

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

TIAGO MACHADO E SILVA

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTO DE LIGA DE
ALUMÍNIO QUASICRISTALINA APROXIMANTE POR ASPERSÃO
TÉRMICA POR CHAMA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2016

TIAGO MACHADO E SILVA

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTO DE LIGA DE
ALUMÍNIO QUASICRISTALINA APROXIMANTE POR ASPERSÃO
TÉRMICA POR CHAMA**

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

Orientador: Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros

PATO BRANCO

2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REVESTIMENTO DE LIGA DE ALUMÍNIO QUASICRISTALINA APROXIMANTE POR ASPERSÃO TÉRMICA POR CHAMA

Tiago Machado e Silva

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 02/12/2016 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. Valdir Celestino da Silva
(UTFPR)

Prof. MsC. Paulo Cezar Adamczuk
(UTFPR)

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
(UTFPR)
Orientador

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

*A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso de engenharia mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus queridos pais, Edson e Margarida, que sempre me apoiaram e são os grandes responsáveis pela minha chegada até aqui. Dedico também aos meus irmãos, Francini e Junior, companheiros de todas as horas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família: meus pais, Edson e Margarida, que me proporcionaram todo o suporte necessário ao longo da minha vida, e meus irmãos, Francini e Junior.

Agradeço ao professor Bruno, por toda orientação e ensinamentos compartilhados, e aos demais professores que contribuíram na minha formação acadêmica.

Agradeço aos meus colegas de trabalho do laboratório, pelas horas de aprendizado passadas juntas.

Agradeço aos meus amigos, que ficaram ao meu lado nos momentos bons e ruins.

Agradeço ao Witor Wolf, pela doação do pó, e a Alcoa, pela doação do substrato de alumínio usado no trabalho.

RESUMO

SILVA, Tiago M. Obtenção e caracterização de revestimento de liga de alumínio quasicristalina aproximante por aspensão térmica por chama. 2016. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

Os revestimentos para barreira térmica (TBC) são revestimentos que buscam alterar as propriedades de superfície de componentes através do uso de materiais que possuem baixa condutividade térmica, ponto de fusão elevado e boas propriedades mecânicas em elevadas temperaturas. Assim sendo, buscando melhorar a eficiência e reduzir custos de manutenção, esses revestimentos são aplicados principalmente em turbinas a gás e motores a diesel. Os quasicristais, devido as suas propriedades de baixa condutividade térmica e um coeficiente de expansão térmica próximo dos substratos metálicos mais comuns, são bons candidatos a substituir as usuais cerâmicas, que frequentemente apresentam falhas prematuras no revestimento devido às diferenças no coeficiente de expansão térmica entre o revestimento e os substratos metálicos. Dessa forma, este trabalho apresenta a análise de revestimentos obtidos através do método de aspensão térmica a chama a pó de pós atomizados da liga $Al_{71}Co_{13}Fe_8Cr_8$, uma aproximante quasicristalina, com as propriedades físicas e de transporte da fase quasicristalina, sobre substratos de aço 1020 e da liga de alumínio 4032. Além disso, também foi estudada a aplicação de uma camada de ligação da liga UltraBond 25000 para estudar a melhora na aderência. Na análise da microestrutura a camada de revestimento apresentou algumas porosidades e concentração de óxidos. Nos DRX foram encontradas as fases esperadas Al_5Co_2 e $Al_{13}Co_4$, além das fases $Al_{3,21}Si_{0,47}$, níquel-cfc e alumínio-cfc. Com exceção da amostra com substrato da liga de alumínio 4032 sem camada de ligação da liga UltraBond 25000, as demais apresentaram aderência ideal no ensaio de dobramento. Em relação à microdureza Vickers o revestimento apresentou valores elevados, inclusive superiores à literatura. No ensaio de adesão por tração ficou confirmada a melhora na aderência com o uso da camada de ligação da liga UltraBond 25000. A capacidade de isolamento térmico relativa do revestimento foi confirmada através de ensaios térmicos.

Palavras-chave: Aspensão Térmica. TBC. Liga quasicristalina.

ABSTRACT

SILVA, Tiago M. Obtainment and characterization of aluminum alloy quasicrystalline verging coating by flame spray. 2016. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

The thermal barrier coatings (TBC) are coatings that seek to change the surface properties of components through the use of materials which have low thermal conductivity, high melting point and good mechanical properties at high temperatures. Therefore, looking for improve efficiency and reduce maintenance costs, these coatings are applied mainly in gas turbines and diesel engines. The quasicrystals, duo to their properties of low thermal conductivity and a thermal expansion coefficient that is close to the most common metals substrates, are good candidates to replace the usual ceramics that often fail prematurely in the coating due to differences in thermal expansion coefficient between the coating and the metal substrate. Thus, this term paper shows the analysis of the coatings obtained by thermal spraying method of atomized powders $Al_{71}Co_{13}Fe_8Cr_8$ alloy, a quasicrystalline verging, with the physical and transport properties presented by the quasicrystalline phase, on substrates of a steel 1020 alloy and an aluminum 4032 alloy. Moreover, it was also studied the application of an UltraBond 25000 alloy's bond coat to study an improvement in adhesion. In the analysis of the microstructure the coating showed some porosity and concentration of oxides. In the XRD the expected phases Al_5Co_2 and $Al_{13}Co_4$ were found, besides the $Al_{3,21}Si_{0,47}$, nickel-fcc and aluminum-fcc phases. With the exception of the sample with substrate of the aluminum 4032 alloy without UltraBond 25000 alloy's bond coat, the others samples presented ideal adherence in the test of folding. Regarding the Vickers microhardness, the coating presented the highest values expected, even higher than the literature. In the tensile adhesion test it was verified the improvement in adhesion with the use of the UltraBond 25000 alloy's bond coat. The relative thermal insulation capacity of the coating was confirmed by thermal tests.

Keywords: Thermal Spray. TBC. Quasicristalline alloy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de aplicação do processo de aspersão térmica.....	18
Figura 2 - Formação de um revestimento aspergido termicamente.	19
Figura 3 - Classificação dos processos de aspersão térmica a partir de suas fontes de energia.	20
Figura 4 - Corte transversal de uma tocha para FS a pó.	21
Figura 5 - Corte transversal de uma tocha para FS alimentada por arame ou vareta.	22
Figura 6 - Distribuição da temperatura em um elemento após aplicação de TBC.....	26
Figura 7 - Esquema construtivo do TBC com a função de cada camada.....	27
Figura 8 - Mapa de propriedades de expansão térmica vs condutividade térmica para algumas ligas quasicristalinas e outros materiais em comparação.	31
Figura 9 – Fluxograma dos processos realizados.....	35
Figura 10 - Pós atomizados para o revestimento.	36
Figura 11 - Medidor de rugosidade de superfície TR220.	38
Figura 12 - Pistola de aspersão térmica RotoTec 1A.....	39
Figura 13 - Processo de aspersão térmica com a pistola da RotoTec 1A.....	40
Figura 14 - Microdurômetro modelo TH710.....	41
Figura 15 - Tipos de fratura no Ensaio de Adesão por Tração.....	42
Figura 16 - Avaliação do Ensaio de Dobramento.....	43
Figura 17 – Esquema dos ensaios térmicos.....	45
Figura 18 - Corpos de prova dobrados: a) Substrato de aço 1020, b) Substrato da liga de alumínio 4032, c) Substrato da liga de alumínio 4032 com camada de ligação da liga UltraBond 25000.....	48
Figura 19 - Microscopia Ótica no revestimento aplicado ao substrato de aço 1020 no microscópio ótico: a) Aumento de 50 vezes, b) Aumento de 100 vezes, c) Aumento de 200 vezes, d) Aumento de 400 vezes.	50
Figura 20 - Microscopia Ótica no revestimento aplicado ao substrato de aço 1020 no microdurômetro TH710: aumento de 400 vezes.	51
Figura 21 - Microscopia Ótica no revestimento aplicado ao substrato da liga de alumínio 4032 no microscópio ótico: a) Aumento de 50 vezes, b) Aumento de 100 vezes, c) Aumento de 200 vezes, d) Aumento de 400 vezes.....	52

Figura 22 - Microscopia Ótica no revestimento aplicado ao substrato da liga de alumínio 4032 no microdurômetro TH710: aumento de 400 vezes.	53
Figura 23 - Microscopia Ótica no revestimento aplicado após camada de ligação da liga UltraBond 25000 ao substrato da liga de alumínio 4032 no microscópio ótico: a) Aumento de 50 vezes, b) Aumento de 100 vezes, c) Aumento de 200 vezes, d) Aumento de 400 vezes.	54
Figura 24 - Microscopia Ótica no revestimento aplicado após camada de ligação da liga UltraBond 25000 ao substrato da liga de alumínio 4032 no microdurômetro TH710: aumento de 400 vezes.	55
Figura 25 – Difratoograma de raios-X do revestimento da liga $Al_{71}Co_{13}Fe_8Cr_8$ em substrato de aço 1020.	57
Figura 26 – Difratoograma de raios-X do revestimento da liga $Al_{71}Co_{13}Fe_8Cr_8$ em substrato da liga de alumínio 4032.	58
Figura 27 - Difratoograma de raios-X do revestimento da liga $Al_{71}Co_{13}Fe_8Cr_8$ em substrato da liga de alumínio 4032 com camada de ligação.	59
Figura 28 - Resultados da microdureza Vickers para a amostra com substrato de aço 1020.	60
Figura 29 - Resultados da microdureza Vickers para a amostra com substrato da liga de alumínio 4032.	61
Figura 30 - Resultados da microdureza Vickers para a amostra com substrato da liga de alumínio 4032 com camada de ligação da liga UltraBond 25000.	62
Figura 31 - Superfícies dos corpos de prova cilíndricos após ensaio de adesão por tração: a) Substrato de aço 1020, b) Substrato de aço 1020 com camada da liga UltraBond 25000.	64
Figura 32 - Resultados do primeiro ensaio térmico para a amostra com substrato de aço 1020.	65
Figura 33 - Resultados do primeiro ensaio térmico para as amostras com substrato da liga de alumínio 4032.	66
Figura 34 – Resultados do segundo ensaio térmico para todas as amostras.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos processos de aspersão térmica (parte 1).	22
Tabela 2 - Características dos processos de aspersão térmica (parte 2).	23
Tabela 3 - Vantagens relacionadas aos processos de aspersão térmica.	23
Tabela 4 - Desvantagens relacionadas aos processos de aspersão térmica.....	24
Tabela 5 – Composição química da liga de alumínio 4032.	37
Tabela 6 – Média e desvio padrão do ensaio de microdureza Vickers.	63
Tabela 7 – Resultados do ensaio de adesão por tração.	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
3 JUSTIFICATIVA	15
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1 ASPERSÃO TÉRMICA (AT).....	17
4.1.1 Aspersão térmica a chama (FS).....	20
4.1.2 Comparativo entre os métodos de aspersão térmica	22
4.2 REVESTIMENTOS COMO BARREIRA TÉRMICA (TBC).....	24
4.3 QUASICRISTAIS COMO TBC	29
4.4 SISTEMA Al-Co-Fe-Cr	32
5 MATERIAIS E MÉTODOS	35
5.1 MATERIAL EM PÓ PARA O REVESTIMENTO	35
5.2 PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO	37
5.2.1 Limpeza do Substrato.....	37
5.2.2 Medição da Rugosidade.....	38
5.3 DEPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO	39
5.4 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO.....	40
5.4.1 Caracterização do Revestimento	40
5.4.2 Caracterização Mecânica	41
5.4.3 Ensaio Térmicos	43
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
6.1 RUGOSIDADE E ESPESSURA DO REVESTIMENTO.....	47
6.2 DOBRAMENTO.....	47
6.3 MICROSCOPIA ÓTICA (MO).....	49
6.4 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X (DRX).....	56
6.5 MICRODUREZA VICKERS	59
6.6 ENSAIO DE ADESÃO POR TRAÇÃO	64
6.7 ENSAIOS TÉRMICOS.....	65
7 CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

Os revestimentos para barreira térmica, conhecidos como TBC (*thermal barrier coating*), são aplicados em componentes mecânicos que sofrem degradação devido à corrosão, oxidação ou carga de calor excessiva durante o trabalho em ambientes termicamente drásticos (LIMA; TREVISAN, 2007). Dessa forma, os TBC têm como aplicações principais os motores a diesel e as turbinas a gás, além da aplicação em sistemas de exaustão na indústria automotiva e em propulsores marítimos (LIMA; TREVISAN, 2007; PADTURE et al., 2002; ZIRCOTEC, 2016).

Além disso, sua aplicação em motores a diesel pode apresentar resultados significativos: economia de combustível e óleo lubrificante, maior vida útil do motor, aumento da energia, redução da emissão de gases, diminuição de particulado, redução do nível de ruído, diminuição na temperatura de componentes e diminuição dos custos de manutenção (LIMA; TREVISAN, 2007).

Usualmente o sistema TBC é constituído por um revestimento cerâmico, uma camada de óxido crescida termicamente, uma camada de ligação metálica e um substrato metálico (ALMEIDA, 2006). O uso das cerâmicas nos TBC é devido às propriedades básicas desejáveis ao material da camada de revestimento, como baixa condutividade térmica, ponto de fusão elevado, boas propriedades mecânicas em elevadas temperaturas e um coeficiente de expansão térmica o mais próximo possível do material do substrato e da camada de ligação (OLIVEIRA; DUARTE, 2013).

Apesar das boas propriedades térmicas para aplicação, os TBC cerâmicos podem apresentar falhas prematuras no revestimento, sobretudo relacionadas com a diferença no coeficiente de expansão térmica entre os materiais que compõe o sistema, com a oxidação da camada de ligação e com mudanças de composição (WOLF, 2015). Dessa forma, o uso dos quasicristais em revestimentos para barreira térmica passou a ser cogitado, pois além desses materiais apresentarem baixos valores de condutividade térmica, boa resistência à corrosão ao enxofre e baixa taxa de oxidação, apresentam coeficiente de expansão térmica próximo dos materiais de substratos mais comuns (DUBOIS, 2000). Além disso, esses materiais também apresentam ductilidade quando aplicados em temperaturas elevadas e elevada resistência à oxidação e corrosão, que protegem o substrato em ambientes agressivos (DUBOIS, 2000; WOLF, 2015).

Os quasicristais foram descobertos em 1982, pelo químico israelense Daniel Shechtman (CARACELLI, 2011) e são materiais que possuem uma estrutura entre cristais e sólidos amorfos, pois embora possuam uma estrutura ordenada, não apresentam periodicidade (SOUZA, 2009; WOLF, 2015).

Dentre os vários sistemas quasicristalinos, um que chama atenção é o sistema Al-Co-Fe-Cr, pois apresenta excelente combinação de baixa condutividade térmica e expansão térmica próxima dos possíveis substratos metálicos, além de apresentar um alto ponto de fusão (WOLF, 2015). Essa liga é chamada de aproximadamente quasicristalina, pois possui como fase de equilíbrio a fase cristalina hexagonal Al_5Co_2 , a qual apesar de não possuir estrutura quasicristalina possui relações estruturais e propriedades similares as do quasicristal. Além dessa fase também há presença da fase monoclinica $Al_{13}Co_4$, a qual, após tratamento térmico de recozimento em elevadas temperaturas, desaparece (WOLF, 2015). Sendo assim, esse é o motivo para a escolha da liga com composição nominal $Al_{71}Co_{13}Fe_8Cr_8$ (%at.) para fabricação dos pós para o revestimento.

Para realizar o recobrimento do substrato metálico podem ser usados vários métodos de aspersão térmica. Um desses métodos é a aspersão térmica por chama, ou *Flame Spray* (FS), que é o método mais básico e convencional, podendo o material de alimentação estar na forma de pó ou arame (OLIVIO, 2012). O FS apresenta revestimentos com nível de porosidade em torno de 10 a 20% e espessuras tipicamente entre 100 e 2500 μm (PAWLOWSKI, 2008). Porém, o processo *Flame Spray* possui um baixo custo relativo (THORPE¹, 1993 apud PAREDES, 2009) com equipamentos de manuseio e manutenção muito simples, boa produtividade e baixos níveis relativos de ruídos (AWS, 2014), o que torna o processo extremamente interessante do ponto de vista econômico e industrial.

Por esses fatores, o método FS com o material a ser aspergido na forma de pó foi escolhido para realizar o recobrimento com material da liga quasicristalina aproximante $Al_{71}Co_{13}Fe_8Cr_8$ sobre substratos de aço 1020 e da liga de alumínio 4032, a qual possui como aplicação pistões de motores a diesel.

¹ Thorpe, M. L. Thermal Spray – Industry in transition. **Advanced materials & processes**, v. 143, n. 5, p. 50-61. 1993.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal do presente trabalho é avaliar as propriedades de aderência e de barreira térmica de revestimentos obtidos a partir de pós atomizados da liga $\text{Al}_{71}\text{Co}_{13}\text{Fe}_8\text{Cr}_8$ aplicados em substratos de aço 1020 e da liga de alumínio 4032, com e sem uso de camada de ligação, aplicados através da técnica de aspersão térmica por chama a pó.

3 JUSTIFICATIVA

Neste trabalho foi buscada uma liga, para o revestimento, que possuísse propriedades de barreira térmica, a fim de estudar o seu funcionamento como um isolante térmico em substratos de material que sofre as degradações citadas acima, nos seus usos tradicionais na indústria.

Assim, foi escolhida a liga $\text{Al}_{71}\text{Co}_{13}\text{Fe}_8\text{Cr}_8$ como pó para o revestimento devido ao fato de ser uma liga quasicristalina aproximante, a qual segundo Wolf (2015) apresenta uma excelente combinação entre baixa condutividade térmica e coeficiente de expansão térmica próximo aos substratos mais comuns (aços, alumínio e cobre), além de apresentar um alto ponto de fusão (próximo de 1100°C). Dessa forma, com a baixa condutividade térmica esse material funciona como um isolante térmico e o coeficiente de expansão térmica, próximo aos substratos mais comuns, faz com que diminuam as ocorrências de tensões térmicas, durante e/ou após a aspersão térmica, as quais podem comprometer principalmente a aderência do revestimento ao substrato.

Em relação ao substrato, foram escolhidos o aço 1020 e a liga de alumínio 4032, a fim de discutir e comparar os resultados obtidos. O aço 1020 foi escolhido por ser uma liga de fácil aquisição e por ser empregada em vários trabalhos sobre aspersão térmica. Já a liga de alumínio 4032 foi escolhida pelo fato de sua aplicação abranger pistões de motores a diesel (ASM HANDBOOK, 1992), onde são aplicados revestimentos como barreira térmica buscando aumentar a temperatura de operação e diminuir a perda de calor, a fim de melhorar o desempenho e aumentar a eficiência energética (BEARDSLEY, 2008).

Além disso, foi escolhida uma liga de alumínio buscando um coeficiente de expansão térmica próximo ao do revestimento, visto que conforme Wolf e Afonso (2014) o sistema Al-Co-Fe-Cr possui um coeficiente de expansão térmica de aproximadamente $14 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ e segundo o Handbook da ASM (1992) a liga de alumínio 4032 tem coeficiente de expansão térmica de $19,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, buscando evitar tensões térmicas. Vale ressaltar que a YSZ (zircônia estabilizada com ítria), revestimento cerâmico mais comum (SUCHARSKI, 2012), possui coeficiente de expansão térmica entre 6×10^{-6} e $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (WOLF; AFONSO, 2014).

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 ASPERSÃO TÉRMICA (AT)

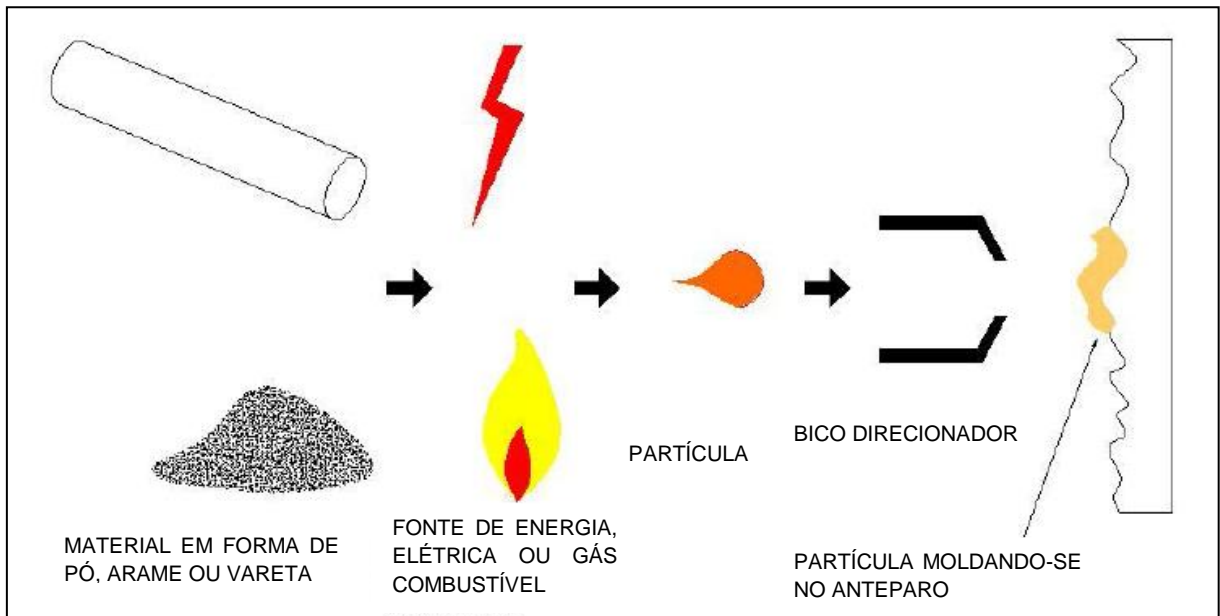
Antigamente, conforme Paredes (2009), os revestimentos protetores eram aplicados para proteção contra a corrosão, mas com o avanço das pesquisas e o desenvolvimento de novos materiais os revestimentos passaram a ser utilizados também para elevar a resistência ao desgaste, para aumentar os isolamentos térmico e elétrico e contra incompatibilidades químicas e biológicas. Dessa forma, o desenvolvimento da tecnologia de aspersão térmica está baseado na necessidade de aumentar a vida útil de sistemas e peças, elevando, assim, o desempenho dos sistemas mecânicos.

