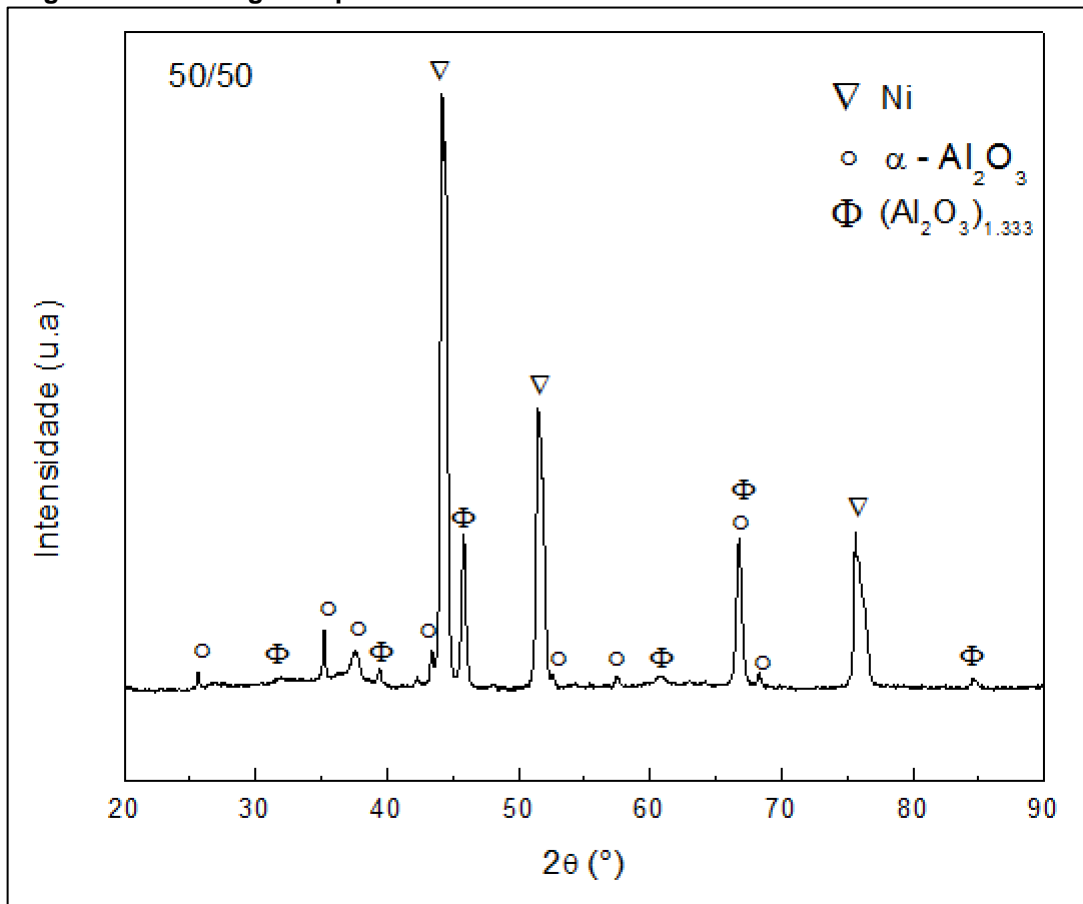


Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos no difratograma para a mistura 2575, observou-se a presença de fases compostas por predominantemente Al₉Ni_{42.4}(Π), também fases metálicas de Níquel (Ni) (▽), além de (Al₂O₃)_{5.333} (Ψ) e fases de (Al₂O₃)_{5.333} (○).

Para a mistura 5050 foi realizado a difração de raio X de acordo com o item 3.4.2.2. A Figura 43 mostra os resultados da difratograma para tal mistura.

Figura 43 - Difratoograma para a mistura 5050.

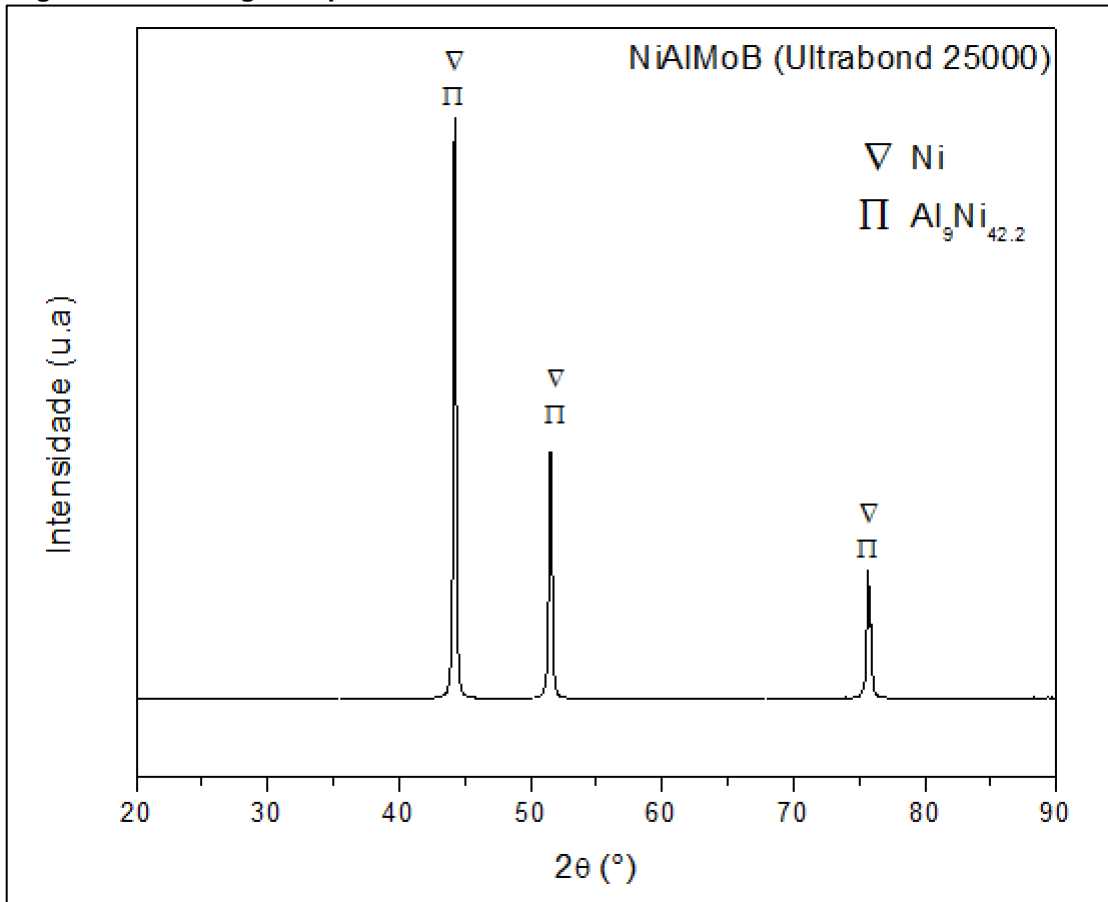


Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos no difratograma para a mistura 5050, observou-se a presença de três fases no revestimento aspergido, uma fase metálica predominante de Ni (▽), uma fase de α -Al₂O₃ (o) e também uma fase cerâmica (Al₂O₃)_{1.333} (Φ).

Para o pó a base de níquel, UltraBond 25000 foi realizado a difração de raio X de acordo com o item 3.4.2.2. A Figura 44 mostra os resultados da difratograma para tal mistura.

Figura 44 - Difratoograma para UltraBond 25000.