Segundo Marques (2003) metais, óxidos, compostos intermetálicos, cermets, plásticos orgânicos e alguns vidros podem ser utilizados como material para revestir substratos, os quais, por sua vez, incluem metais, óxidos, cerâmicas, vidros, a maioria dos plásticos e madeira. Além disso, Marques (2003) cita aplicações da aspersão térmica na fabricação de componentes nas indústrias automotiva, aeroespacial, elétrica, eletrônica, de petróleo e de geração de energia elétrica, além do seu uso na manutenção, tanto em oficina como no campo.

O método de aspersão térmica consiste em processos nos quais partículas finamente divididas de materiais para revestimentos, que podem ser metálicos ou não metálicos, são depositadas sobre um substrato devidamente preparado para formar uma camada superficial. As variações básicas nos processos de AT se referem ao material aplicado e aos métodos de aquecimento e aceleração das partículas aspergidas (MARQUES, 2003).

Segundo Paredes (2009) para a aspersão térmica é necessário que se tenha o material de aporte, uma fonte de energia para fundir, total ou parcialmente o material para o revestimento, e transmitir energia cinética às partículas e ainda um bico para direcionar a aplicação, conforme Figura 1.

Figura 1 - Esquema de aplicação do processo de aspersão térmica.

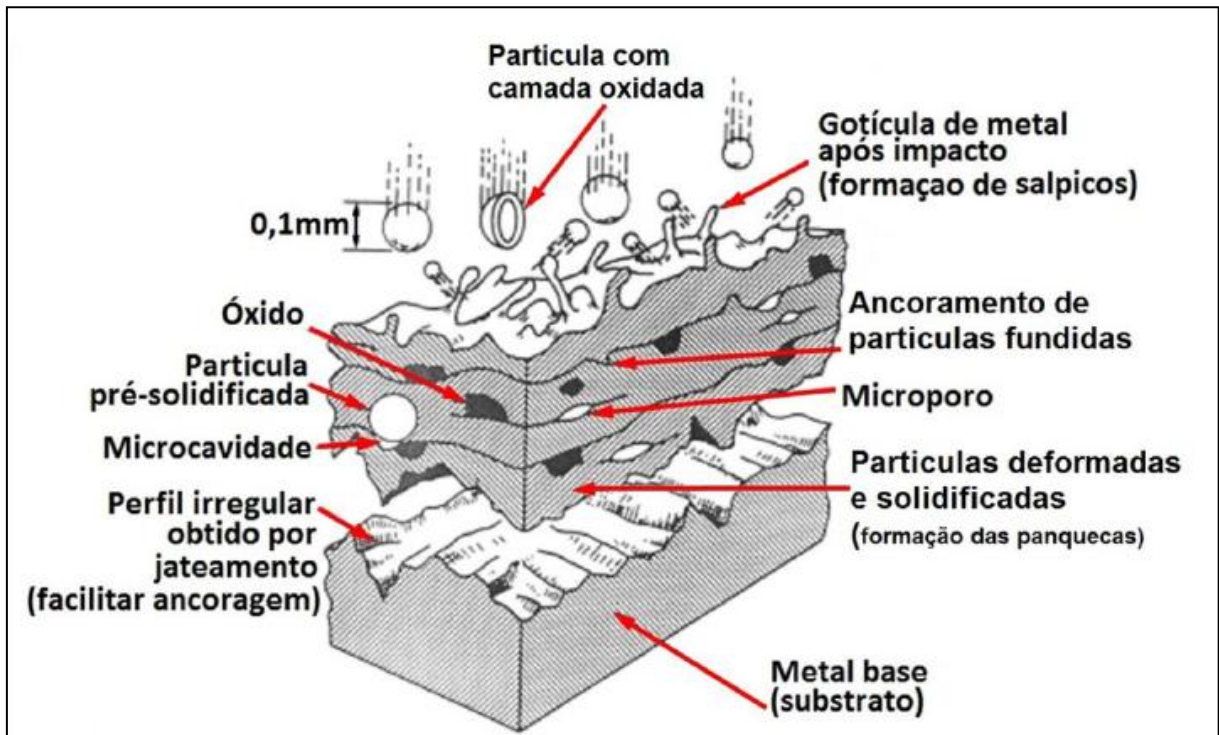


Fonte: Paredes (2009).

No processo de AT, Paredes (2009) cita que é importante garantir elevada aderência, baixa porosidade, facilidade de deposição e custo adequado comparado com outras técnicas de deposição do material.

De forma geral, Sucharski (2012) coloca que a aspersão térmica é dada pelo material do revestimento, na forma de pó, arame ou vareta, o qual é alimentado em uma pistola de aspersão que possui uma fonte de calor, cuja origem pode ser chama por combustão de gases, plasma, gases quentes ou arco elétrico. Essa fonte de calor além de fundir (completa ou parcialmente) o material para o revestimento fornece, juntamente com o gás de transporte (ar comprimido ou gás inerte), energia cinética para acelerar essas partículas em direção ao substrato, as quais se deformam, arrefecem e se ancoram mecanicamente nas rugosidades do substrato ao atingirem essa superfície. Esses eventos formam uma estrutura tipicamente lamelar, composta por partículas deformadas, além de inclusões de óxidos, vazios e poros, conforme Figura 2.

Figura 2 - Formação de um revestimento aspergido termicamente.



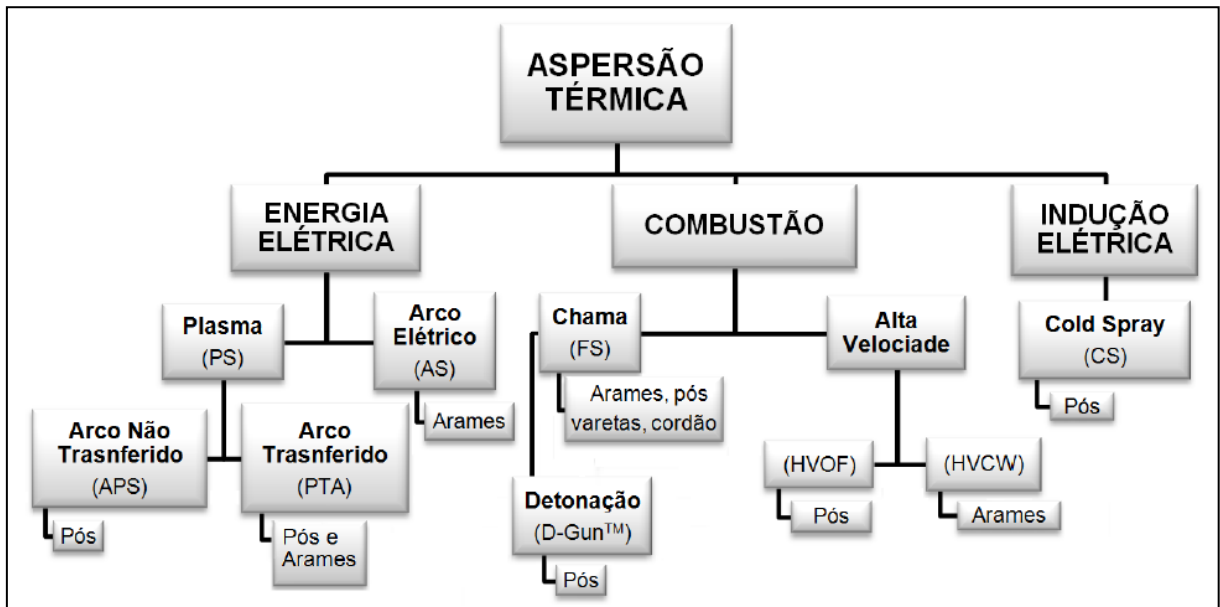
Fonte: Grainger², 1989 (apud SUCHARSKI, 2012).

Conforme Sucharski (2012) os processos de aspersão térmica podem ser classificados a partir da matéria-prima (pós, arames, varetas ou cordões flexíveis), pela forma de aceleração das partículas (ar comprimido ou gás inerte) e pela forma de aquecimento (combustão ou eletricidade), os quais estão representados na Figura 3, com a classificação dividida em três grandes grupos de fontes de aquecimento: energia elétrica, combustão e indução elétrica.

Para a realização deste trabalho será utilizado o processo de aspersão térmica a chama (FS), com o material na forma de pó. Dessa forma, os tópicos seguintes farão uma revisão sobre esse método e também a comparação entre o processo FS e os demais através de tabelas com as características, as vantagens e as desvantagens de cada método.

² GRAINGER, Stan. **Engineering Coatings – design and application**. 1. ed. Cambridge: Abington Publishing, 1989.

Figura 3 - Classificação dos processos de aspersão térmica a partir de suas fontes de energia.



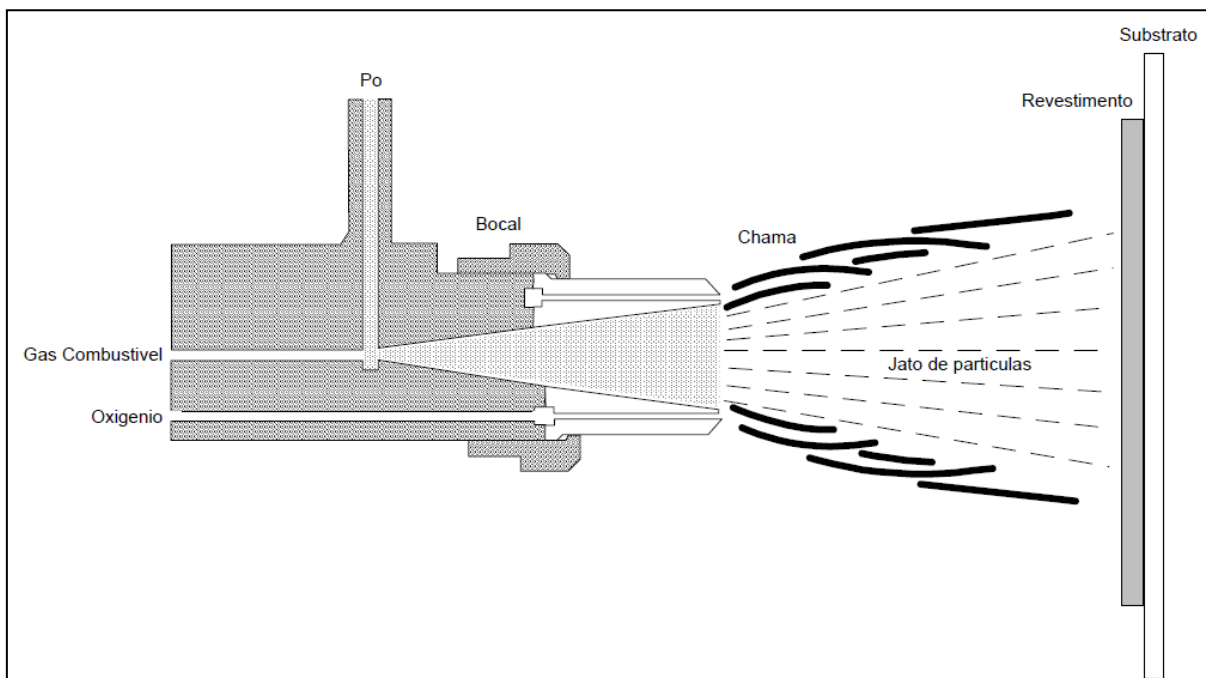
Fonte: Sucharski (2012).

4.1.1 Aspersão térmica a chama (FS)

O processo de aspersão térmica a chama, também conhecido como processo a chama oxiacetilênica, segundo Olivio (2012) utiliza a energia gerada pela combustão de um gás combustível misturado com oxigênio para fundir o material de alimentação (pó ou arame), o qual é acelerado ao substrato através de um jato de ar comprimido ou gás inerte (nitrogênio ou argônio). Esse processo é o mais básico e convencional e podem ser utilizados metais, ligas metálicas, materiais cerâmicos e até alguns plásticos como materiais (PAREDES, 2009).

No processo FS utilizando o material a ser aspergido na forma de pó, Paredes (2009) relata que a alimentação de gás é axial e a alimentação de pó é geralmente por gravidade, conforme Figura 4. No instante em que as partículas encontram a chama ocorre a fusão desse material e um jato de ar comprimido (ou gás inerte) acelera essas partículas fundidas em direção ao substrato. Segundo o mesmo autor, utilizando o FS com pó o revestimento tem menor resistência adesiva e resistência coesiva, além de maior porosidade em geral, devido às menores velocidades alcançadas pelas partículas.

Figura 4 - Corte transversal de uma tocha para FS a pó.

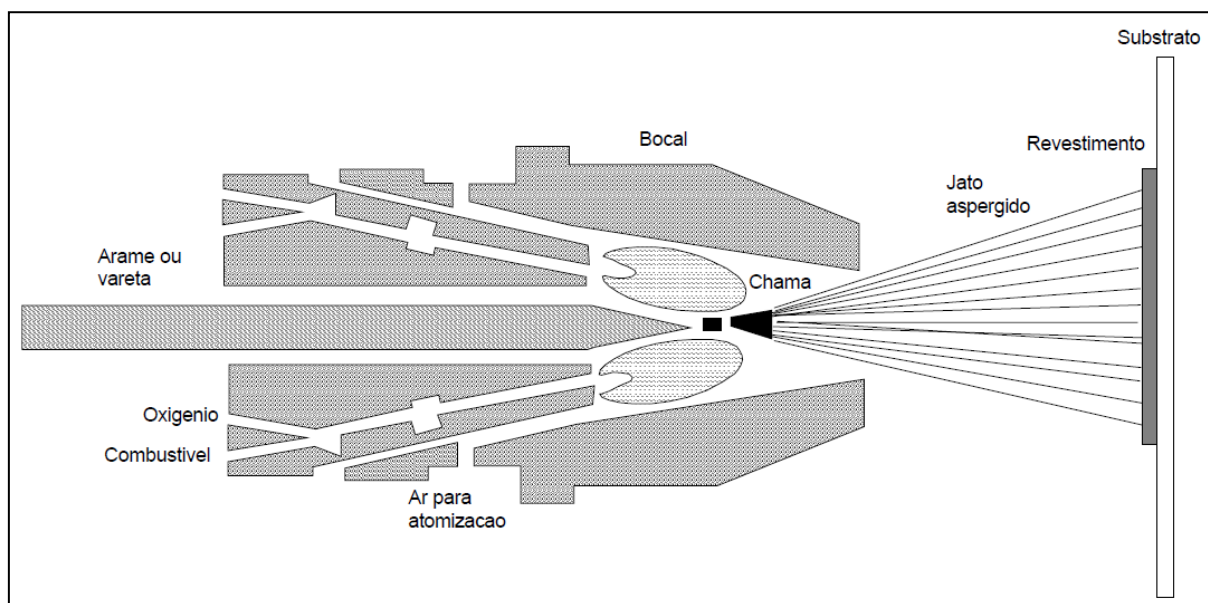


Fonte: Marques (2003).

Já para a aplicação da aspersão térmica a chama com material na forma de vareta ou arame, Paredes (2009) expõe que o equipamento deve possuir um sistema de alimentação de arame de forma contínua e concêntrica, o qual é fundido no bocal pela chama. Para aspergir o material normalmente é utilizado gás comprimido, o qual juntamente com o formato do bocal faz com que haja a pulverização com maior energia cinética (velocidade). O esquema desse processo está representado na Figura 5.

Uma vantagem dos arames sobre os pós reside no fato de que como o grau de fusão é significativamente maior, os revestimentos produzidos são mais densos. Além disso, o ar atomizante produz gotículas menores, que resultam em revestimentos com menores rugosidades (CANARIM, 2013).

Figura 5 - Corte transversal de uma tocha para FS alimentada por arame ou vareta.



Fonte: Marques (2003).

Conforme Paredes (2009) as principais variáveis a ser reguladas no processo de FS são a pressão e fluxo de ar comprimido e o fluxo de gás combustível e oxigênio.

4.1.2 Comparativo entre os métodos de aspersão térmica

As Tabelas 1 e 2 mostram características dos diferentes processos de aspersão térmica.

Tabela 1 - Características dos processos de aspersão térmica (parte 1).

	Vazão de gases (m ³ /h)	Temperatura média (°C)	Atmosfera em torno da gotícula	Velocidade de impacto (m/s)	Aderência relativa (1 a 10)
Chama (Pó)	11	2200	CO, CO ₂ , H ₂ O	30	3
Chama (Arame)	71	2800	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	180	4
Arco (Arame)	71	5500	N ₂ , O ₂	240	6
Plasma	4,2	5500	N ₂ , Ar, H ₂ , O ₂	240	6
Detonação	11	3900	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	910	8
HVOF	28-57	3100	N ₂ , CO, CO ₂ , H ₂ O	610-1060	8

Fonte: Thorpe, 1993 (apud MARQUES, 2003).

Tabela 2 - Características dos processos de aspersão térmica (parte 2).

	Coesão interlamelar	Teor de óxidos (%)	Custo relativo (1 a 10)	Taxa de deposição máxima (kg/h)	Potência (kW)	Energia para fusão (kW/kg)
Chama (Pó)	Baixa	6	3	7	25-75	11-22
Chama (Arame)	Média	4	3	9	50-100	11-22
Arco (Arame)	Alta	0,5-3	1	16	4-6	0,2-0,4
Plasma	Alta	0,5-1	5	5	30-80	13-22
Detonação	Muito alta	0,1	10	1	100-270	220
HVOF	Muito alta	0,2	5	14	100-270	22-200

Fonte: Thorpe, 1993 (apud MARQUES, 2003).

A Tabela 3 apresenta as vantagens relacionadas aos processos de aspersão térmica.

Tabela 3 - Vantagens relacionadas aos processos de aspersão térmica.

(continua)

Vantagens	
	Excelente coesão
Detonação	Camada com baixo índice de porosidade Grau de acabamento muito bom durante os trabalhos posteriores Permite a aplicação de três tipos de camadas:
Chama Oxiacetilênica	- Ligas para camadas fundidas, resistentes a corrosão e oxidação; - Ligas com carbetos, recomendados onde as condições de abrasão são severas; - Ligas com cerâmicas, resistentes ao desgaste, calor e abrasão e também funcionam como isolantes térmicos e elétricos.
	Maior aderência Maior coesão entre as partículas
Arco Elétrico	Maior velocidade de deposição chegando a aplicar 30 kg/h Materiais mais usados são: aço inoxidável martensítico e austenítico, bronze, alumínio, cobre, molibdênio e carbetos Menor porosidade Maior dureza
HVOF	Maior quantidade de óxidos Melhor resistência ao desgaste Maior adesão

Tabela 3 – Vantagens relacionadas aos processos de aspersão térmica.

(conclusão)

Vantagens	
Plasma	Propriedades físicas e metalúrgicas das camadas depositadas superiores às aplicadas pelos outros processos
	Porosidade reduzida
	Melhor aderência
	Menor conteúdo de óxidos

Fonte: Gimenes³ et al. (apud PAREDES, 2009).

Já a Tabela 4 apresenta as desvantagens de cada processo de aspersão térmica.

Tabela 4 - Desvantagens relacionadas aos processos de aspersão térmica.

Desvantagens	
Detonação	Operações devem ser automatizadas
	Operações devem ser controladas a distância
	Ambiente necessita proteção acústica
	Altíssimo nível de ruído, acima de 150 decibéis
Chama Oxiacetilênica	Oxidação das partículas quando transportadas pelo ar comprimido
	Aderência prejudicada
Arco elétrico	Necessário o uso de gás inerte para transporte de partículas
	Possui as mesmas características da chama oxiacetilênica
HVOF	Devido utilização dos combustíveis (propileno, propano ou querosene), requer maior atenção a segurança da instalação
Plasma	Melhor qualificação do operador
	Proteção extra ao operador, devido à energia liberada

Fonte: Gimenes et al. (apud PAREDES, 2009).