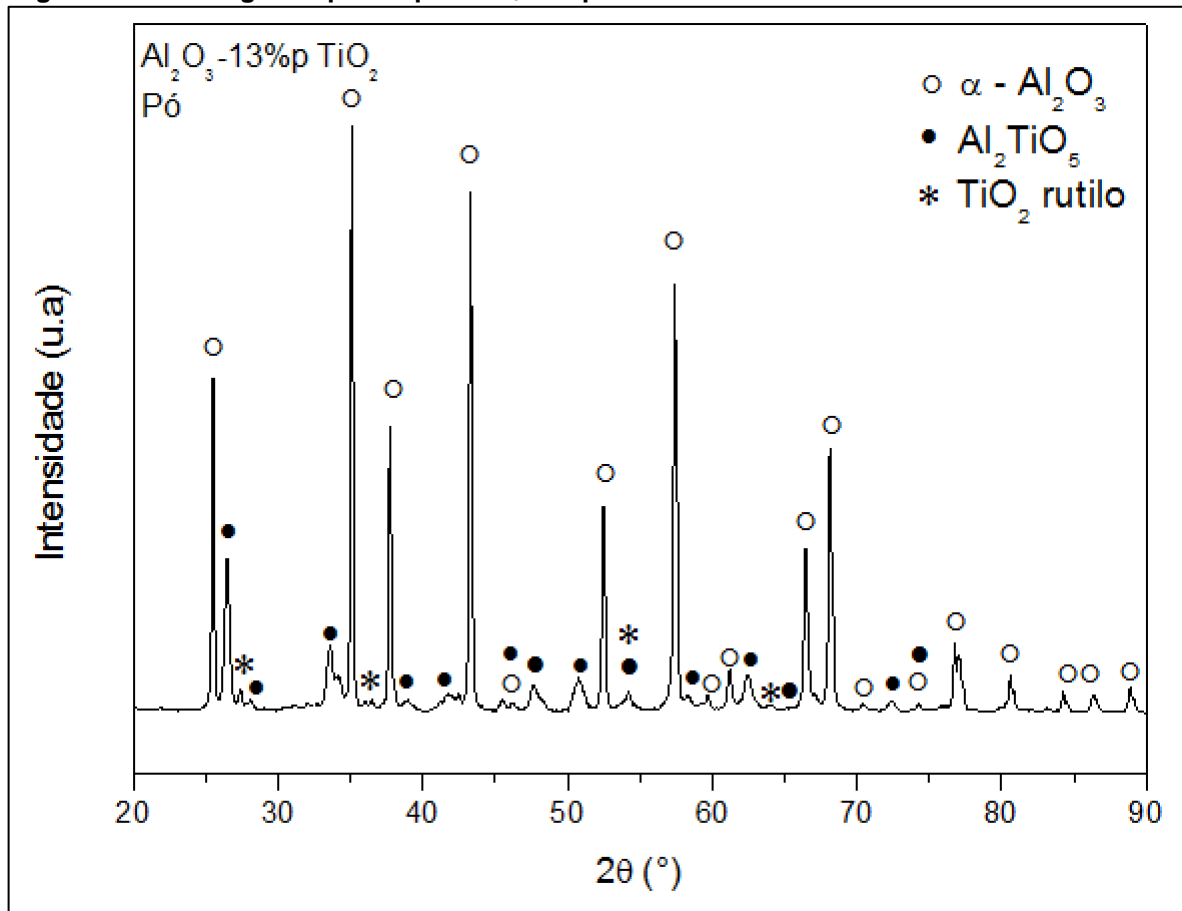


Fonte: Autoria própria.

Na Figura 44 foram identificadas duas fases no revestimento: a fase cristalina Ni (∇) e a fase Al₉Ni_{42.2} (Π). Observar-se ainda a predominância da fase metálica de Níquel (Ni) (∇), que possui os picos cristalinos de maior intensidade, tal predominância já era esperada visando que o Níquel é predominante no pó UltraBond 25000.

O Figura 45 mostra os resultados de difração de raios X obtidos para o pó Al₂O₃-13%pTiO₂.

Figura 45 - Difratoograma para o pó Al_2O_3 13%p TiO_2 .