4.2 REVESTIMENTOS COMO BARREIRA TÉRMICA (TBC)

Revestimentos para barreira térmica, assim como os demais tipos de revestimentos, são usados buscando alterar as propriedades da superfície de

³ GIMENES, Luiz et al. **Comparativo entre os processos de aspersão térmica na manutenção.** Infosolda.

componentes, conferindo propriedades completamente diferentes, objetivando mudar a resposta ao ambiente. Dessa forma, com os TBC são buscados benefícios como redução dos custos de manutenção, temperaturas maiores de operação, redução das cargas térmicas, aumento da resistência ao desgaste, à erosão e à corrosão e redução da oxidação a altas temperaturas (ALMEIDA, 2005).

Sendo assim, Oliveira e Duarte (2013) citam algumas propriedades básicas desejáveis para o material da camada de revestimento, como uma baixa condutividade térmica, ponto de fusão elevado, boas propriedades mecânicas em elevadas temperaturas e um coeficiente de expansão térmica o mais próximo possível do material do substrato e da camada de ligação, buscando aliviar as tensões térmicas.

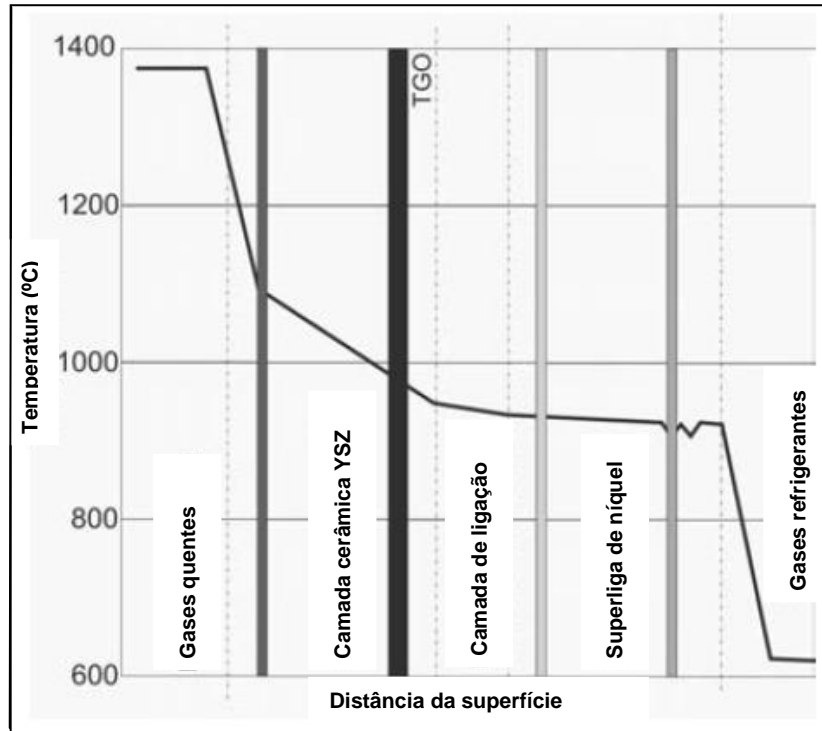
Como principais aplicações dos revestimentos para barreira térmica, Lima e Trevisan (2007), Padture et al. (2002) e a Zircotec (2016) colocam a indústria automotiva (motores a diesel e sistemas de exaustão), a indústria aeronáutica (turbinas a gás) e os propulsores marítimos.

Segundo Beardsley (2008) o desenvolvimento dos TBC para uso nos motores a diesel (pistões e cabeçotes) possui os mesmos objetivos da sua aplicação em turbinas a gás: aumento da eficiência energética derivada de maiores temperaturas de operação e menor perda de calor. Dessa forma, o uso dos TBC em componentes de motores a diesel permite maiores temperaturas e maior pressão de combustão, ao mesmo tempo em que diminui perdas de calor para o refrigerante, com benefício direto na performance e eficiência do motor.

Lima e Trevisan (2007) citam algumas vantagens da tecnologia TBC em estudos realizados por empresas de consultoria americanas para fabricantes de motores a diesel: economia de combustível de até 11%, vida do motor até 20% maior, aumento da energia em até 10%, redução da emissão de gases entre 20 e 50%, diminuição de particulados em até 52%, economia de óleo lubrificante de até 15%, redução de até 3 dB do nível de ruído, diminuição de até 20% dos custos de manutenção e uma redução de até 100°C na temperatura dos componentes.

Conforme Figura 6, Moskal (2009) mostra a distribuição da temperatura em um ponto quente de uma turbina a gás, exposta ao desgaste, que sofreu a deposição de um TBC.

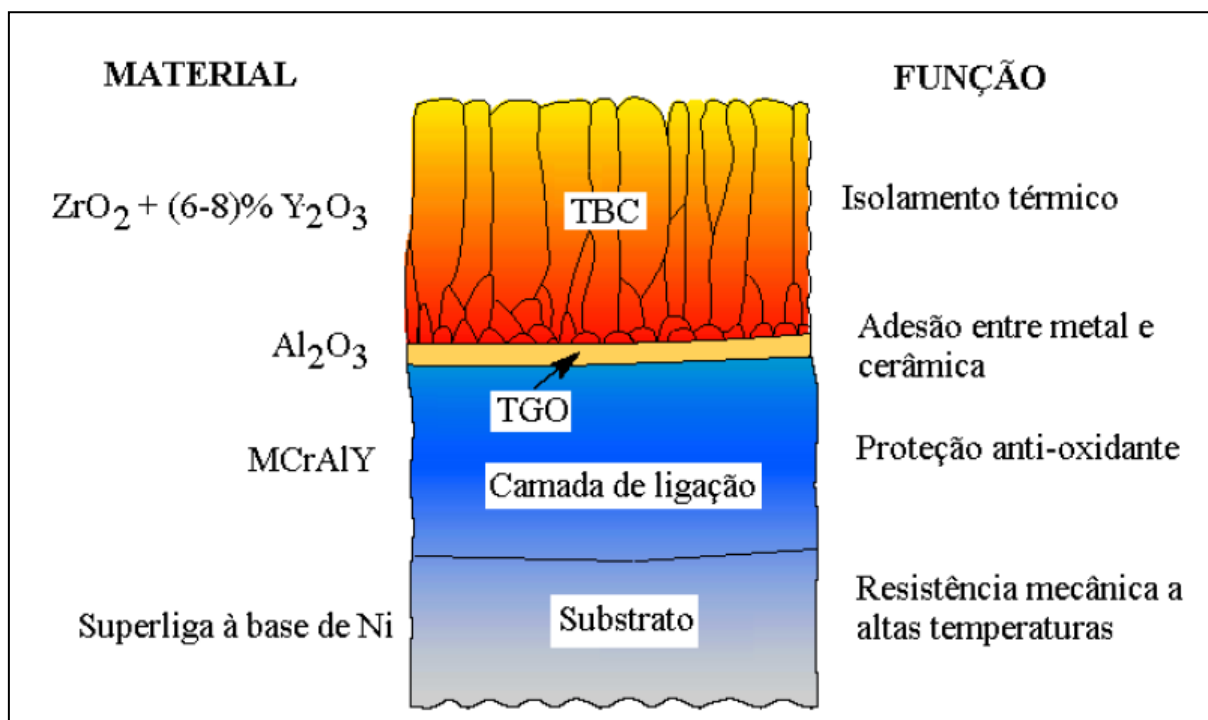
Figura 6 - Distribuição da temperatura em um elemento após aplicação de TBC.



Fonte: Adaptado de Moskal (2009).

Segundo Almeida (2005) o sistema TBC é constituído por um revestimento cerâmico (a barreira térmica propriamente dita), uma camada de óxido crescida termicamente (*Thermally Grown Oxide* - TGO), constituída predominantemente de α -alumina, um revestimento de ligação (*Bond Coat* - BC), e um substrato (normalmente uma superliga à base de níquel). De forma geral, o revestimento cerâmico é o isolante térmico, a TGO (produto da reação de oxidação) funciona como elemento de adesão entre o óxido e o metal, a camada de ligação é responsável pela proteção antioxidante e o substrato da superliga de níquel suporta as cargas estruturais. Todas essas camadas, ainda, estão sujeitas a mecanismos de difusão e interação contribuindo para o desempenho e durabilidade do sistema. O esquema de um TBC está representado na Figura 7.

Figura 7 - Esquema construtivo do TBC com a função de cada camada.



Fonte: Almeida (2005).

A configuração exposta na Figura 7 apresenta como vantagem uma transição suave do coeficiente de expansão térmica, visando reduzir as tensões térmicas geradas durante a operação. São apresentados valores de expansão térmica de $16 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ para o substrato, de $11 - 13 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ para a camada de ligação e de $5 - 10 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ para o revestimento cerâmico (ALMEIDA, 2005).

Segundo Sucharski (2012) o revestimento cerâmico (*Top Coat - TC*) é composto na maioria dos casos de óxido de zircônia (ZrO_2) estabilizado com óxido de ítrio (Y_2O_3), resultando em zircônia estabilizada com ítria (YSZ). Esse material apresenta um dos menores valores de condutividade térmica a alta temperatura ($\sim 2,3 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ a $1000^\circ C$ para uma densidade de 100%), o que vai de encontro com o propósito dessa camada, isolar termicamente. Sua espessura normalmente está na faixa de $250-375 \mu m$, apresentando um nível de porosidade que não compromete a aderência à camada de ligação e nem a aderência interlamelar (em revestimentos obtidos por aspersão térmica).

A camada de óxido crescida termicamente (TGO), conforme Sucharski (2012) é uma camada de óxido formada em elevadas temperaturas entre o revestimento cerâmico e a camada de ligação, não sendo um revestimento depositado. Essa formação é resultado do efeito da oxidação da camada de ligação

durante ciclo térmico em operação, mas em alguns processos de obtenção dos TBC a TGO também pode ser gerada durante os processos de deposição da camada de ligação ou durante a deposição do revestimento cerâmico. Essa camada de óxido crescida termicamente tem como principal função garantir a aderência entre os revestimentos cerâmico e metálico e inibir o processo de oxidação da camada de ligação, sendo constituído principalmente de alumina alfa ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), efeito da difusão do oxigênio para dentro do revestimento.

A camada de revestimento metálico ou camada de ligação, conforme Sucharski (2012) tem como função garantir a aderência do revestimento cerâmico, sendo responsável pela eficiente resistência à oxidação e corrosão a quente, além da baixa susceptibilidade de criar fases frágeis e alta resistência à difusão dos componentes entre o revestimento e o substrato. Normalmente essa camada é uma superliga do tipo MCrAlY (onde o metal “M” pode ser níquel e/ou cobalto) ou uma camada de difusão do tipo (Ni, Pt)Al, mantendo uma espessura que varia na ordem de 75-125 μm . Quando produzida por aspensão térmica, esperam-se como características ideais dessa camada os menores níveis de porosidade e oxidação interlamelar possíveis, sem diminuir a aderência ao substrato.

Já em relação ao substrato o material é geralmente uma superliga a base de níquel ou cobalto, porém ligas de titânio, intermetálicos Ti-Al e ligas de nióbio também podem ser aplicadas (SUCHARSKI, 2012).

Wolf (2015) cita duas técnicas principais de aplicação dos TBC: *Plasma Spray* (PS) e *Physical Vapor Deposition* (PVD). Almeida (2005) expõe que a deposição por PVD resulta na formação de uma estrutura colunar, favorecendo a acomodação das tensões mecânicas geradas durante os ciclos térmicos devido à ligação fraca entre as colunas individuais monocristalinas promovidas pelos contornos de grãos, e o processo PS resulta em uma estrutura lamelar devido à fusão, aceleração e impacto das partículas com o substrato, podendo incorporar de 10 a 20% de porosidade à microestrutura da camada cerâmica, além de poder ocorrer à formação de microtrincas, tendendo a reduzir o módulo de elasticidade da cerâmica e minimizando as tensões geradas durante o uso, porém tornando o revestimento susceptível aos danos causados por impactos de partículas.

Almeida (2005) ainda comenta que como na aplicação dos revestimentos por PS o mecanismo de aderência é largamente mecânico, a camada de ligação deve ter superfície áspera, enquanto que na aplicação de revestimentos por PVD

uma superfície lisa da camada de ligação e temperatura adequada do substrato garantem uma estrutura colunar e uniforme, apresentando desempenho superior, sendo esse caso o mecanismo de aderência obtido por ligação química entre as camadas cerâmica e de ligação através da TGO.

Embora os TBC apresentem boas propriedades térmicas para aplicação, Wolf (2015) cita alguns mecanismos de falha que podem levar a falhas prematuras do revestimento. Dentre eles, os principais estão relacionados com a diferença de coeficiente de expansão térmica entre os materiais que compõe o sistema, com a oxidação da camada de ligação e com mudanças de composição. Um exemplo citado por Beardsley (2008) é na aplicação de TBC nos motores a diesel, onde o revestimento está sujeito a elevadas pressões, promovendo o aparecimento de tensões de flexão em determinados pontos do material, induzindo a falha.

Devido a esses problemas, Dubois (2000) cita o surgimento do uso de revestimentos quasicristalinos nos TBC, pois além desses materiais apresentarem baixos valores de condutividade térmica, boa resistência à corrosão ao enxofre e baixa taxa de oxidação, apresentam coeficiente de expansão térmica próximo dos materiais de substratos mais comuns (aço, ferro fundido, alumínio e cobre). Esse assunto será tratado no tópico seguinte.

4.3 QUASICRISTAIS COMO TBC

Materiais quasicristalinos possuem estrutura que se encaixa entre os cristais e os sólidos amorfos, porém apesar de possuírem uma estrutura ordenada, não podem ser classificados como materiais cristalinos, pois não apresentam certas propriedades cristalográficas que definem um cristal (WOLF, 2015).

Os quasicristais embora ordenados, não apresentam periodicidade, ou seja, não se repetem a intervalos regulares. Dessa forma, os quasicristais apresentam apenas um ordenamento rotacional, não apresentando ordenamento translacional, o que não permite sua identificação como material cristalino pela cristalografia clássica (SOUZA, 2009).

Para Souza (2009, p. 13) “um quasicristal pode ser relacionado como constituído de aglomerados icosaédricos de átomos metálicos, todos orientados da mesma forma, e separados por quantidades variáveis de materiais desordenados”.

Além disso, os quasicristais se caracterizam por apresentarem baixa condutividade térmica e alta resistividade (SOUZA, 2009).

Segundo Wolf (2015, p. 12) “as ligas quasicristalinas são formadas em regiões de faixa composicional muito estreita e com regiões de composição de outras fases intermetálicas que, em geral, se formam juntamente com as fases quasicristalinas”.

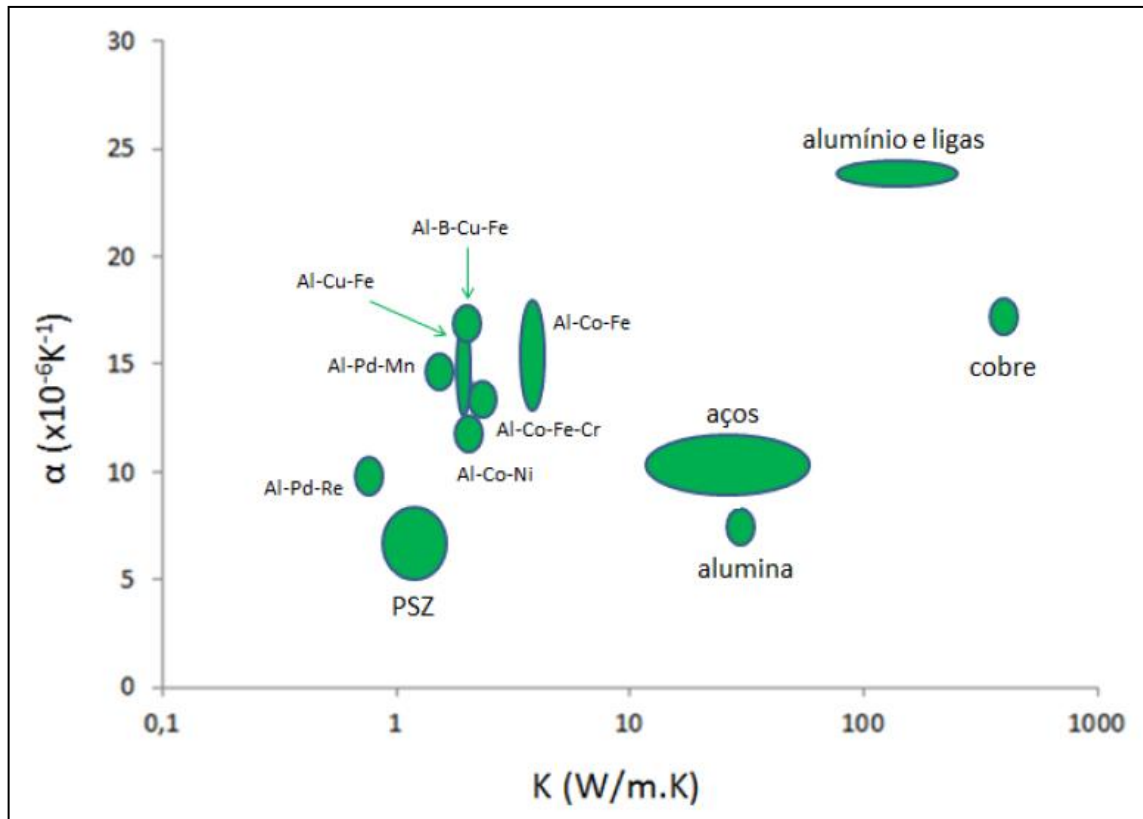
As fases quasicristalinas formadas nos diversos sistemas formadores de quasicristais podem ser termodinamicamente estáveis ou termodinamicamente metaestáveis. As fases quasicristalinas termodinamicamente metaestáveis são fabricadas por técnicas de solidificação rápida e não são previstas nos diagramas de fase. Além disso, quando aquecidas, transformam-se em fases estáveis cristalinas e perdem a estrutura quasicristalina. Já as fases termodinamicamente estáveis são formadas através de solidificação lenta, sendo previstas nos diagramas de equilíbrio (HUTTUNEN-SAARIVIRTA, 2004).

Shaitura e Enaleeva (2007) citam que as principais propriedades que chamam atenção para aplicações dos quasicristais incluem um baixo coeficiente de atrito, alta dureza, resistência ao desgaste e a oxidação e baixa condutividade térmica e elétrica. Porém sua aplicação é limitada pela alta fragilidade e baixa deformação a temperatura ambiente.

As aplicações de materiais quasicristalinos como TBC, ocorrem, segundo Dubois (2000) e Wolf (2015), devido à baixa condutividade térmica desses materiais, devido a terem o valor de coeficiente de expansão térmica próximo das ligas metálicas usadas como substrato e devido a apresentarem ductilidade quando aplicados em temperaturas elevadas. Vale ressaltar a elevada resistência à oxidação e corrosão dessas ligas, que protegem o substrato em ambientes agressivos (WOLF, 2015).

A Figura 8 mostra um mapa de propriedades de condutividade térmica por coeficiente de expansão térmica de alguns sistemas quasicristalinos, de alguns materiais cerâmicos e dos materiais mais comumente usados como substratos em revestimentos.

Figura 8 - Mapa de propriedades de expansão térmica vs condutividade térmica para algumas ligas quasicristalinas e outros materiais em comparação.



Fonte: Wolf e Afonso (2014).

Conforme é mostrado na Figura 8 e segundo Wolf (2015) os sistemas quasicristalinos Al-Pd-Re, Al-Co-Ni e Al-Co-Fe-Cr apresentam as melhores combinações de temperatura de fusão mais elevada, menor condutividade térmica e expansão térmica mais próxima dos possíveis substratos, sendo que o sistema Al-Co-Fe-Cr, entre os estudados, é apresentado na literatura com o maior ponto de fusão (próximo de 1100°C). Dessa forma, essa é a justificativa para a escolha do material para revestimento utilizado nesse trabalho, o qual foi obtido de uma liga do sistema Al-Co-Fe-Cr. Esse sistema será mais bem detalhado no próximo tópico.

Como problemas apresentados no uso de materiais quasicristalinos em TBC, Wolf (2015) coloca o baixo ponto de fusão (entre 800 e 1000°C) em relação aos materiais cerâmicos e a interdifusão existente entre o revestimento e o substrato quando em contato com temperaturas acima de 700°C.