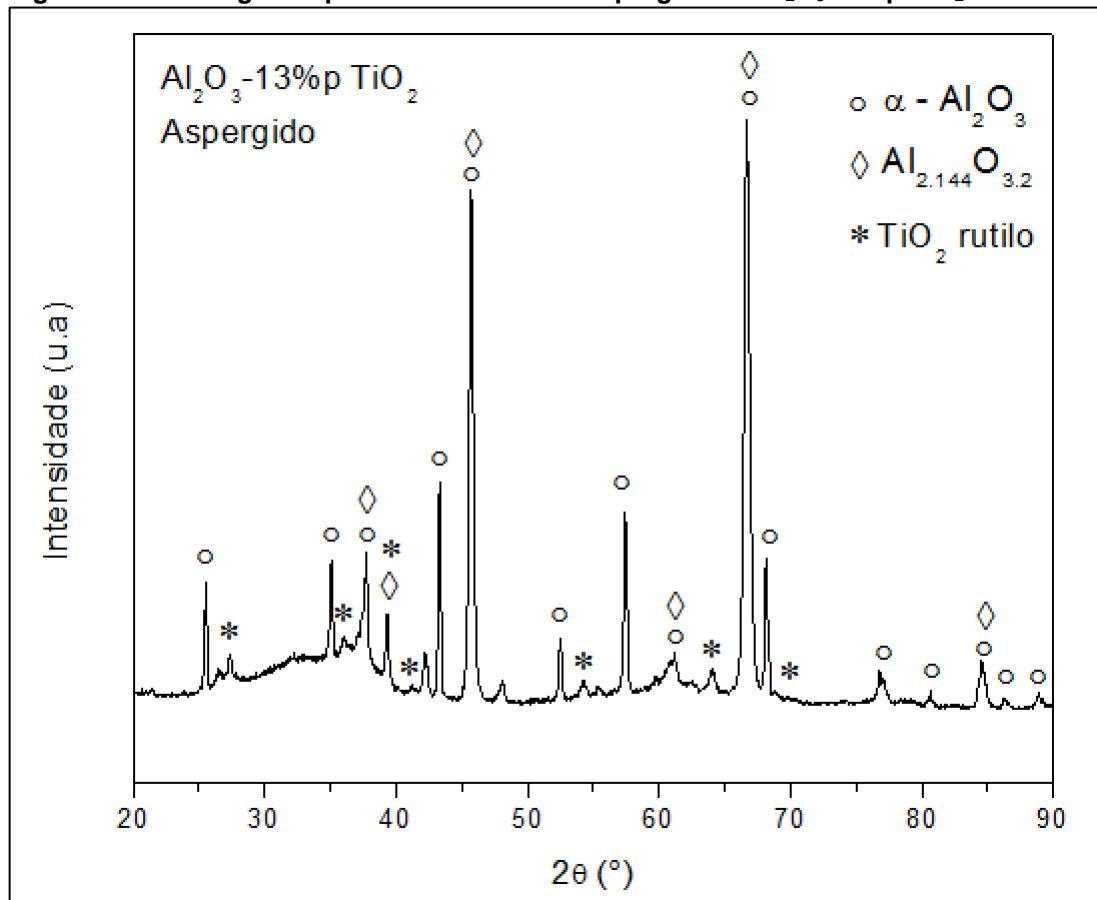


Fonte: Autoria própria.

A partir da análise do difratograma para o pó Al_2O_3 13%p TiO_2 , ficou evidenciado a presença de fases de α - Al_2O_3 (\circ), que é a fase predominante, pois apresenta os maiores picos de intensidade no difratograma. Além disso observou-se também fases de Al_2O_3 (\bullet) e rutilo TiO_2 .

O Figura 46 mostra os resultados do difratograma de raios X obtidos para um revestimento aspergido de Al_2O_3 13%p TiO_2 , sobre um substrato de aço SAE 1020.

Figura 46 - Difratoograma para o revestimento aspergido de Al_2O_3 13%p TiO_2 .



Fonte: Autoria própria.

Por fim, para a análise do difratograma para o revestimento aspergido de Al_2O_3 -13%p TiO_2 , a presença de fases de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (o) foi confirmada, fase predominante que se manteve predominante tanto no pó quanto no revestimento. Além disso novas fases surgiram após o processo de aspersão, fases de $\text{Al}_{2.144}\text{O}_{3.2}$ (\diamond). Nota-se que as fases de rutilo se mantiveram após a aspersão térmica.

Como observou (JIA et al., 2015) e foi constatado com os difratogramas na Figura 45 e Figura 46, ocorre a diminuição da incidência de fases de $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ao se aspergir o pó de Al_2O_3 -13%p TiO_2 .

Além disso os resultados obtidos para os difratogramas das ligas 2575, 5050 e convencional, vão de encontro com a hipótese de que as fases escuras, de maior dureza obtidas no ensaio de metalografia e microdureza são fases predominantemente cerâmicas e/ou compósitas, enquanto as fases claras e de menor dureza são fases predominantemente metálicas.

5.3.3 Resultados da análise de espessura camada aspergida

A Tabela 19 apresenta a espessura da camada aspergida, para os corpos-de-prova no formato de chapas metálicas.

Tabela 19 -Espessura da camada aspergida dos corpos-de-prova de chapas metálicas.

Mistura	Espessura Inicial Média (mm)	Espessura Final Média (mm)	Espessura (μm)
5050	1,051	1,300	239
	1,055	1,421	376
	1,087	1,478	384
	1,258	1,523	255
2575	1,056	1,189	145
	1,092	1,461	364
	1,039	1,441	398
	1,056	1,424	377
Convenciona I	1,052	1,278	227
	1,055	1,222	165
	1,029	1,248	231
UltraBond 25000	1,046	1,241	187
	1,053	1,314	262
	1,055	1,274	226

Fonte: Aatoria própria

Onde a média inicial, representa a média das medidas tomadas para a espessura dos corpos-de-prova antes do processo de aspersão térmica. Por sua vez a média final representa a média dos valores medidos para a espessura dos corpos-de-prova após o processo de aspersão térmica.

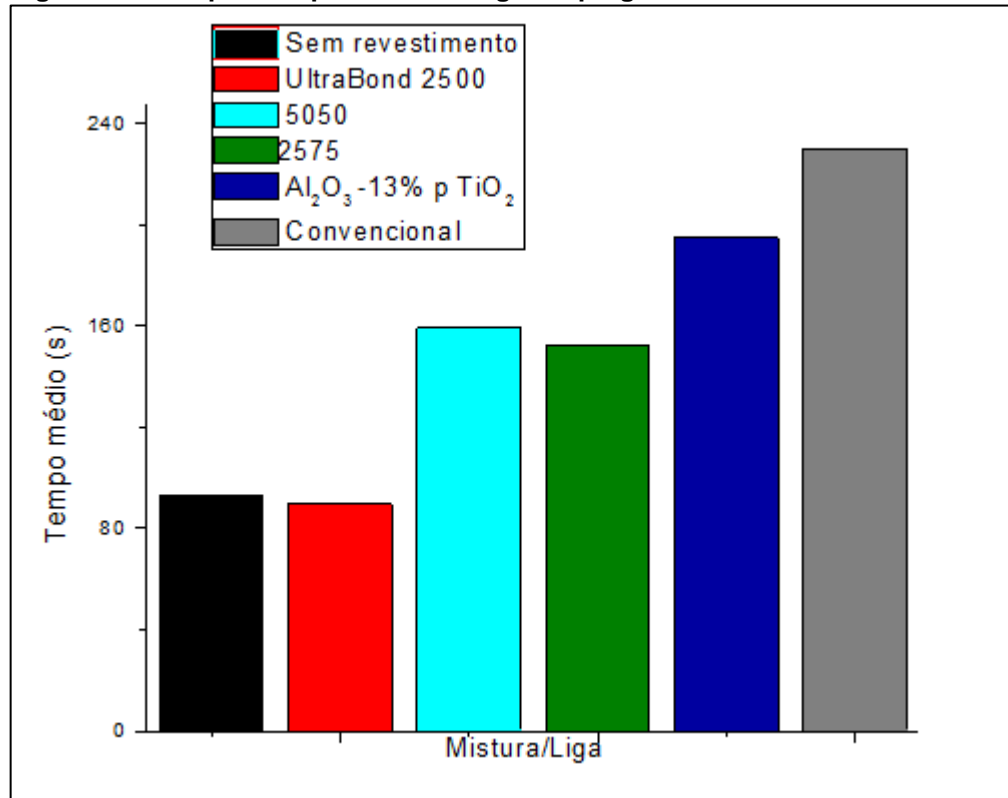
Segundo a Tabela 12, a espessura da camada aspergida para atender os requisitos da norma N-2586 da Petrobras deve ser superior a 225 μm .

A partir da análise da Tabela 19, pode-se perceber que em sua maioria os corpos-de-prova atenderam aos requisitos de espessura, descritos no 3.4.2.3.

5.4 RESULTADOS DOS ENSAIOS TÉRMICOS DO REVESTIMENTO

Após a realização dos ensaios térmicos, conforme descrito no item 3.4.3, obtiveram-se resultados para o ensaio térmico, conforme descritos na Figura 47.

Figura 47 - Tempo de aquecimento x ligas aspergidas.



Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar, como era esperado, que os corpos-de-prova com maior quantidade de alumina titânia (Al₂O₃-13%pTiO₂) levaram mais tempo para atingir a temperatura de 150 °C, ou seja, apresentaram uma menor condutividade térmica, ou ainda pode-se dizer que atuaram de forma mais eficiente como barreira térmica, que os corpos-de-prova com menos quantidade do compósito cerâmico.

Vale também ressaltar que os corpos-de-prova sem revestimento e revestidos apenas com o pó de ligação, UltraBond 25000, o tempo de aquecimento foi praticamente o mesmo, mostrando que o UltraBond 25000 não atua como revestimento para barreira térmica (TBC).

6 CONCLUSÕES

Com o decorrer do trabalho, foi possível obter revestimentos aspergidos a partir da mistura dos pós e também pelo método convencional. Para obtenção de revestimentos a partir da mistura dos pós a adição de UltraBond 25000 atuou como facilitador da aderência do pó $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%pTiO}_2$ ao substrato.

Verificou-se que os revestimentos obtidos pelo método convencional e 5050 apresentam uma adesão dentro dos padrões requeridos no ensaio de dobramento, da mesma forma foi possível constatar que a liga 2575 apresenta baixa adesão do revestimento pois falhou no ensaio de dobramento.