4.4 SISTEMA Al-Co-Fe-Cr

Conforme abordado no item anterior, o sistema quasicristalino Al-Co-Fe-Cr apresenta uma boa combinação de propriedades para uso em TBC, apresentando baixa condutividade térmica, coeficiente de expansão térmica próximo dos substratos metálicos e um alto ponto de fusão. Dessa forma, esse sistema será abordado nesse tópico, sobretudo a liga escolhida como pó para o revestimento.

Essa liga tem a composição nominal $\text{Al}_{71}\text{Co}_{13}\text{Fe}_8\text{Cr}_8$ (%at.) e, segundo Wolf (2015) já foi fabricada pela Saint-Gobain, chamada comercialmente pelo nome CRISTOME BT1, embora possua escassas e conflitantes informações na literatura. Entretanto, analisando várias pesquisas realizadas em torno da liga, Wolf conseguiu chegar a uma conclusão.

A liga chamada de CRISTOME BT1 é, na realidade, uma liga cuja fase de equilíbrio é a fase cristalina hexagonal Al_5Co_2 , que apesar de não possuir estrutura quasicristalina é um aproximante quasicristalino, com relações estruturais e propriedades similares ao do quasicristal (WOLF, 2015).

Segundo Wolf (2015, p. 29) “além da fase Al_5Co_2 , também há presença da fase monoclinica $\text{Al}_{13}\text{Co}_4$, embora essa última, se realizado um tratamento térmico de recozimento em elevadas temperaturas, desapareça, restando apenas a fase hexagonal Al_5Co_2 ”.

Em seu trabalho, Wolf (2015) caracterizou as amostras em pó por difração de raios-X (DRX), por calorimetria diferencial de varredura (DSC), por microscopia eletrônica de varredura (MEV), por microscopia eletrônica de transmissão (MET), por análise de difração de elétrons e por microanálise por EDS, por análise de espectroscopia de absorção atômica (ICP-IO) e pela técnica de picnometria, a fim de caracterizar a liga $\text{Al}_{71}\text{Co}_{13}\text{Fe}_8\text{Cr}_8$.

Dessa forma, Wolf (2015) apresentou os seguintes resultados: as amostras que apresentaram menor tamanho médio de partícula foram fabricadas com o menor bocal de atomização e, conforme análise química por ICP-IO, a composição química obtida foi muito próxima da nominal, com certa perda de ferro no processo de atomização e com um teor levemente superior de ferro na amostra submetida à moagem.

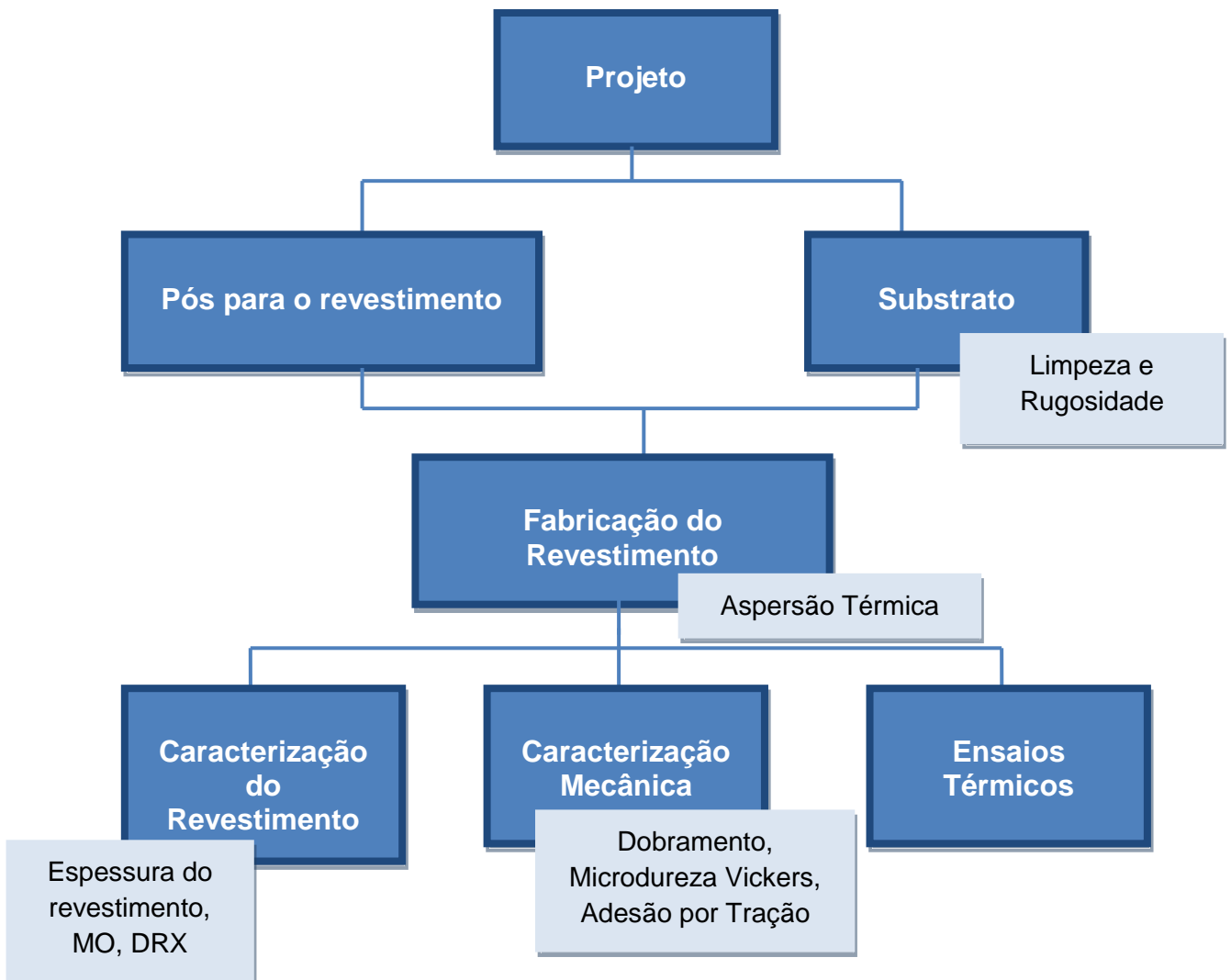
Em relação à estrutura e microestrutura, os resultados obtidos envolveram os ensaios de DRX, DSC, MEV e MET. Assim, Wolf (2015) chegou a conclusão que

tanto os pós moídos como atomizados possuíam pelo menos duas fases, sendo uma delas a matriz, com a fase hexagonal cristalina Al_5Co_2 , mas que também é aproximadamente quasicristalina, e a outra sendo a fase M- $Al_{13}Co_4$ dispersa. Em relação à morfologia, Wolf (2015), através de imagens de MEV, mostrou que o material fabricado por atomização possuía morfologia esférica e uniforme, diferentemente do material moído, com superfície irregular e forte aglomeração de partículas muito finas nas partículas mais grossas.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 9 apresenta o fluxograma dos processos realizados no decorrer deste trabalho.

Figura 9 – Fluxograma dos processos realizados.



Fonte: Autoria própria (2016).

5.1 MATERIAL EM PÓ PARA O REVESTIMENTO

O material em pó utilizado para o revestimento foi obtido da dissertação do Witor Wolf (2015). Dessa forma, segundo Wolf (2015) a liga de composição $Al_{71}Co_{13}Fe_8Cr_8$ foi fabricada pelo método de atomização utilizando-se os elementos

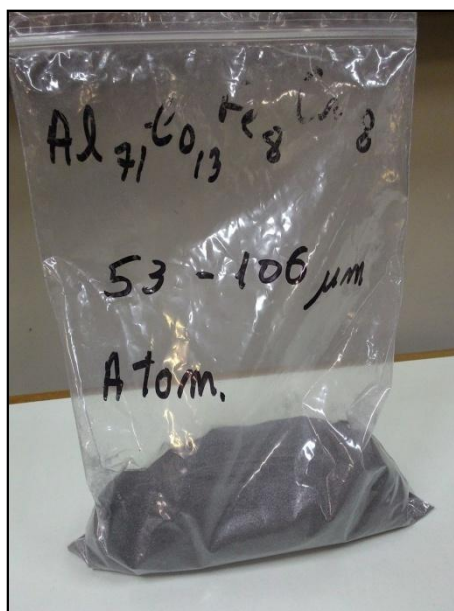
comercialmente puros, sendo esse processo realizado no equipamento de conformação por spray localizado no Laboratório de Fundição do DEMa.

Os parâmetros utilizados por Wolf (2015) foram os seguintes:

- Superaquecimento de 120°C;
- Pressão máxima de 10 bar;
- Nitrogênio foi o gás aplicado;
- Bocais de atomização com 4 mm e 6 mm.

Em conformidade com a literatura, que indica pós na faixa granulométrica entre 5 e 100 μm para aspersão térmica a chama a pó (PAWLOWSKI, 2008), foram utilizados pós na faixa granulométrica de 53 – 106 μm , conforme Figura 10.

Figura 10 - Pós atomizados para o revestimento.



Fonte: Autoria própria (2016).

Além disso, em alguns corpos de prova, antes da aplicação do revestimento, foi feita a aspersão térmica de uma camada de ligação com pó da liga UltraBond 25000, buscando aumentar a aderência do revestimento ao substrato. Esse pó foi fabricado pela empresa Eutectic Castolin e de acordo com a ficha técnica possui composição química a base de níquel (balanço) e pequenas concentrações de alumínio (5,550%), molibdênio (5,130%) e boro (0,040%) (EUTECTIC CASTOLIN, 2016).

5.2 PREPARAÇÃO DO SUBSTRATO

Como substratos foram utilizados corpos de prova de aço 1020, na forma de chapa e cilindro, e da liga de alumínio 4032, na forma de chapa. As chapas de aço 1020 tinham as dimensões de 75 mm x 50 mm x 1 mm (comp. x larg. x alt.) e as chapas da liga de alumínio 4032 tinham as dimensões de 50 mm x 30 mm x 1,25 mm. Já os cilindros de aço 1020 tinham 25 mm de diâmetro x 40 mm de altura.

A liga de alumínio 4032 possui a composição química apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Composição química da liga de alumínio 4032.

Elemento químico	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Ni	Zn	Outros	Al
Mínimo (%)	11,0	-	0,5	0,8	-	0,5	-	-	
Máximo (%)	13,5	1,0	1,3	1,3	0,1	1,3	0,25	0,15	Restante

Fonte: Alcoa (2016).

Como a preparação da superfície a ser aspergida nos corpos de prova é de suma importância, visto que o principal mecanismo de ancoramento das partículas é mecânico, esse assunto será tratado nos tópicos abaixo.

5.2.1 Limpeza do Substrato

A limpeza do substrato é feita de duas formas: química e mecânica. Seu objetivo principal é eliminar quaisquer contaminantes (umidade, ferrugem, crostas de óxido, graxa, óleo e tinta) presentes na superfície, buscando maior aderência do revestimento ao substrato (LIMA; TREVISAN, 2007).

Na limpeza química busca-se remover graxa, óleo, pó, partículas de metal soltas na superfície, impurezas e camadas de óxidos, hidróxidos e sulfetos (LIMA; TREVISAN, 2007). Com esse fim, foi utilizado o reagente ácido fosfórico comercial, com 40% em peso.

A limpeza mecânica, por sua vez, baseia-se no princípio da abrasão, onde se podem remover camadas orgânicas ou inorgânicas da superfície pela ação mecânica de um material de maior dureza. Para isso podem ser usados processos

manuais (escovação, martelamento) ou mecanizados (usinagem, jateamento abrasivo, raspagem, polimento) (LIMA; TREVISAN, 2007). Assim sendo, a limpeza mecânica foi feita através de escovação e esmerilhamento, a qual conferiu a rugosidade média esperada, entre 2,5 e 13 μm (LIMA; TREVISAN, 2007).

5.2.2 Medição da Rugosidade

Os valores de rugosidade média (R_a) superficial do substrato adequados para a maioria dos revestimentos variam entre 2,5 e 13 μm (LIMA; TREVISAN, 2007). Já segundo a norma N-2568 da Petrobras (2011) o valor de rugosidade máxima pico-vale (R_y) deve estar entre 75 e 120 μm .

Para avaliar a rugosidade foi utilizado o medidor de rugosidade de superfície TR220 da marca TIME, disponível no Laboratório de Metrologia (H006a), na UTFPR – Câmpus Pato Branco, conforme Figura 11. Com esse equipamento foram medidos os valores de rugosidade média (R_a) a fim de comparação com os valores adequados esperados. Como parâmetros foi utilizado *cut-off* de 2,5 mm (LIMA; TREVISAN, 2007), com número de *cut-off* igual a 5 e tolerância de $\pm 80 \mu\text{m}$.

Figura 11 - Medidor de rugosidade de superfície TR220.



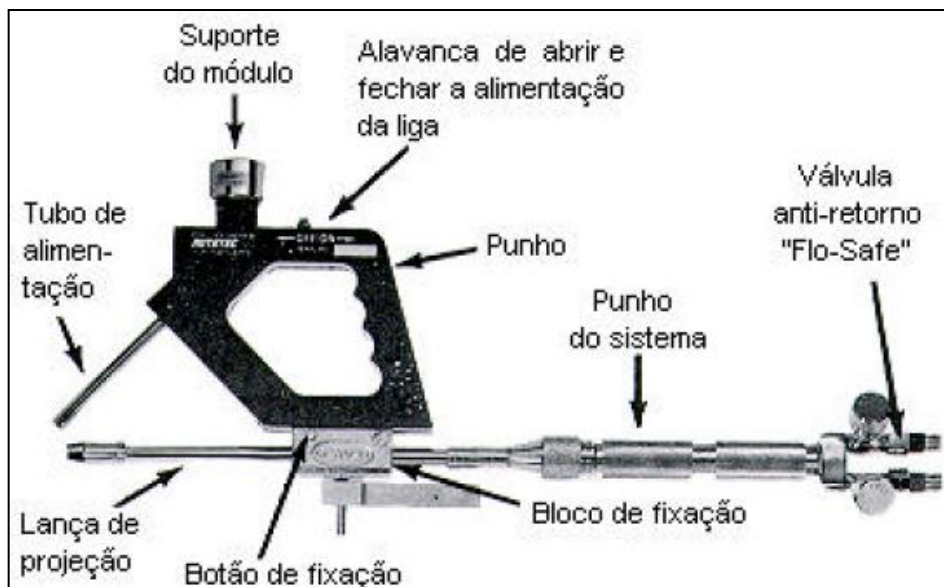
Fonte: Autoria própria (2016).

5.3 DEPOSIÇÃO DO REVESTIMENTO

O método escolhido para deposição do revestimento foi o de aspersão térmica a chama a pó (*Flame Spray – FS*), o qual foi realizado no Laboratório de Soldagem (H007) da UTFPR – Câmpus Pato Branco.

Foi utilizado como equipamento a pistola de aspersão térmica RotoTec 1A, da Eutectic Castolin, a qual está representada na Figura 12 com a indicação das suas partes.

Figura 12 - Pistola de aspersão térmica RotoTec 1A.



Fonte: Eutectic Castolin (19--).

Os gases utilizados nesse processo foram o acetileno e o oxigênio.

Os parâmetros para o processo foram retirados do manual da RotoTec 1A (19--) e da norma N-2568 da Petrobras (2011):

- Distância da tocha ao substrato: 180 mm;
- Pressão do Oxigênio: 1,4 bar (20 psi);
- Pressão do Acetileno: 0,55 bar (8 psi).

O processo de aspersão térmica a chama com a pistola da RotoTec 1A pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Processo de aspersão térmica com a pistola da RotoTec 1A.



Fonte: Eutectic Castolin (19--).

5.4 MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DO REVESTIMENTO

O revestimento foi caracterizado de forma estrutural, mecânica e térmica, conforme será descrito abaixo.

5.4.1 Caracterização do Revestimento

Para medir a espessura do revestimento foi utilizado um micrômetro, com o qual foram realizadas dez medições nos corpos de prova, antes e depois da aspersão térmica, para verificar se ele possuía uma espessura entre 225 e 400 μm , conforme norma N-2568 da Petrobras (2011). Foi utilizado um micrômetro, visto que esse equipamento possui a precisão necessária.

Para caracterização da estrutura foram obtidas imagens das seções transversais das amostras através de microscópio ótico. Para isso, foram retiradas seções transversais das amostras, as quais foram embutidas e depois lixadas (lixas Mesh 320, 400, 600 e 1200), polidas com alumina e limpadas com álcool. Para embutimento foi utilizado o equipamento PRE-30S da Arotec e para a microscopia ótica (MO) foi utilizado o microscópio ótico da marca MEIJI, o qual possuía aumentos

de 50, 100, 200 e 400 vezes. Também foram obtidas imagens do microdurômetro TIME, modelo TH710, com aumento de 400 vezes.

Os difratogramas de raios-X (DRX) foram obtidos no equipamento Rigaku – modelo MiniFlex 600 para identificação das fases dos revestimentos, utilizando faixa de varredura de 20 a 80°, velocidade de varredura de 0,5°/min e passo de 0,02°.

5.4.2 Caracterização Mecânica

Para o ensaio de microdureza Vickers foi utilizado um microdurômetro TIME, modelo TH710, disponível no Laboratório de Ensaios (H005) da UTFPR – Câmpus Pato Branco, o qual pode ser visto na Figura 14. Esse ensaio consistiu na penetração de um indentador piramidal de diamante, com uma carga de 0,245 N (25 gramas), com duração da força de ensaio de 15 segundos e seguiu a norma ABNT NBR NM ISO 6507-1 (2008). O valor médio da microdureza Vickers e o desvio padrão foram obtidos após medição de cinco perfis de microdureza, os quais foram medidos na seção transversal dos corpos de prova.

Figura 14 - Microdurômetro modelo TH710.



Fonte: Autoria própria (2016).

Foram feitos ainda ensaios para avaliar a aderência/coesão, através dos ensaios de tração e de dobramento, visto que segundo Lima e Trevisan (2007) as

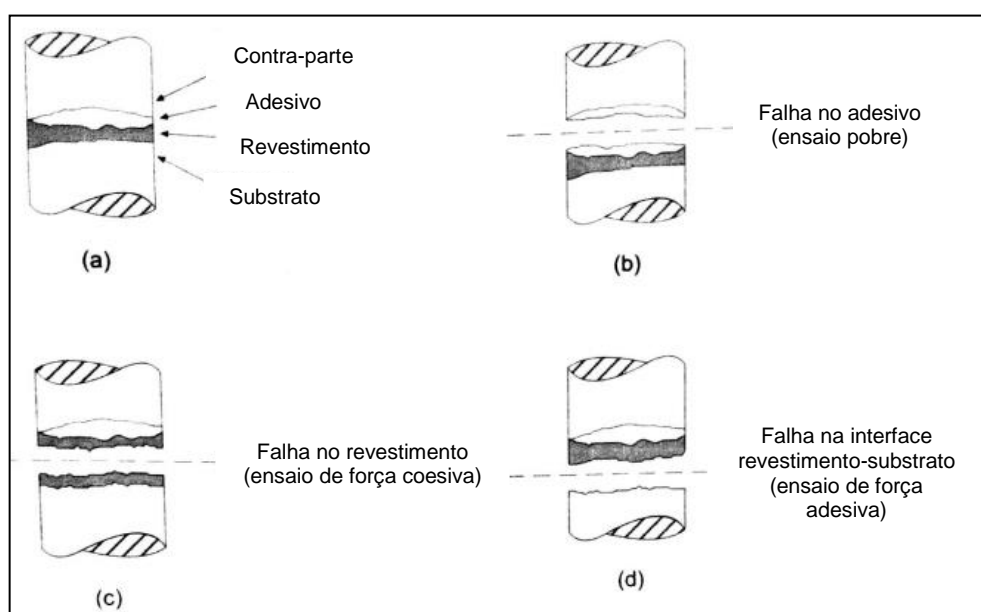
qualidades de aderência e coesão estão entre as mais importantes propriedades de um revestimento, sendo requisitos essenciais para o bom desempenho.

O ensaio de resistência adesiva por tração buscou seguir a norma ASTM-C633-01, com revisão em 2008. Para esse ensaio foram utilizados os corpos de prova cilíndricos de aço 1020 com 25 mm de diâmetro e 40 mm de altura. Foi feita a junção do corpo de prova revestido, com um adesivo à base de epóxi, com uma contraparte de aço 1020, nas mesmas dimensões.

Esse sistema foi tracionado, com uma velocidade de 1 mm/minuto, até a separação, sendo registrada a carga máxima. A resistência adesiva-coesiva do revestimento foi então obtida através da divisão da carga máxima registrada pela área da seção transversal do corpo de prova. Vale a pena ressaltar que a camada a ser ensaiada deveria ter espessura mínima de 380 μm , buscando evitar que o adesivo interferisse de maneira significativa nos resultados (LIMA; TREVISAN, 2007).

Esse ensaio também permitiu uma análise qualitativa da aderência do revestimento, visto que conforme Lima e Trevisan (2007) poderiam ocorrer três tipos de fraturas: adesiva (interface revestimento/substrato), coesiva (interior do revestimento) e no adesivo (interior do adesivo ou nas suas interfaces), conforme Figura 15.

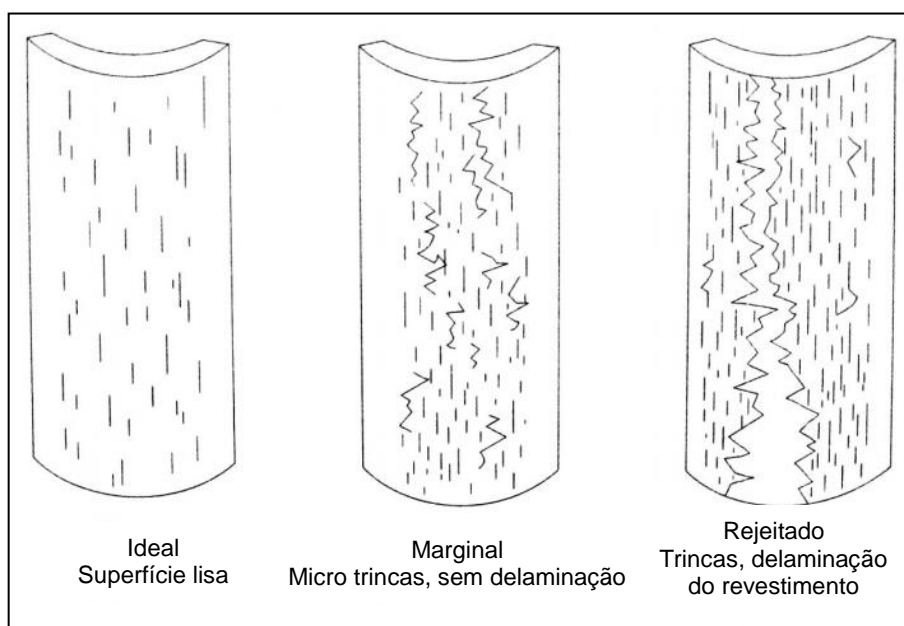
Figura 15 - Tipos de fratura no Ensaio de Adesão por Tração.



Fonte: Lima e Trevisan (2007).

Já o teste de dobramento consistiu no dobramento da amostra, em um dispositivo com mandril de diâmetro de 20 mm, o qual descia a 5 mm/minuto, sendo que a execução consistiu no dobramento do corpo de prova até atingir 180°, ficando a face oposta ao revestimento em contato com o mandril. A avaliação foi feita através da análise do revestimento após o dobramento, conforme Figura 16.

Figura 16 - Avaliação do Ensaio de Dobramento.



Fonte: Lima e Trevisan (2007).

De forma geral, a norma da Petrobras N-2568 (2011) considera reprovada a camada de revestimento que é possível ser retirada com a incisão de uma lâmina de faca ou canivete junto às trincas existentes após o ensaio.

5.4.3 Ensaio Térmicos

Para avaliar as características de isolamento térmico relativas dos revestimentos, os corpos de prova foram preparados de forma diferente, de forma que apenas metade de cada corpo de prova possuiu revestimento. Para se obter esse efeito a parte da superfície na qual não se desejava o revestimento não foi submetida ao esmeril, uma vez que sem essa etapa de preparação a superfície não teria rugosidade suficiente para promover o ancoramento mecânico e assim a sua aderência, fato que se confirmou na prática. Foram realizados dois tipos de ensaios

térmicos; para isso utilizou-se uma placa de aquecimento, onde a superfície de contato era a face sem revestimento dos corpos de provas.

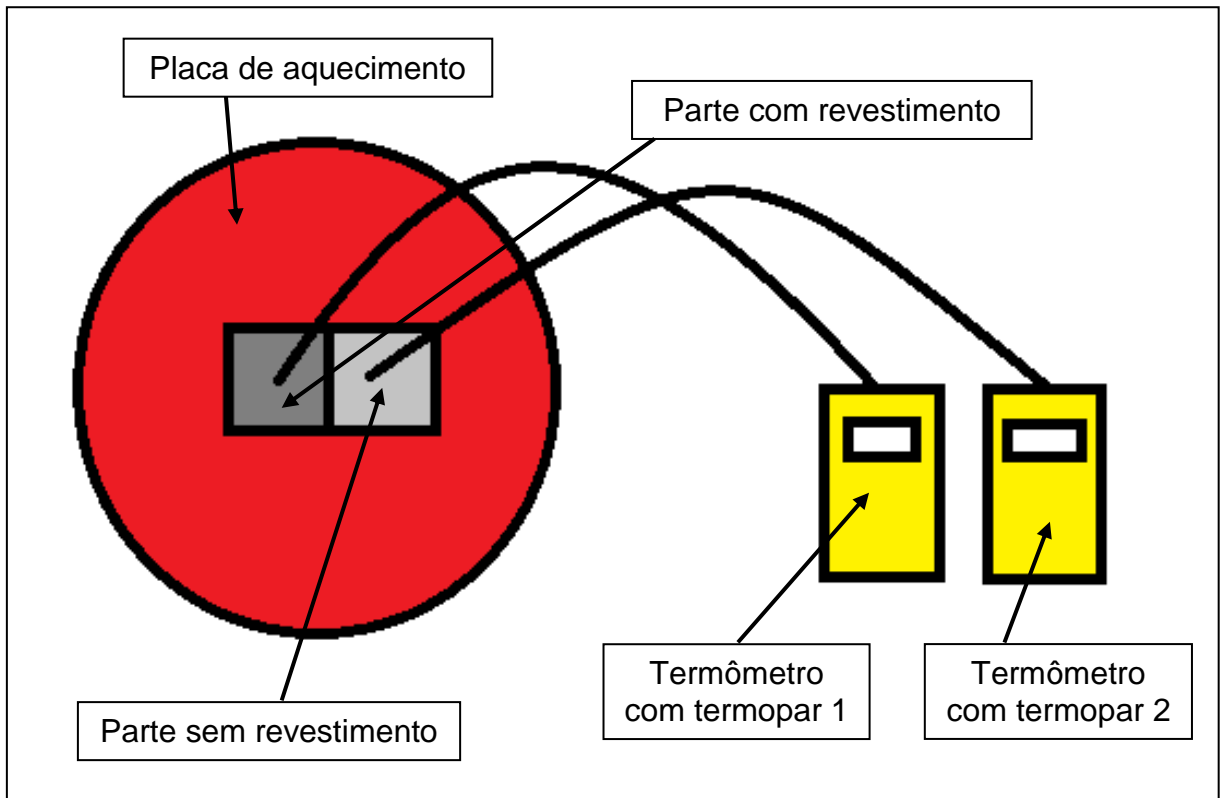
No primeiro ensaio térmico os corpos de prova foram posicionados em contato com a placa de aquecimento plana durante 1 minuto, a qual foi previamente aquecida a 300°C (substrato de aço 1020) e 250°C (substratos de alumínio). Após o primeiro minuto, foi registrada a temperatura do corpo de prova ainda sobre a placa. Na sequência o corpo de prova foi retirado da placa e foi registrada a temperatura 2, 3, 4 e 5 minutos após o ensaio começar para o caso do corpo de prova com substrato de aço 1020 e na sequência 30 segundos (em contato com a placa), 60, 90, 120 e 150 segundos após o início do ensaio para o substrato da liga de alumínio 4032 com e sem camada de ligação da liga UltraBond 25000.

As medidas simultâneas das temperaturas das partes com e sem revestimento foram realizadas com auxílio de dois termopares do tipo K. Procedimento similar foi utilizado na dissertação de Wolf (2015). A diferença nas temperaturas iniciais da placa de aquecimento para os substratos de aço 1020 e da liga de alumínio 4032 se deve ao fato da maior condutividade térmica do alumínio, levando a temperaturas superiores a faixa de temperaturas de medição do termômetro.

Já o segundo ensaio térmico consistiu em registrar quanto tempo levou para que os corpos de prova atingissem a temperatura de 200°C, a fim de se comparar a diferença na capacidade de isolamento térmico entre as chapas com e sem revestimento. Nesse caso, a placa de aquecimento estava previamente aquecida à temperatura de 300°C para ambos os tipos de substrato.

O esquema de ambos os ensaios térmicos está representado na Figura 17.

Figura 17 – Esquema dos ensaios térmicos.



Fonte: Autoria própria (2016).

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 RUGOSIDADE E ESPESSURA DO REVESTIMENTO

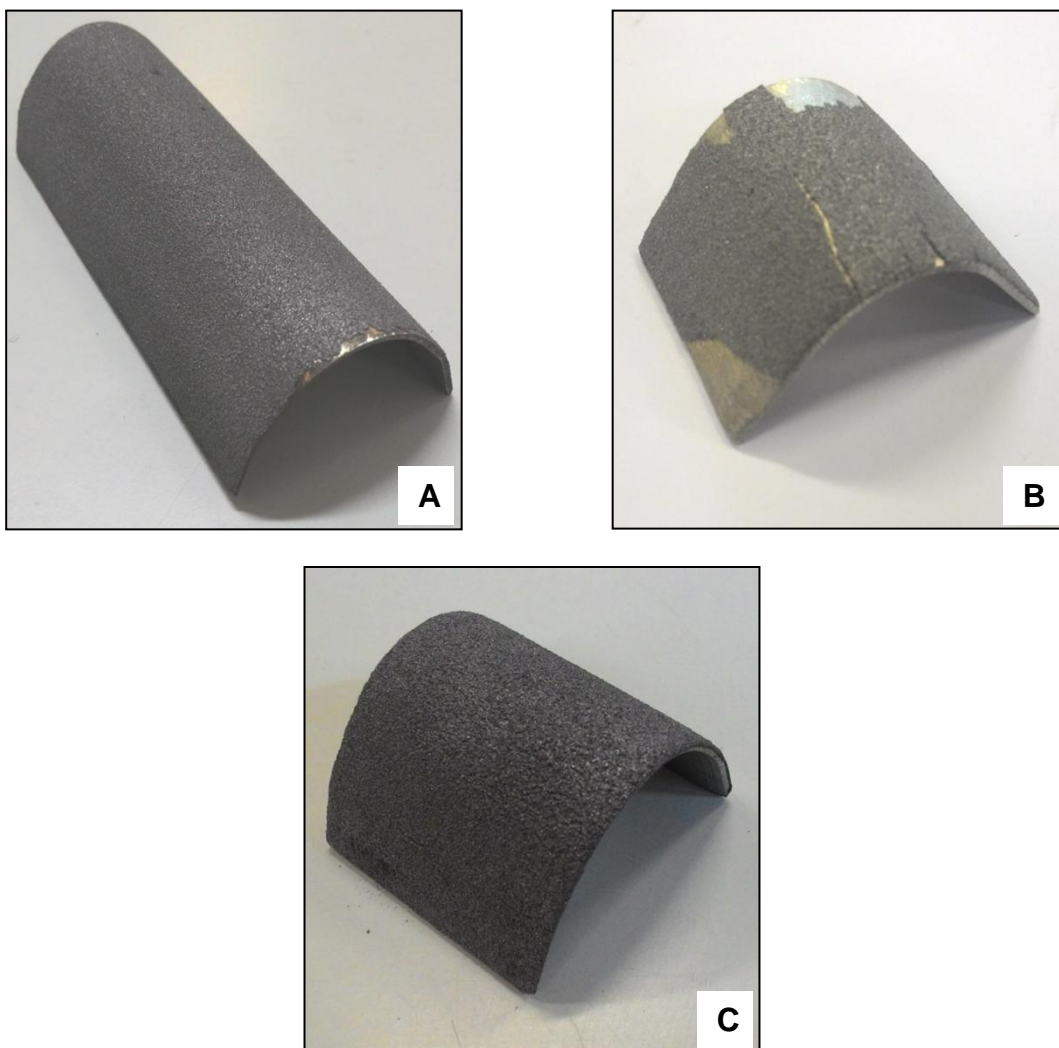
A preparação da superfície do substrato através de esmerilhamento resultou em uma rugosidade adequada para a realização da deposição do revestimento. As rugosidades médias encontradas ficaram na faixa de 5 a 7 μm , em conformidade com a faixa de 2,5 a 13 μm recomendada (LIMA; TREVISAN, 2007) e os valores de rugosidade máxima pico-vale ficaram próximos de 75 μm .

A espessura dos revestimentos obtidos nos corpos de prova no formato de chapa ficou na faixa de 259 – 319 μm , e está em conformidade com a faixa recomendada na norma N-2568 (2011) de 225 - 400 μm . Além disso, a espessura do revestimento nos corpos de prova cilíndricos ficou na faixa de 550 - 650 μm , respeitando o valor mínima de 380 μm (LIMA; TREVISAN, 2007).

6.2 DOBRAMENTO

Os corpos de prova após ensaio de dobramento estão representados na Figura 18.

Figura 18 - Corpos de prova dobrados: a) Substrato de aço 1020, b) Substrato da liga de alumínio 4032, c) Substrato da liga de alumínio 4032 com camada de ligação da liga UltraBond 25000.



Fonte: Autoria própria (2016).

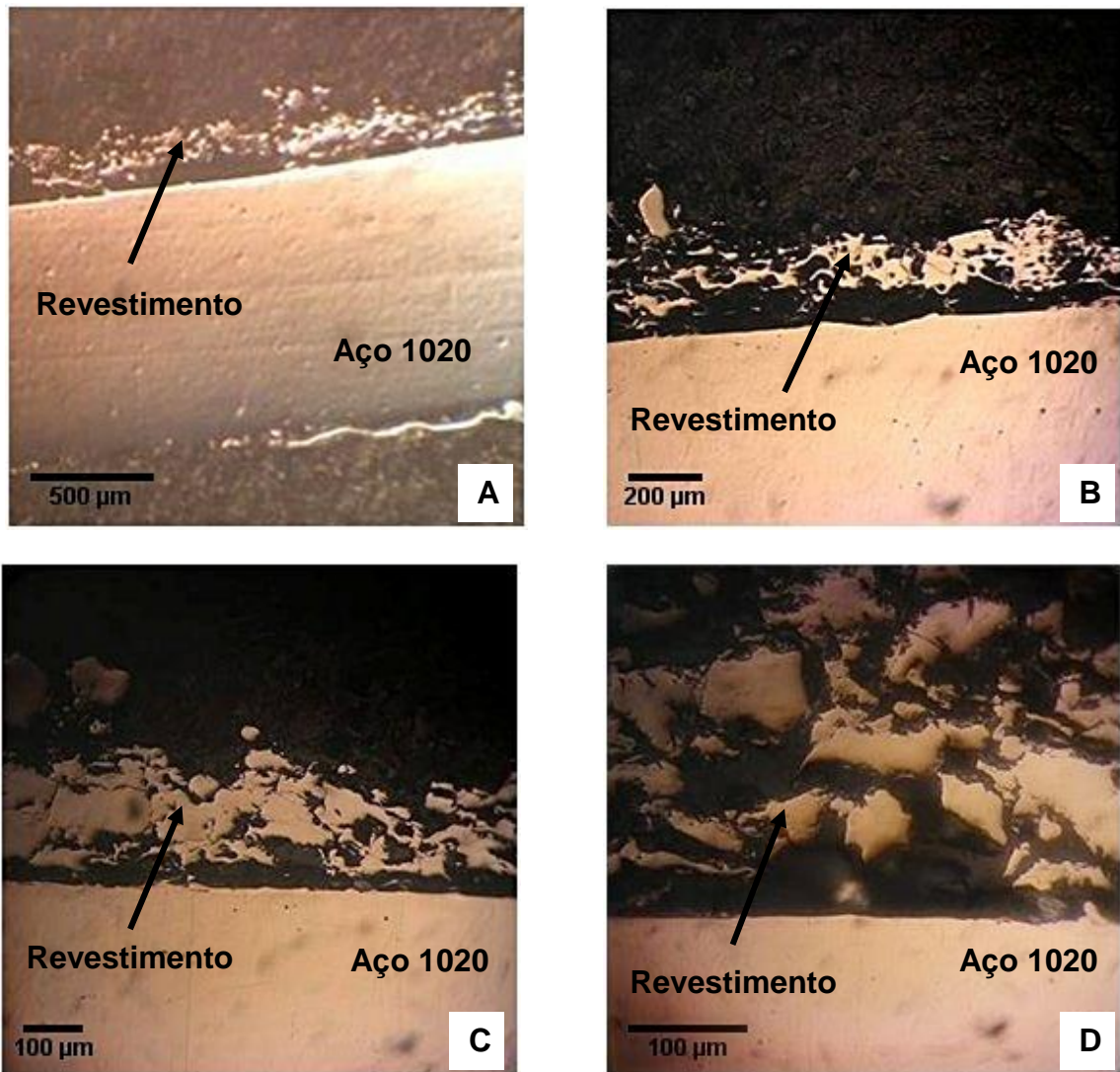
Para análise do revestimento dobrado foi utilizado método comparativo através do quadro de corpos de prova padrões para avaliação das trincas e discontinuidades em revestimentos após dobramento da norma N-2568 da Petrobras (2011). As amostras das Figuras 18-a, que tinha como substrato o aço 1020, e 18-c, que tinha como substrato a liga de alumínio 4032 e teve aplicação da camada de ligação da liga UltraBond 25000 antes da liga de revestimento, não apresentaram trincas e nem microtrincas no revestimento, sendo consideradas ideais para aplicação. Já a amostra da Figura 18-b, que tinha como substrato a liga de alumínio 4032 sem camada da liga UltraBond 25000, apresentou trincas e fendas com desgarramento e deslocamento da camada, sendo rejeitada para aplicação.

Porém, da mesma forma que a amostra da Figura 18-b, que só apresentou as trincas e o deslocamento da camada após ensaio de dobramento, as demais amostras com substrato da liga de alumínio 4032 sem camada da liga UltraBond 25000 estavam intactas, sendo possível sua utilização nos ensaios posteriores, os quais serão discutidos nos tópicos abaixo.

6.3 MICROSCOPIA ÓTICA (MO)

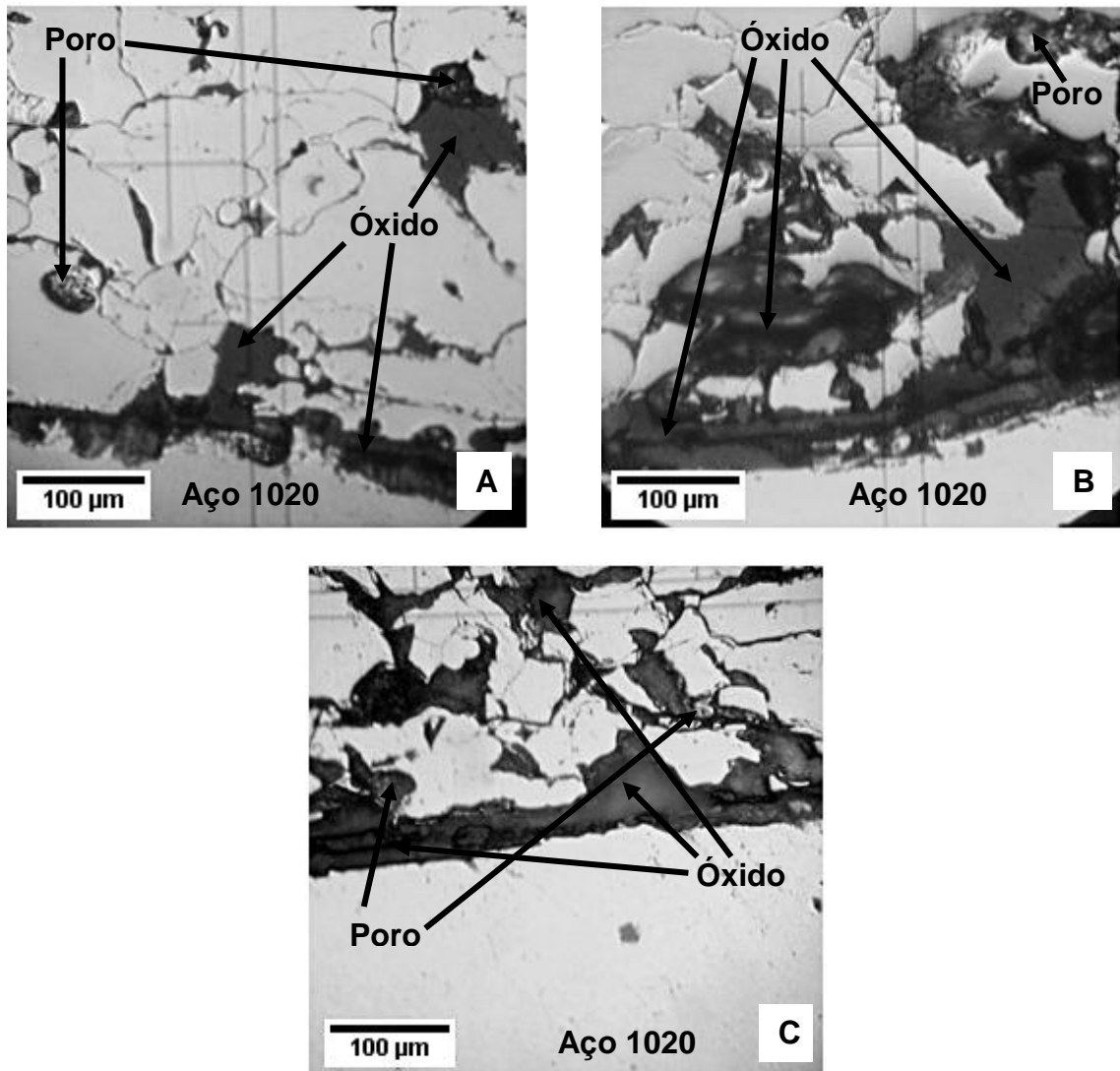
Nas Figuras 19 a 24 é possível observar as micrografias das seções transversais da interface revestimento/substrato em diferentes escalas e nos diferentes substratos. As Figuras 19 e 20 possuem como substrato o aço 1020, as Figuras 21 e 22 possuem como substrato a liga de alumínio 4032 sem camada da liga UltraBond 25000 e as Figuras 23 e 24 possuem como substrato a liga de alumínio 4032 com camada de ligação da liga UltraBond 25000. Além disso, as Figuras 19, 21 e 23 são referentes ao microscópio ótico da marca MEIJI e as Figuras 20, 22 e 24 foram tiradas a partir da lente do microdurômetro modelo TH710.