No ensaio de adesão observou-se que a liga a base de níquel, UltraBond 25000 atua beneficemente na adesão dos revestimentos de baixa adesão, como o $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%pTiO}_2$. Onde o método convencional apresenta maior adesão do revestimento ao substrato, pode-se verificar que a adição de UltraBond 25000 no pó cerâmico tornou possível a aspensão, pois o pó cerâmico, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%pTiO}_2$, não aderiu sozinho aos corpos-de-prova. Para ligas com baixa quantidade de UltraBond 25000 a adesão ao substrato foi baixa, como por exemplo, a liga 2575.

A partir dos ensaios de microdureza foi verificado, como era esperado, que as fases provenientes da aspensão do pó a base de níquel apresentam dureza inferior as fases geradas pela aspensão do pó compósito.

Os ensaios de caracterização das propriedades microestruturais, difração de raio x e análise metalográfica, evidenciaram as diferentes fases que compunham os revestimentos aspergidos.

Com base nos ensaios de microdureza e de caracterização da microestrutura, a hipótese de que as fases escuras do revestimento são predominantemente cerâmicas e/ou compósitas e as fases claras predominantemente metálicas tomou força, pois além de visualmente haver a distinção de coloração, também foi possível distinguir a diferença de microdureza das fases e posteriormente confirmar a presença das fases metálicas e compósitas pelo raio X.

Vale ressaltar que para ambos os ensaios de dobramento e adesão, as camadas aspergidas obtidas estavam nas faixas adequadas para as normas que regiam os respectivos ensaios.

Com a realização do ensaio de condutividade térmica, foi possível verificar a atuação do revestimento de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-13\%pTiO}_2$ como barreira térmica, da mesma

forma, foi possível perceber que o revestimento obtido com o pó UltraBond 25000 não atua como barreira térmica. Porém para as misturas dos dois pós, ligas 5050 e 2575, observou-se que houve a manutenção das propriedades de barreira térmica nos dois casos, ressaltando-se que para ambas as misturas os revestimentos gerados não obtiveram um desempenho tão acentuado quanto o método convencional. As ligas 5050 e 2575 ficaram em torno de 30% menos efetivas como barreira térmica que o método tradicional.

De modo geral, pode-se afirmar que geração de ligas a base das misturas dos pós possibilita a obtenção de revestimentos compósitos, em detrimento de uma redução nas propriedades mecânicas e térmicas em relação aos métodos convencionais.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR METALS INTERNATIONAL. **Handbook of thermal technology**. Ohio: American Society for Metals International, 2004.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E-140-Standard Hardness Conversion Tables for Metals 1 Relationship Among Brinell Hardness , Vickers Hardness , Rockwell Hardness , Superficial Hardness , Knoop Hardness , and Scleroscope Hardness**. West Conshohocken: American Society for Metals International, 2002.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM-C633-01: Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings**. West Conshohocken: American Society for Metals International, 2010.
- ANTOU, G. et al. Modification of ceramic thermal spray deposit microstructures implementing in situ laser remelting. **Surface and Coatings Technology**, v. 172, n. 2–3, p. 279–290, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-6405: Rugosidade das superfícies**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1988.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma ISO - 6507-1: Materiais Metálicos - Ensaio de dureza Vickers .pdf**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- BANSAL, P.; PADTURE, N. P.; VASILIEV, A. **Improved interfacial mechanical properties of Al₂O₃ - 13wt % TiO₂ plasma-sprayed coatings derived from nanocrystalline powders**. v. 51, p. 2959–2970, 2003.
- BRITO, V. R. DOS S. **Caracterização de Revestimentos Metálicos Aspergidos Termicamente por Arco Elétrico**. Rio de Janeiro: Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2010.
- CENTRO DE INFORMAÇÕES METAL MECÂNICAS. **Ensaio de dobramento para materiais frágeis**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6596-ensaio-de-dobramento-para-materiais-frageis>. Acesso em: 28 maio. 2016.
- CORTÉS, R. S. P.; BUSCHINELLI, A. J. A.; PIZA, M. T. P. **Revestimentos de alumínio depositados por aspersion térmica**. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. **Anais...2000**
- INTERNACIONAL STANDARD. **ISO 4545-1 - Metallic materials - Knoop hardness test**. International Standard, 2005. v. 2005
- JIA, S. et al. **Effect of TiO₂ content on properties of Al₂O₃ thermal barrier coatings by plasma spraying**. v. 25, p. 175–183, 2015.
- KUMARI, S. **Effect of TiO₂ Addition in Al₂O₃: Phase Evolution , Densification , Microstructure And Mechanical Properties**. n. 109, 2013.
- KUSOGLU, I. M. et al. Wear behavior of flame-sprayed Al₂O₃ -TiO₂ coatings on plain

carbon steel substrates. **Surface and Coatings Technology**, v. 200, n. 1–4 SPEC. ISS., p. 1173–1177, 2005.