Figura 19 - Microscopia Ótica no revestimento aplicado ao substrato de aço 1020 no microscópio ótico: a) Aumento de 50 vezes, b) Aumento de 100 vezes, c) Aumento de 200 vezes, d) Aumento de 400 vezes.



Fonte: Autoria própria (2016).

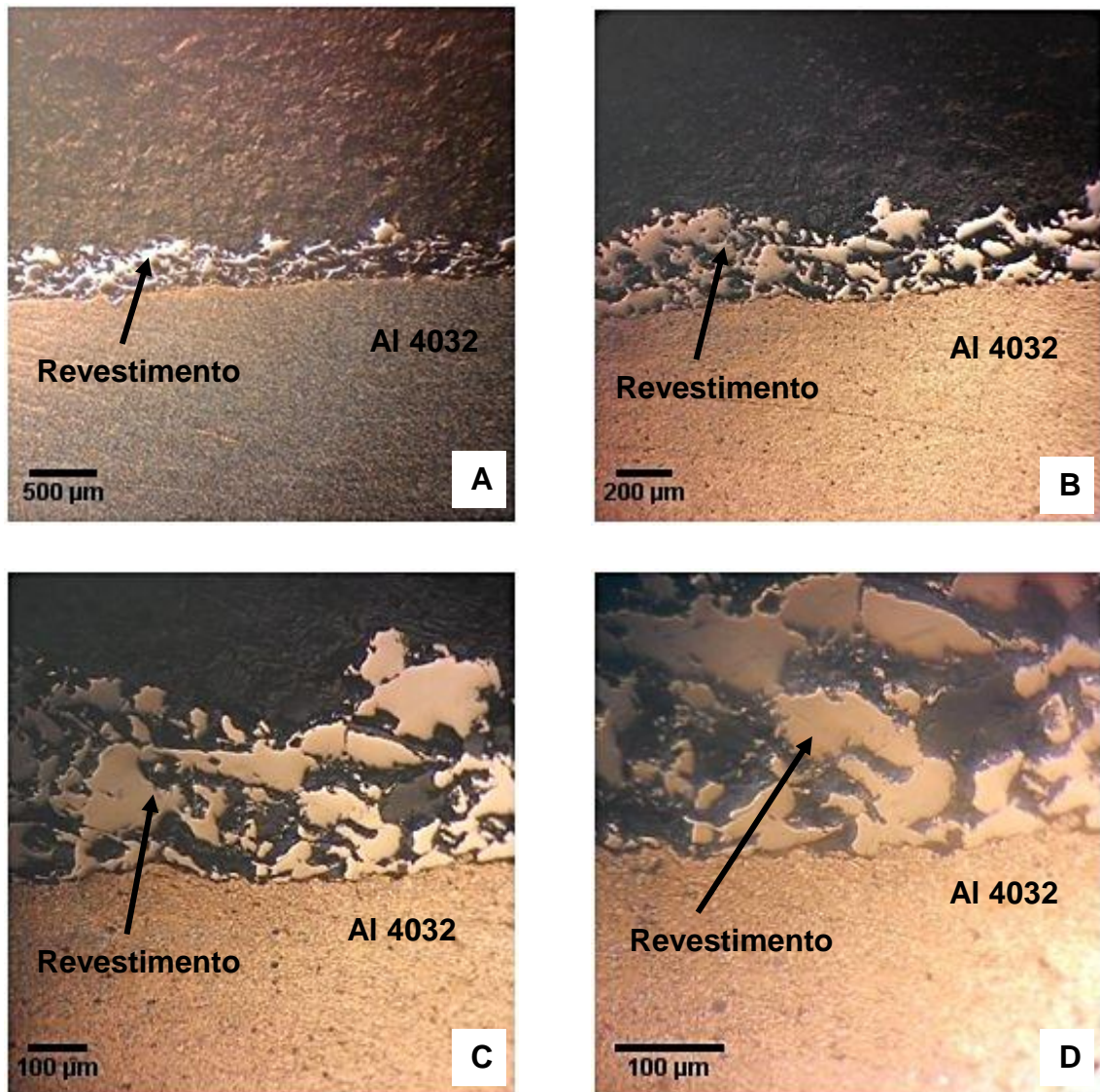
Figura 20 - Microscopia Ótica no revestimento aplicado ao substrato de aço 1020 no microdurômetro TH710: aumento de 400 vezes.



Fonte: Autoria própria (2016).

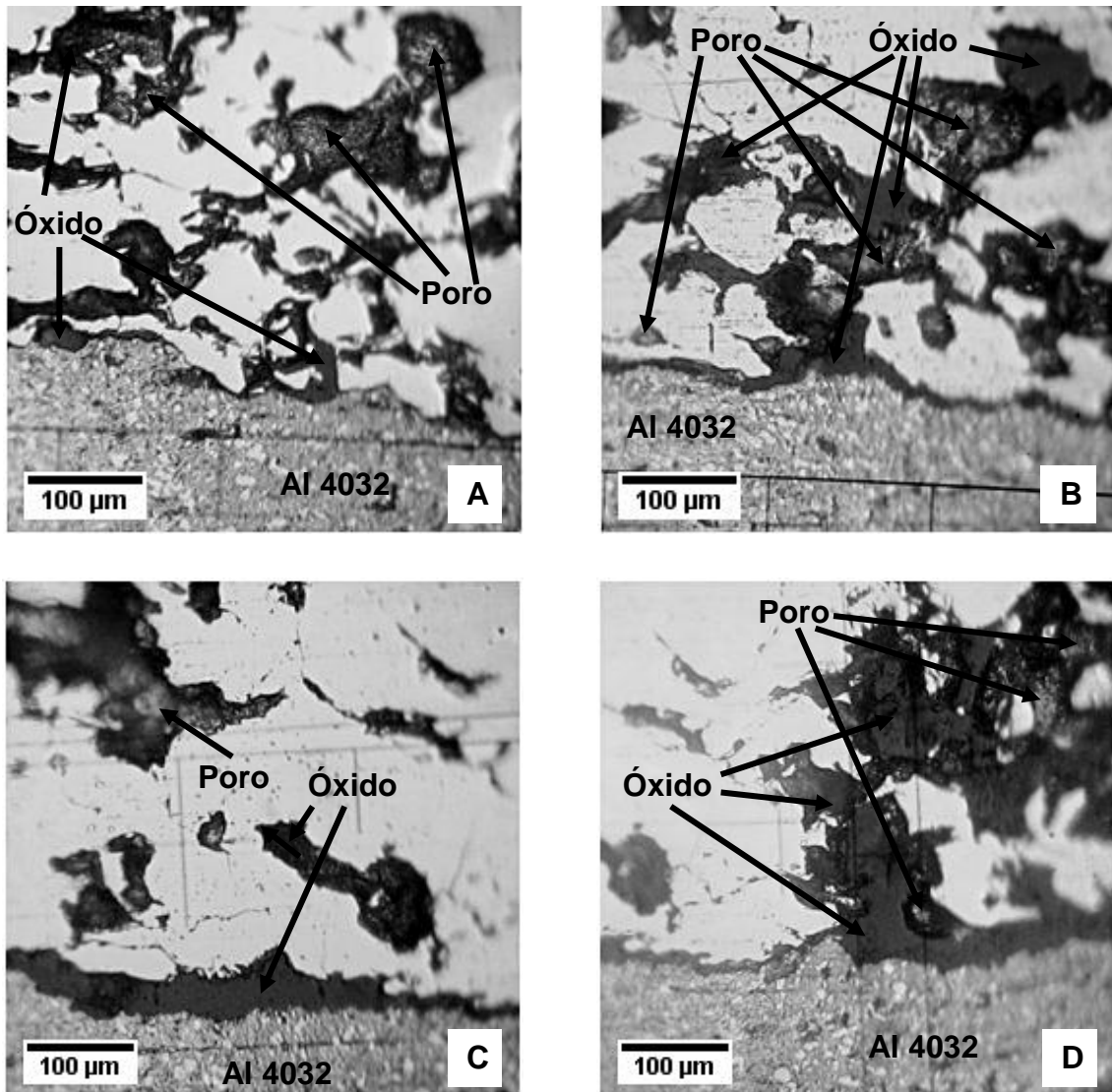
Na Figura 19 é possível observar que entre o substrato de aço 1020 e o revestimento aplicado por aspersione térmica está presente uma camada escura; a hipótese mais provável é a de uma camada de óxido que cresceu durante a aplicação do revestimento. Além disso, existe uma grande presença de poros e óxidos, tanto intralamelares como interlamelares, no interior do revestimento, sendo possível a identificação na Figura 20, onde os óxidos possuem coloração cinza claro e os poros possuem coloração cinza escuro.

Figura 21 - Microscopia Ótica no revestimento aplicado ao substrato da liga de alumínio 4032 no microscópio ótico: a) Aumento de 50 vezes, b) Aumento de 100 vezes, c) Aumento de 200 vezes, d) Aumento de 400 vezes.



Fonte: Autoria própria (2016).

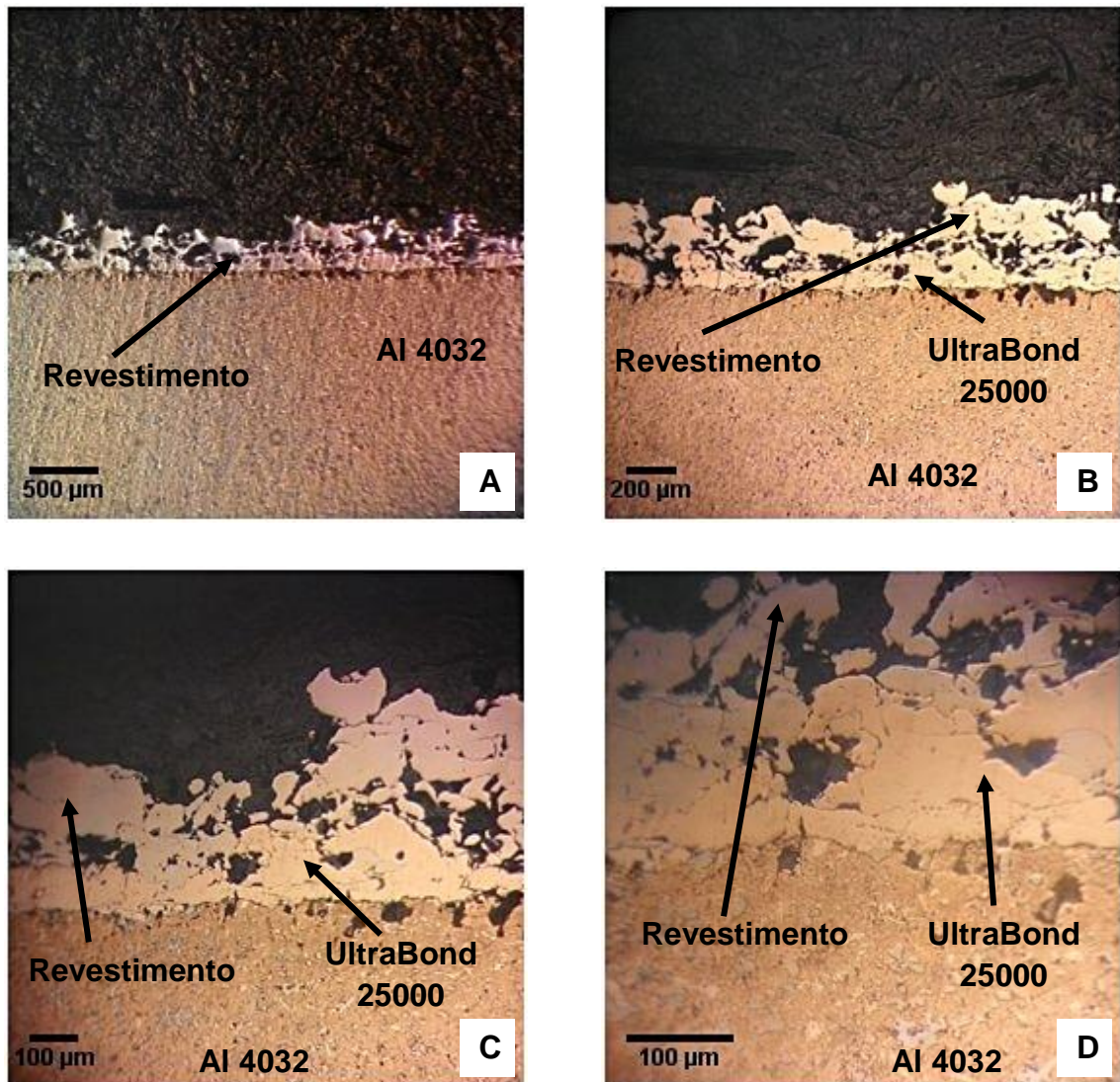
Figura 22 - Microscopia Ótica no revestimento aplicado ao substrato da liga de alumínio 4032 no microdurômetro TH710: aumento de 400 vezes.



Fonte: Autoria própria (2016).

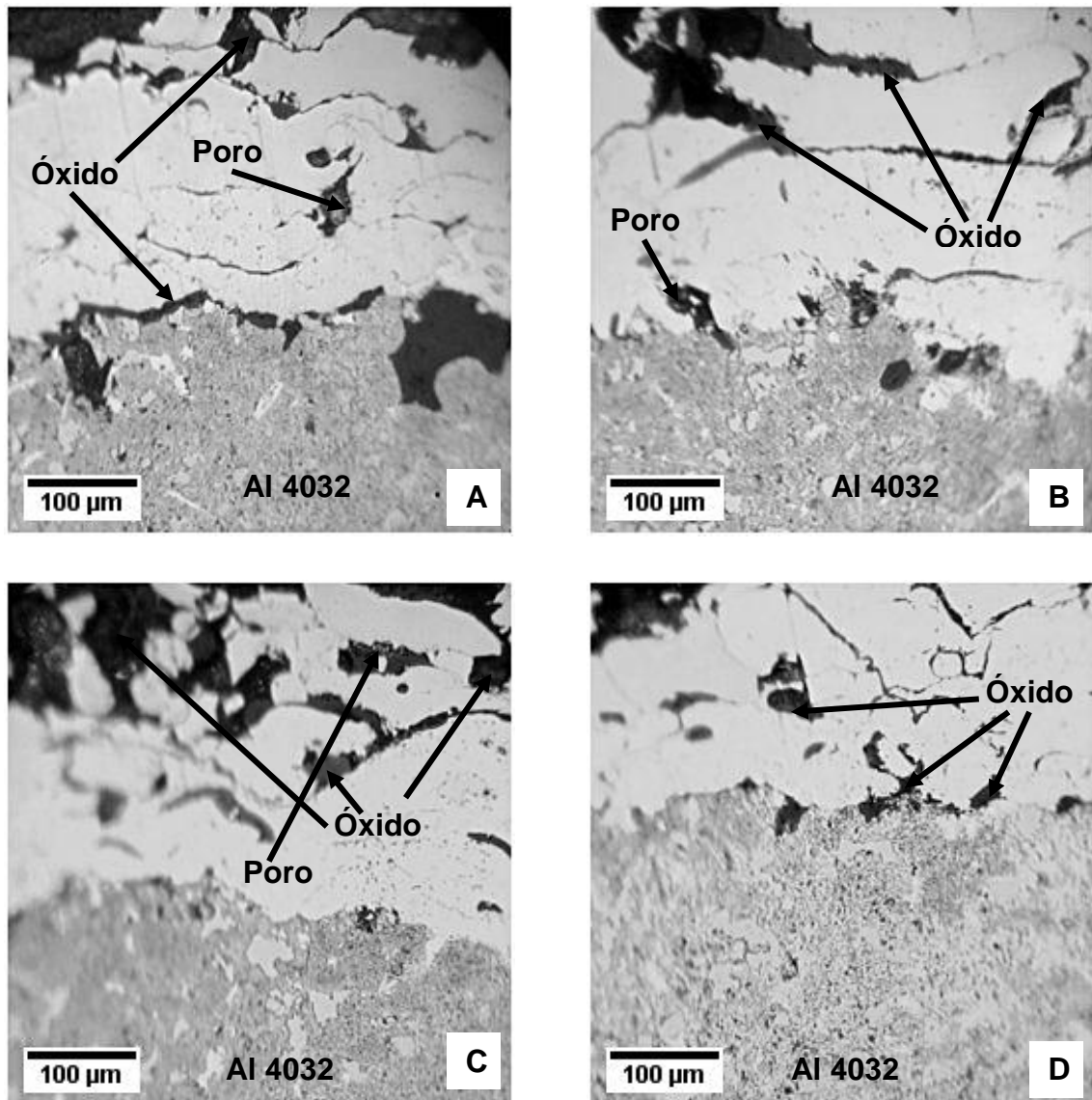
Na Figura 21 é possível observar que em algumas regiões entre o substrato da liga de alumínio 4032 e a camada de revestimento está presente uma pequena camada escura; novamente a hipótese é que seja uma camada de óxido crescida durante a deposição do revestimento. Além disso, no interior do revestimento existem poros e óxidos, intra e interlamelares, os quais estão apontados na Figura 22 em diferentes partes do revestimento.

Figura 23 - Microscopia Ótica no revestimento aplicado após camada de ligação da liga UltraBond 25000 ao substrato da liga de alumínio 4032 no microscópio ótico: a) Aumento de 50 vezes, b) Aumento de 100 vezes, c) Aumento de 200 vezes, d) Aumento de 400 vezes.



Fonte: Autoria própria (2016).

Figura 24 - Microscopia Ótica no revestimento aplicado após camada de ligação da liga UltraBond 25000 ao substrato da liga de alumínio 4032 no microdurômetro TH710: aumento de 400 vezes.



Fonte: Autoria própria (2016).

A amostra das Figuras 23 e 24 possui uma camada de ligação da liga UltraBond 25000, que está logo acima do substrato, apresentando apenas alguns óxidos entre o substrato e a camada de ligação, diferentemente das amostras anteriores, as quais possuem uma camada de óxido logo acima do substrato. Porém, essa camada de óxido foi criada entre a camada de ligação e o revestimento, sendo possível diferenciá-las exatamente por esse motivo, visto que ambas possuem a mesma coloração. Além disso, é possível observar a presença de poros e óxidos, intra e interlamelares, no interior do revestimento e no interior da

camada de ligação da liga UltraBond 25000, mas em quantidades bem inferiores as amostras anteriores.

De forma geral, as amostras sem camada de ligação da liga UltraBond 25000 apresentaram uma camada de óxido entre o revestimento e o substrato, sendo essa camada maior na amostra que tinha como substrato o aço 1020. Já a amostra com camada da liga UltraBond 25000 apresentou uma camada de óxido entre o revestimento e a camada de ligação. Em relação ao revestimento, nos três casos foram observados poros e óxidos no seu interior, porém na amostra com substrato da liga de alumínio 4032 com uso da camada da liga UltraBond 25000 o número de poros e óxidos foi bem inferior ao apresentado pelas demais amostras, apresentando assim um revestimento de maior densidade e melhor qualidade.

O aparecimento de poros já era esperado devido principalmente à baixa velocidade atingida pelas partículas no método de aspersão térmica a chama a pó (PAWLOWSKI, 2008).

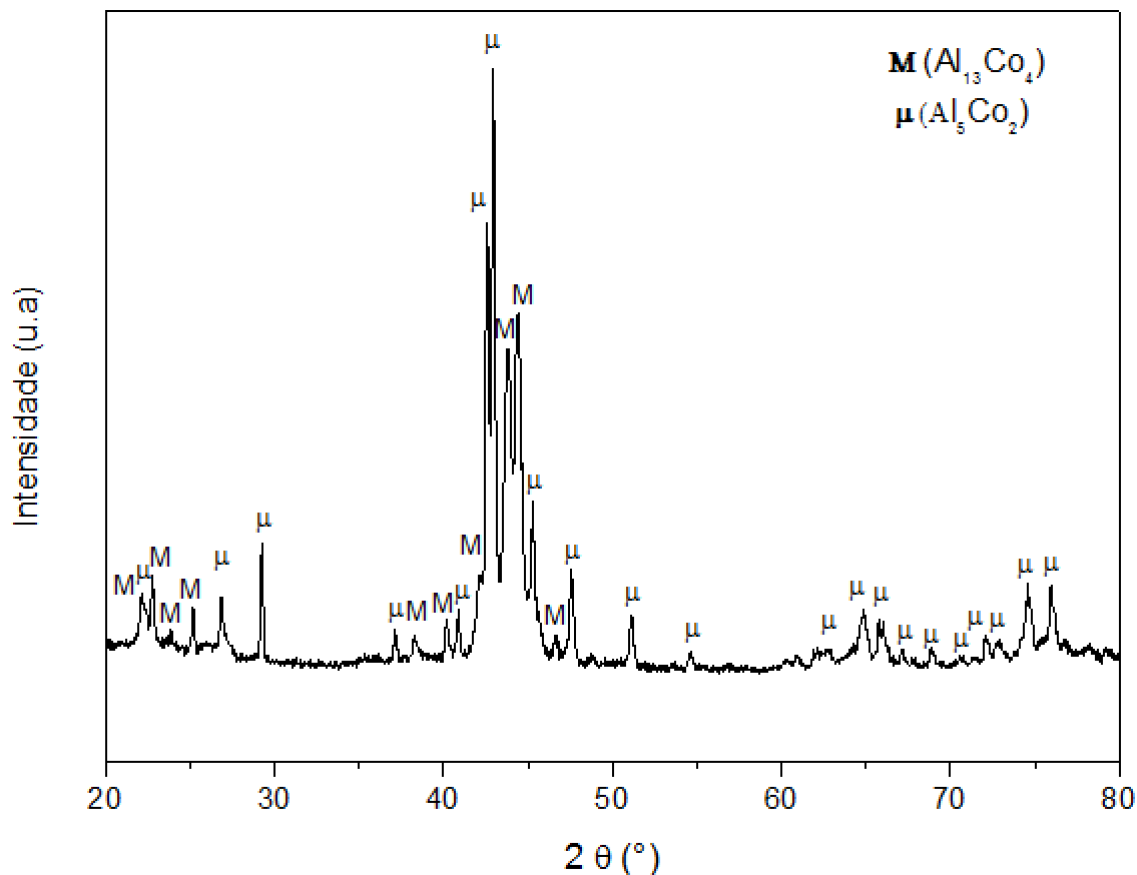
Em relação ao crescimento de óxidos, um das hipóteses é devido ao oxigênio presente na atmosfera que reage com o revestimento de alumínio (RODRIGUEZ, 2003). Além disso, essa formação de óxidos também é favorecida pelas variações de temperatura que ocorrem durante o pré-aquecimento (LIMA; TREVISAN, 2007) e durante a deposição do revestimento e pelo contato entre as camadas já ancoradas que ficam expostas ao meio ambiente (PADILHA, 2011).

6.4 DIFRATOMETRIA DE RAIOS-X (DRX)

Nas Figuras 25, 26 e 27 é possível observar os difratogramas de raios-X para as amostras com substrato de aço 1020, da liga de alumínio 4032 e da liga de alumínio 4032 com camada de ligação da liga UltraBond 25000, respectivamente.

Na Figura 25 foram identificadas duas fases no revestimento: a fase de equilíbrio hexagonal cristalina Al_5Co_2 (μ) e a fase monoclínica $Al_{13}Co_4$ (M), as quais eram esperadas. Observar-se ainda a predominância da fase Al_5Co_2 (μ), que possui os picos cristalinos de maior intensidade. O difratograma é similar ao encontrado no trabalho de Wolf (2015), que utilizou o mesmo substrato que nesse caso (Aço 1020), embora o revestimento tenha sido obtido pela técnica de HVOF.

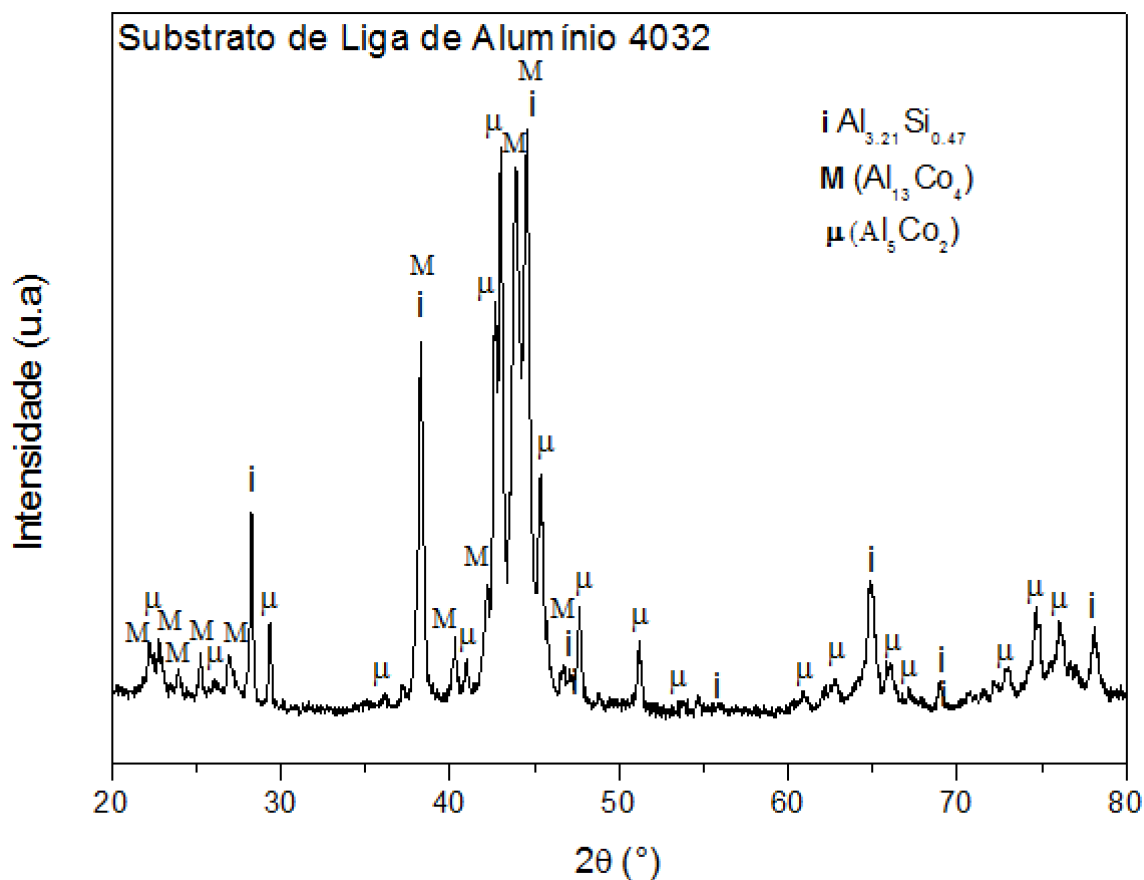
Figura 25 – Difratoograma de raios-X do revestimento da liga $\text{Al}_{71}\text{Co}_{13}\text{Fe}_8\text{Cr}_8$ em substrato de aço 1020.



Fonte: Autoria própria (2016).

As fases cristalinas presentes no revestimento da liga $\text{Al}_{71}\text{Co}_{13}\text{Fe}_8\text{Cr}_8$ em substrato de liga de alumínio 4032 são mostradas no difratograma da Figura 26, onde se observa a presença das fases Al_5Co_2 (μ), da fase monoclinica $\text{Al}_{13}\text{Co}_4$ (M) e da fase intermetálica $\text{Al}_{3,21}\text{Si}_{0,47}$ (i). A maior intensidade dos picos da fase $\text{Al}_{13}\text{Co}_4$ e consequentemente sua predominância podem estar associadas a maior quantidade de alumínio fornecida pelo substrato, pois de acordo com Wolf (2015) a fase Al_5Co_2 possui uma concentração de alumínio de 71,4% (%at.), enquanto a fase M- $\text{Al}_{13}\text{Co}_4$ possui uma concentração de alumínio de 76,5%. A presença da fase intermetálica $\text{Al}_{3,21}\text{Si}_{0,47}$ está associada ao alumínio e silício do substrato.

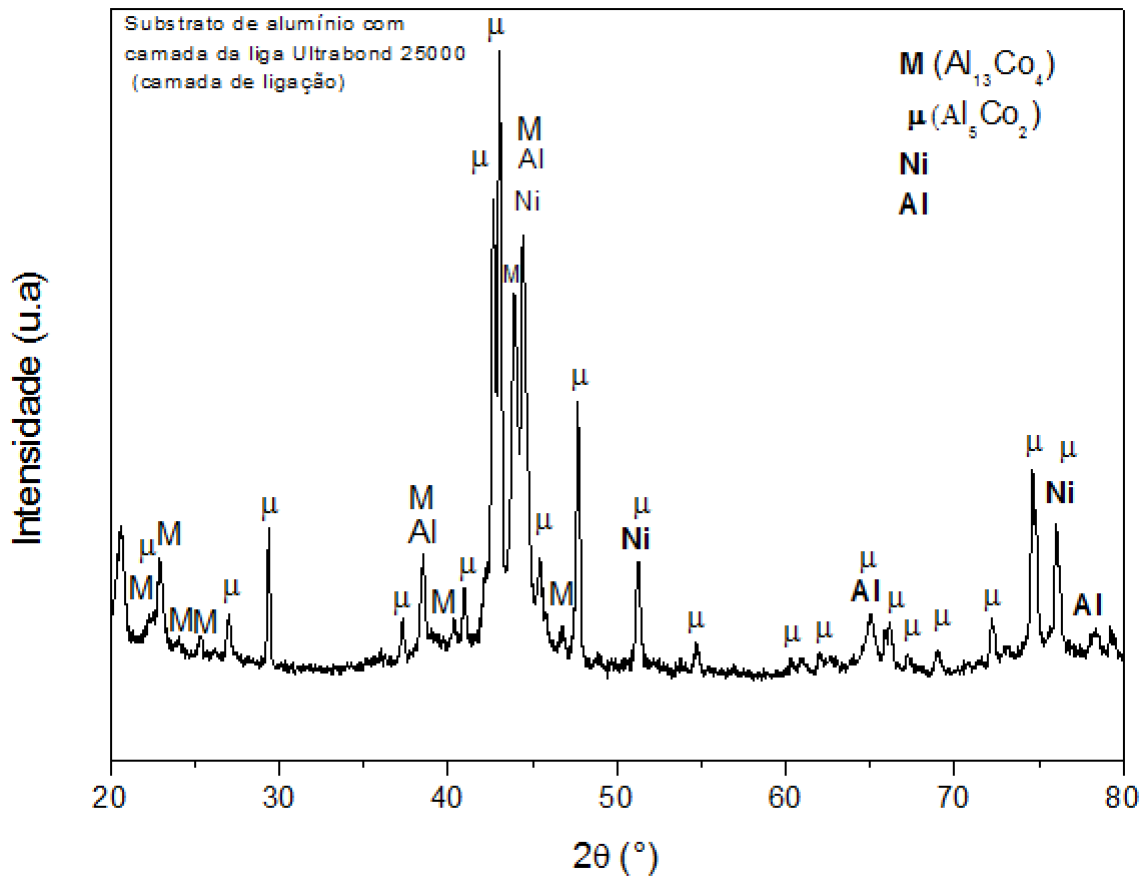
Figura 26 – Difratograma de raios-X do revestimento da liga $\text{Al}_{71}\text{Co}_{13}\text{Fe}_8\text{Cr}_8$ em substrato da liga de alumínio 4032.



Fonte: Autoria própria (2016).

No difratograma de raios-X da Figura 27, obtido a partir do revestimento da liga $\text{Al}_{71}\text{Co}_{13}\text{Fe}_8\text{Cr}_8$ em um substrato de alumínio que foi previamente recoberto com uma camada de ligação da liga comercial UltraBond 25000 a base de níquel, identifica-se as fases cristalinas Al_5Co_2 (μ), $\text{Al}_{13}\text{Co}_4$ monoclinica (M), níquel-cfc (Ni) e alumínio-cfc (Al). Nesse difratograma a fase de equilíbrio Al_5Co_2 (μ) é predominante, apesar das maiores quantidades de alumínio, o que pode ser explicado pela formação de alumínio-cfc. A presença de níquel é originada a partir da liga da camada de ligação a base de níquel.

Figura 27 - Difratoograma de raios-X do revestimento da liga $\text{Al}_{71}\text{Co}_{13}\text{Fe}_8\text{Cr}_8$ em substrato da liga de alumínio 4032 com camada de ligação.



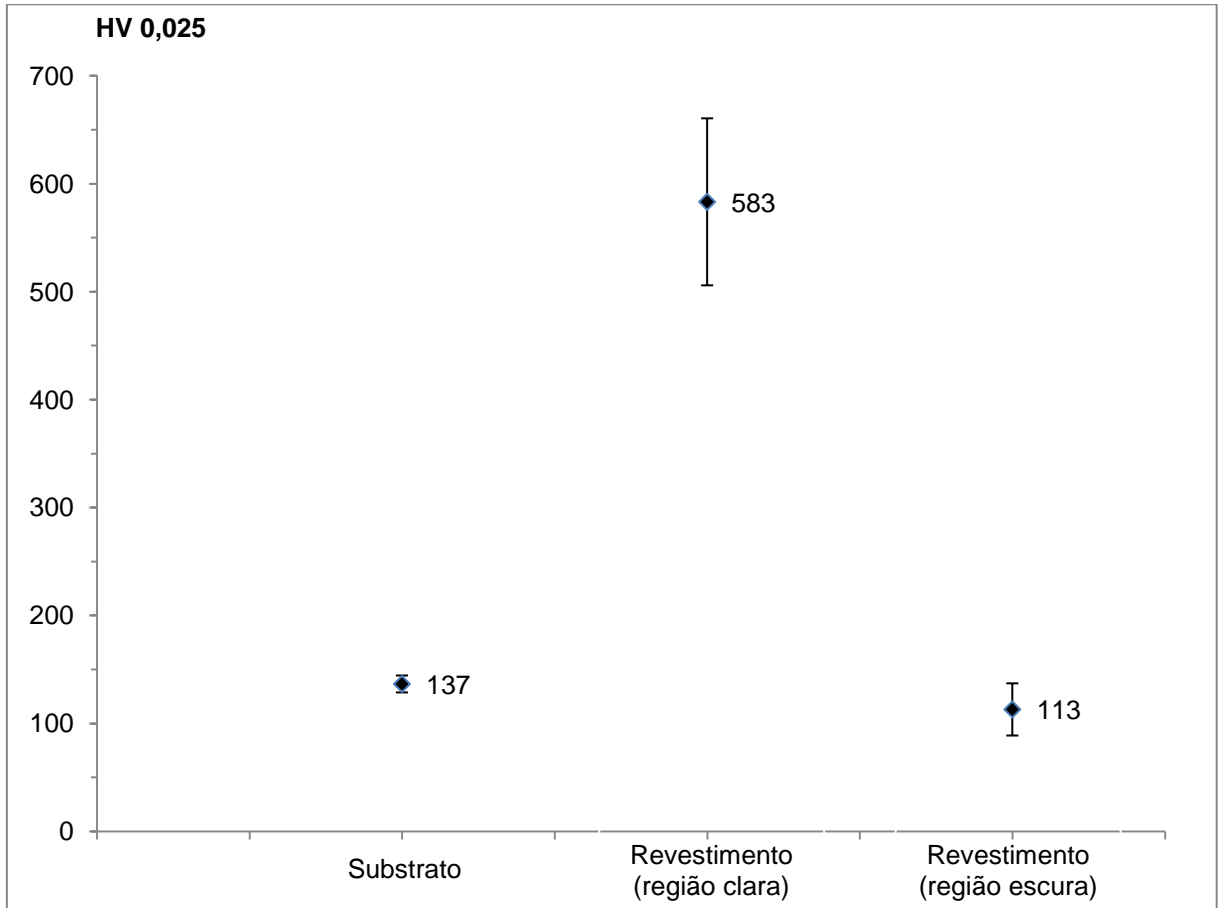
Fonte: Autoria própria (2016).

6.5 MICRODUREZA VICKERS

As Figuras 28, 29 e 30 apresentam os valores médios e os desvios padrões obtidos para as microdurezas Vickers nas amostras embutidas dos corpos de prova com substrato de aço 1020, da liga de alumínio 4032 e da liga de alumínio 4032 com camada de ligação da liga UltraBond 25000, respectivamente.

Como é possível observar nas Figuras 19 a 24, o revestimento possui partes claras e partes escuras, sendo que as partes escuras possivelmente são óxidos e poros, conforme indicações nas Figuras 20, 22 e 24. Dessa forma, a microdureza Vickers foi realizada na parte clara do revestimento e na parte escura. Além disso, também foi medida a microdureza do substrato.

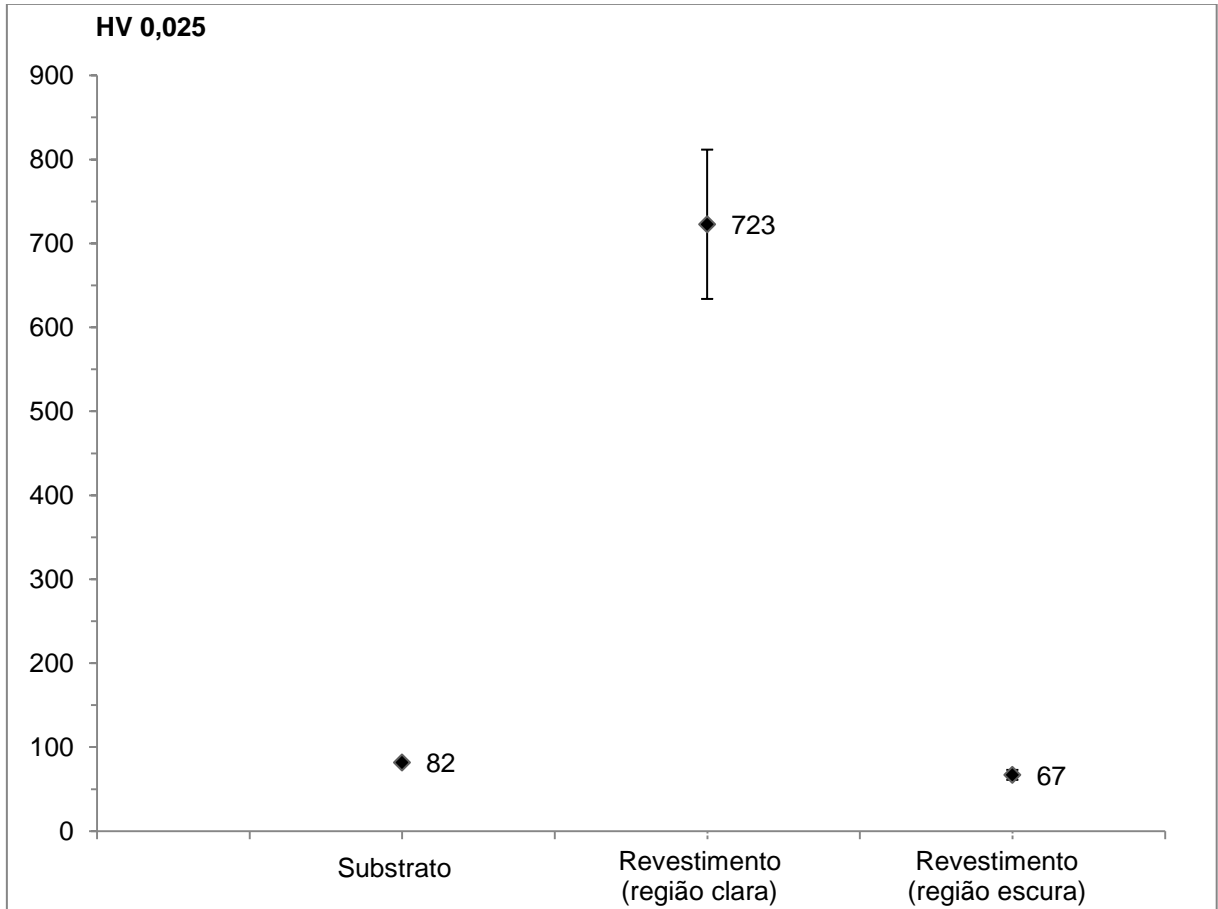
Figura 28 - Resultados da microdureza Vickers para a amostra com substrato de aço 1020.