LIMA, C. R. C. Revestimentos Para Barreira Térmica: Evolução e Perspectivas. **Soldagem Inspeção**, v. 19, p. 353–363, 2014.

LIMA, C. R. C.; TREVISAN, R. **Aspersão Térmica: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Artiber Editora, 2007.

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

MCPHERSON, R. The relationship between the mechanism of formation, microstructure and properties of plasma-sprayed coatings. **Thin Solid Films**, v. 83, n. 3, p. 297–310, 1981.

MCPHERSON, R. A review of microstructure and properties of plasma sprayed ceramic coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 39–40, n. C, p. 173–181, 1989.

MENDES, M. W. D. **Revestimentos a base de Ta / Al₂O₃ produzidos por aspersão térmica**. Natal: Universidade Federal Do Rio Grande Do Norte, 2010.

MOSKAL, G. Thermal barrier coatings: characteristics of microstructure and properties, generation and directions of development of bond. **Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 37, n. 2, p. 323–331, 2009.

OLIVEIRA, J. P.; DUARTE, J. F. Revestimentos cerâmicos utilizados como barreira térmica (Ceramic coatings used as thermal barrier). **Cerâmica**, v. 59, p. 186–191, 2013.

PAREDES, R. S. C. **Apostila de Aspersão Térmica**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2012.

PAWLOWSKI, L. **The science and engineering of thermal spray coatings**. Villeneuve d'Ascq: Editora Wiley, 2008.

PETROBRAS. **N-2568: Revestimentos Metálicos por Aspersão Térmica**. Brasil: CONTEC - Comissão de Normalização Técnica, 2011.

RODRIGUES, J. A. **Raio X: difração e espectroscopia**. São Carlos: EdUFSCar, 2009.

SUCHARSKI, G. B. **Deposição De Revestimetnos Tipo Barreira Térmica Por Aspersão Térmica**. Curitiba: Universidade Fderal do Parana, 2012.

SULZER METCO. An Introduction to Thermal Spray. p. 1–24, 2012.

THE AMERICAN CERAMIC SOCIETY. **Advanced Ceramic Coatings and Materials for Extreme Environments II: Ceramic Engineering and Science Proceedings**. Nova Jersey: Editora Wiley, 2012.

WANG, Y. et al. Abrasive wear characteristics of plasma sprayed nanostructured alumina r titania coatings. **Wear**, p. 176–185, 2000.

APÊNDICE A – Medidas das espessuras do corpo-de-prova chapa metálica

Mistura/liga	MI1 (mm)	MI2 (mm)	MI3 (mm)	MF1 (mm)	MF2 (mm)	MF3 (mm)	Camada aspergida (μm)
5050	1,056	1,053	1,045	1,347	1,26	1,292	239
	1,053	1,048	1,064	1,443	1,429	1,39	376
	1,153	1,054	1,054	1,562	1,438	1,435	384
	1,283	1,298	1,193	1,542	1,488	1,538	255
2575	1,089	1,038	1,042	1,204	1,176	1,187	145
	1,093	1,085	1,097	1,456	1,469	1,457	364
	1,025	1,05	1,043	1,451	1,441	1,43	398
	1,089	1,038	1,042	1,419	1,441	1,411	377
Método Convencional	1,049	1,056	1,052	1,279	1,266	1,29	227
	1,044	1,066	1,055	1,234	1,213	1,22	165
	1,037	1,023	1,026	1,257	1,257	1,231	231
UltraBond 25000	1,044	1,047	1,047	1,223	1,265	1,234	187
	1,063	1,049	1,046	1,31	1,311	1,322	262
	1,052	1,06	1,052	1,279	1,278	1,264	226

Onde MI1, MI2, MI3 E MI4 são respectivamente a medida inicial 1, medida inicial 2; medida inicial 3, medida inicial 4. MF1, MF2, MF3 E MF4 são respectivamente a medida final 1, medida final 2, medida final 3, medida final 4.

APÊNDICE B – Medidas das espessuras do corpo-de-prova de adesão

CP	MI1 (mm)	MI2 (mm)	MI3 (mm)	MF1 (mm)	MF2 (mm)	MF3 (mm)	Camada Aspergida (μm)
UltraBond 25000	39,750	39,800	39,700	40,250	40,300	40,250	516,667
5050	39,700	39,750	39,700	40,100	40,150	40,200	433,333
Método convencional	39,800	39,850	39,850	40,200	40,300	40,250	416,667

Onde MI1, MI2, MI3 E MI4 são respectivamente a medida inicial 1, medida inicial 2; medida inicial 3, medida inicial 4. MF1, MF2, MF3 E MF4 são respectivamente a medida final 1, medida final 2, medida final 3, medida final 4.

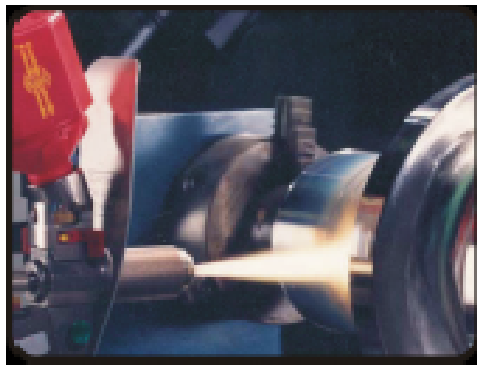
ANEXO A – Folheto técnico do produto UltraBond 25000

Folheto Técnico do Produto



UltraBond 25000

Liga de aderência / reconstrução de peças desgastadas



Aplicações: Pás de exaustores, reconstrução de peças em aço e ligas de níquel, tais como: barramentos de máquinas, anéis de desgaste e peças ajustadas sob pressão.

Descrição: Liga metálica a frio autoaderente a base de níquel para enchimento de peças submetidas à compressão e desgaste friccional. Camada de ligação para ligas não autoaderentes. Não afetada por tensões residuais, Excelente ligação com o metal base. Excelente usinabilidade

Metais de Base: Todos os metais industriais.

Características Técnicas (Valores Típicos):

Dureza: 160 HB

Temperatura máxima de serviço: 700°C

Temperatura de ligação: inferior a 260°C

Limite de espessura do depósito: 6,3 mm

Densidade: 7,69 kg/dm³

Procedimento de aplicação:

Preparação da superfície a ser revestida

Limpeza: Para obter um revestimento perfeito, a superfície necessita ser limpa e livre de graxas, óleo e impurezas.

Usinagem preparatória: A área desgastada a ser revestida deve ser usinada até que as irregularidades causadas pelo desgaste sejam removidas. Se o metal de base está endurecido ou tratado termicamente, deve-se utilizar ferramenta especial para o desbaste. Uma superfície rugosa deve ser obtida para aplicar o revestimento.

Preparação da superfície a ser revestida:

É recomendado preaquecimento de 50°C-150°C antes da preparação. Deve-se fazer uma rosca, no caso de peças cilíndricas, com passo de 0,7mm, profundidade de 0,35mm e ângulo de rosca de 45°. Em peças planas ou como alternativa para as peças cilíndricas pode-se jatear a mesma com granalha de aço (50% G25 + 50% G40). As áreas onde não se quer metalizar devem ser protegidas com Solução 103.

Revestimento: Aplique como camada de base de aproximadamente 0,1mm para pós mais duros ou não auto-aderentes.

Como camada final, aplique o pó sobre a peça, em sucessivas camadas de 0,3 a 0,5mm, até se obter a medida desejada. Durante a aplicação, a temperatura não deve exceder 200°C.

Usinabilidade: Usinagem por ferramenta de corte.

ANEXO B – Composição UltraBond 25000

Eutectic do Brasil Ltda**Composição Típica**

Cliente: Customer:	Eutectic		
Produto: Product:	ULTRABOND 25000	Pedido:	

Análise Química : Chem. Composition (%)											
C	S	Sn	B	Cu	Zn	Al	P	Si	Co	Mn	Cr
N/A	N/A	N/A	0,040	N/A	N/A	5,550	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Ni	Mo	Nb	Ti	Cd	Fe	Pb	W	Mg	Ag	V	Outros
Bal.	5,130	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Propriedades Mecânicas : Mechanical Properties				
Dureza / Hardness:	Tipo Type:	Alongamento/ Allongement (%):	Lim. escoamento/ Yieldstress (MPa):	Lim. Resistência Tensile Strength (MPa):
72 - 84	HRB	N/A	N/A	N/A

Certificamos que os dados acima foram obtidos estatisticamente conforme norma ASME Seção II - SFA - 5.01 - Schedule F de 1989.

Ciro César Faria Amaral
Dep. Qualidade