Fonte: Autoria própria (2016).

Conforme Figura 28 o substrato de Aço 1020 apresentou microdureza média de 137 HV. Já o revestimento apresentou microdureza média de 583 HV na região clara e de 113 HV na região escura. O valor médio da microdureza para a região clara é muito maior que o da região escura, devido à alta porosidade encontrada na região escura.

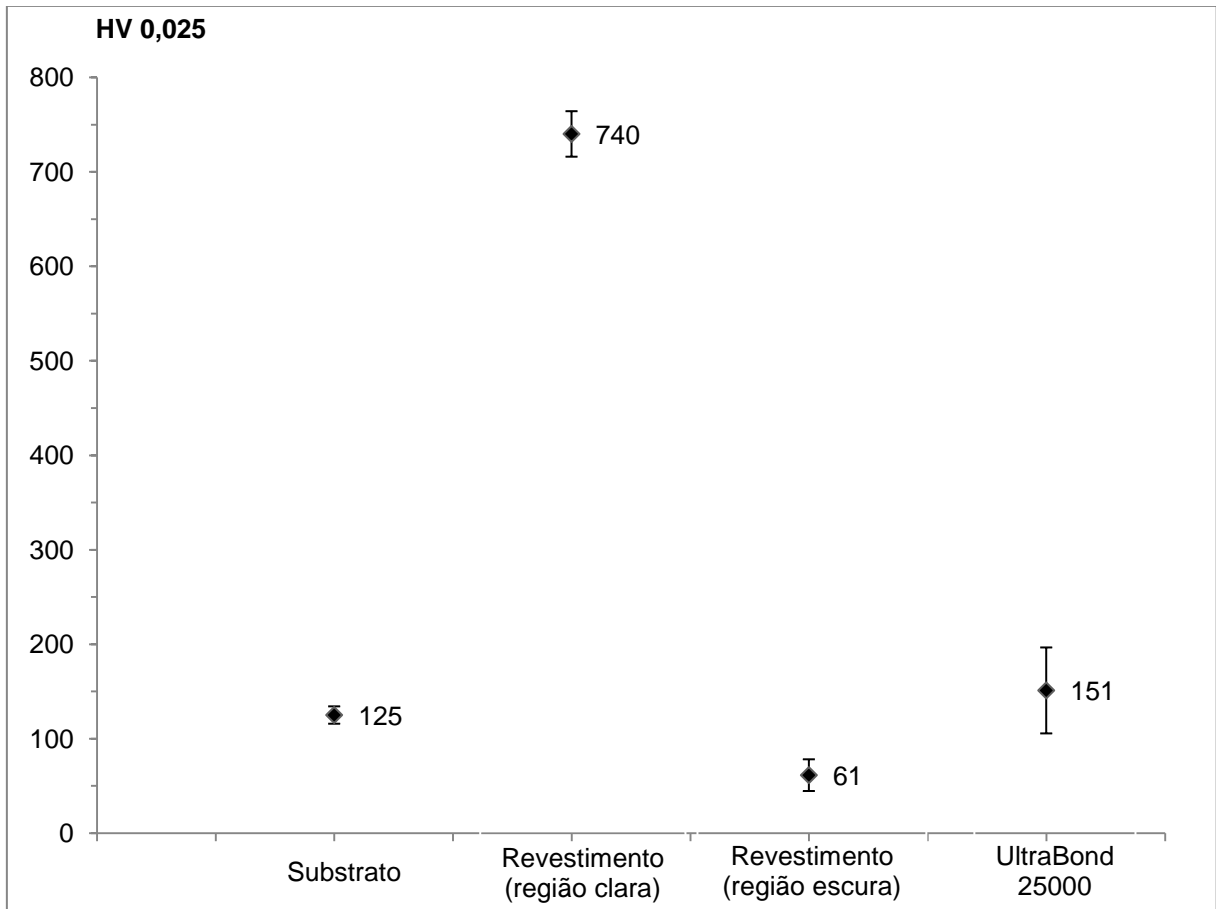
Figura 29 - Resultados da microdureza Vickers para a amostra com substrato da liga de alumínio 4032.



Fonte: Autoria própria (2016).

Conforme Figura 29 o substrato da liga de alumínio 4032 apresentou microdureza média de 82 HV. Já o revestimento apresentou microdureza média de 723 na região clara e de 67 HV na região escura. Nesse caso o valor médio da microdureza para a região clara também foi muito maior que o da região escura, devido novamente à alta porosidade dos pontos medidos na região escura.

Figura 30 - Resultados da microdureza Vickers para a amostra com substrato da liga de alumínio 4032 com camada de ligação da liga UltraBond 25000.



Fonte: Autoria própria (2016).

Na Figura 30, onde foi utilizada a camada de ligação da liga UltraBond 25000 sobre o substrato da liga de alumínio 4032, o substrato da liga de alumínio 4032 apresentou microdureza média de 125 HV. O revestimento apresentou microdureza média de 740 HV na região clara e de 61 HV na região escura. Já a camada da liga UltraBond 2500 apresentou microdureza média de 151 HV.

A Tabela 6 apresenta um resumo com o valor médio da microdureza Vickers e o desvio padrão para todas as situações apresentadas nas Figuras 28, 29 e 30.

Tabela 6 – Média e desvio padrão do ensaio de microdureza Vickers.

		Média (HV)	Desvio padrão
Substrato de aço 1020	Substrato	137	$\pm 7,85$
	Região clara	583	$\pm 77,35$
	Região escura	113	$\pm 24,16$
Substrato da liga de alumínio 4032	Substrato	82	$\pm 2,78$
	Região clara	723	$\pm 88,92$
	Região escura	67	$\pm 5,93$
Substrato da liga de alumínio 4032 com camada da liga UltraBond 25000	Substrato	125	$\pm 9,18$
	Região clara	740	$\pm 24,08$
	Região escura	61	$\pm 16,78$
	UltraBond 25000	151	$\pm 45,50$

Fonte: Autoria própria (2016).

De forma geral, os valores de microdureza apresentados pelos substratos estão próximos dos valores encontrados na literatura, a qual apresenta a microdureza do aço 1020 com valor de 115 HV (NORTON, 2013) e a microdureza da liga de alumínio 4032 com valor de 125 HV (ASM HANDBOOK, 1992). A microdureza média da camada de ligação da liga UltraBond 25000 também se encontra próxima ao valor fornecido pelo fabricante, compreendida no intervalo de 130 a 170 HV (EUTECTIC CASTOLIN, 2016).

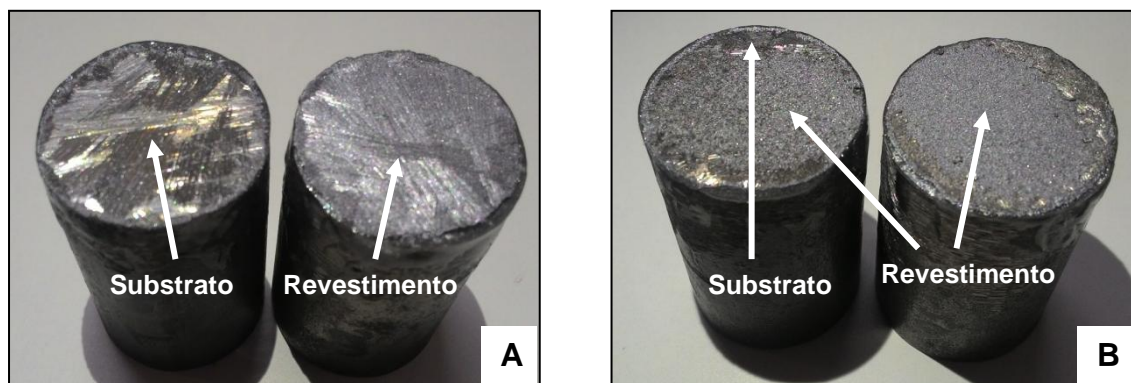
Em relação ao revestimento, na região mais clara foram encontrados valores esperados com microdureza elevada, com valores maiores que os apresentados no trabalho desenvolvido por Wolf (2015), o qual apresentou um intervalo entre 450 e 550 HV. É possível notar também que os valores apresentados nas amostras com substrato da liga de alumínio 4032 são maiores; as possíveis causas são uma maior densidade do revestimento ou ainda a presença de fases intermetálicas de alta dureza.

Já a região escura do revestimento apresentou valores baixos de microdureza, devido principalmente à alta concentração de poros.

6.6 ENSAIO DE ADESÃO POR TRAÇÃO

A Figura 31 mostra as amostras dos corpos de prova cilíndricos após o ensaio de adesão por tração.

Figura 31 - Superfícies dos corpos de prova cilíndricos após ensaio de adesão por tração: a) Substrato de aço 1020, b) Substrato de aço 1020 com camada da liga UltraBond 25000.



Fonte: Autoria própria (2016).

A Tabela 7 apresenta um resumo dos resultados de cada ensaio, contendo a força máxima do ensaio, a tensão de ruptura e o local de rompimento.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de adesão por tração.

CP	Força (kN)	Tensão (MPa)	Rompimento
a	1,269	2,48	Interface revestimento-substrato
b	2,129	4,17	Interior do revestimento

Fonte: Autoria própria (2016).

A amostra da Figura 31-a, que corresponde ao corpo de prova com substrato de aço 1020 e sem camada da liga UltraBond 25000, apresentou falha na interface revestimento-substrato, apresentando resistência adesiva de 2,48 MPa. Já a amostra da Figura 30-b, correspondente ao corpo de prova com substrato de aço 1020 com camada de ligação da liga UltraBond 25000, apresentou falha no interior do revestimento, apresentando resistência coesiva de 4,17 MPa.

Dessa forma é possível observar que a camada de ligação da liga UltraBond 25000 melhorou a aderência do revestimento ao substrato, de forma que diferentemente da amostra sem camada da liga UltraBond 2500 a amostra que tinha

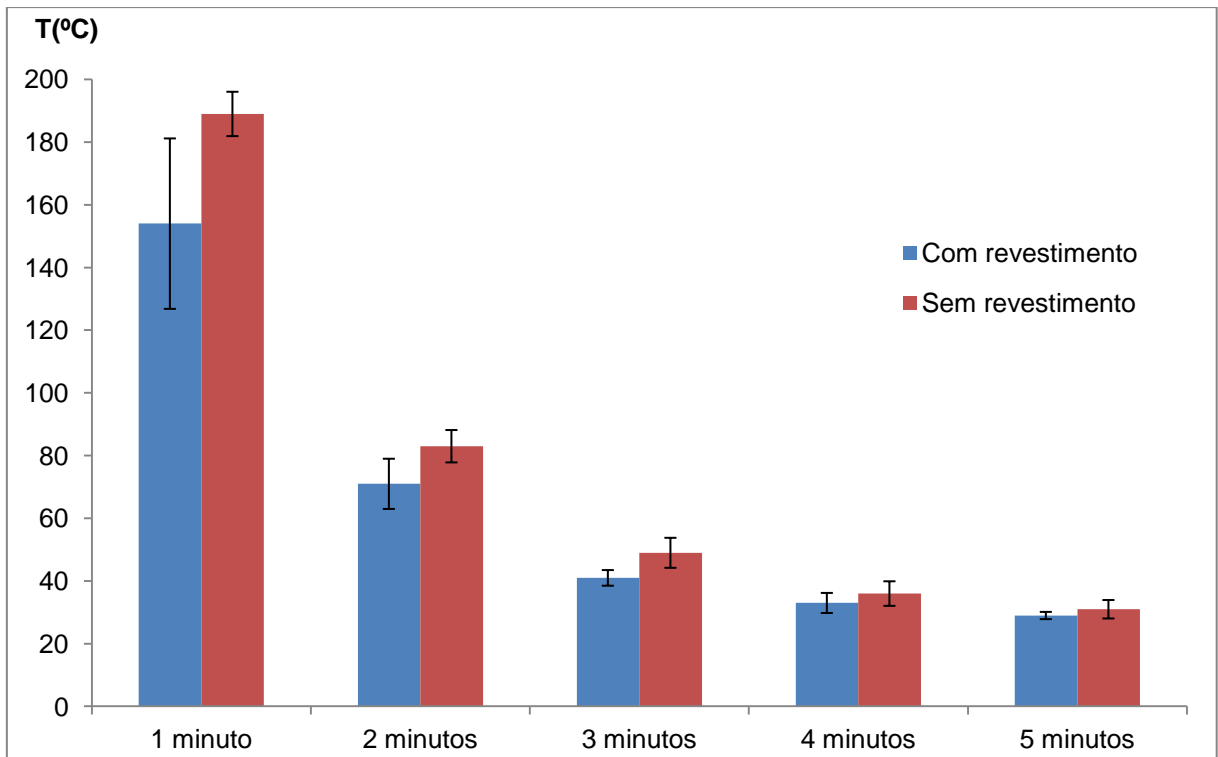
essa camada não falhou na interface revestimento-substrato, mostrando que a resistência adesiva entre a camada de ligação e o substrato é superior a 4,17 MPa, valor que é, no mínimo, 68% maior que o valor da resistência adesiva da amostra sem camada da liga UltraBond 25000.

6.7 ENSAIOS TÉRMICOS

No primeiro ensaio térmico, descrito nos materiais e métodos, para a amostra com substrato de aço 1020 a placa foi aquecida a 300°C e para as amostras com substrato da liga de alumínio 4032 a placa foi aquecida a 250°C, devido à limitação dos termômetros com termopares do tipo K para medir temperaturas acima de 200°C.

Os resultados desses ensaios estão demonstrados nas Figuras 32 e 33, com o valor médio e o desvio padrão para cada tempo.

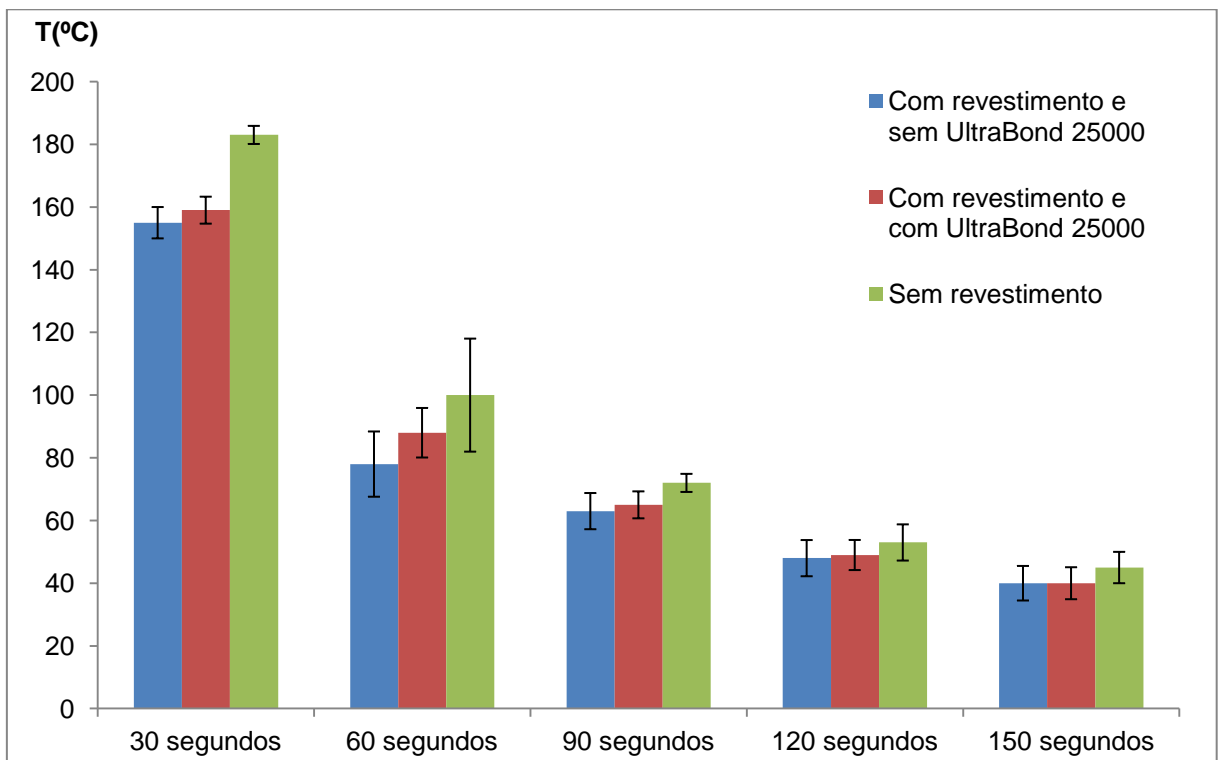
Figura 32 - Resultados do primeiro ensaio térmico para a amostra com substrato de aço 1020.



Fonte: Autoria própria (2016).

Na Figura 32, onde a amostra possuía substrato de aço 1020, é possível observar que após 1 minuto em contato com a placa aquecida, a parte do corpo de prova sem revestimento apresentou temperatura de 189°C e a parte com revestimento apresentou temperatura de 154°C, ou seja, 35°C a menos, correspondendo a aproximadamente 20% a menos que o apresentado na parte sem revestimento, resultado próximo ao apresentado por Wolf (2015). Além disso, é possível observar que durante os 5 minutos analisados (1 minuto em contato com a placa e 4 minutos fora da placa) a temperatura da parte sem revestimento caiu mais abruptamente que na com revestimento, demonstrando a baixa condutividade térmica do revestimento.

Figura 33 - Resultados do primeiro ensaio térmico para as amostras com substrato da liga de alumínio 4032.



Fonte: Autoria própria (2016).

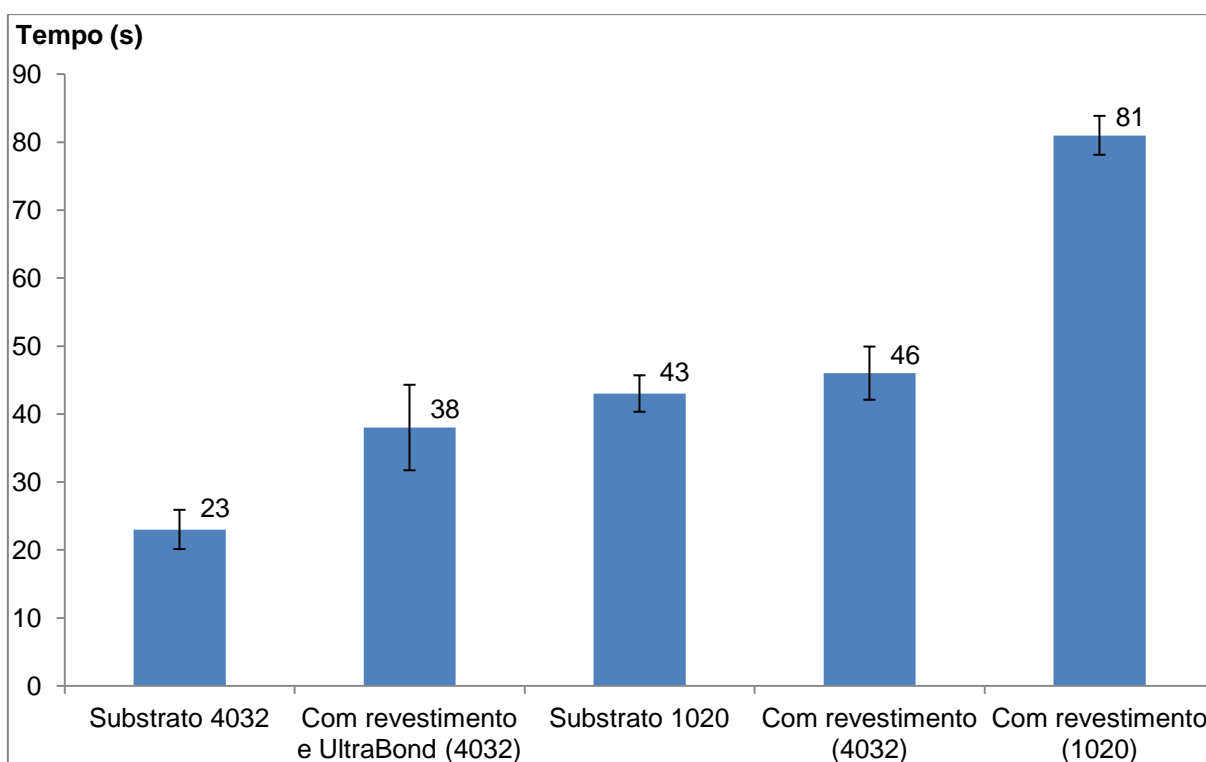
Na Figura 33, tem-se a representação das amostras com substrato da liga de alumínio 4032, com e sem camada de ligação da liga UltraBond 25000. Na amostra sem camada da liga UltraBond 25000, é possível observar que após 30 segundos em contato com a placa aquecida a parte do corpo de prova sem revestimento apresentou temperatura de 183°C e a parte com revestimento

apresentou temperatura de 155°C, ou seja, 28°C a menos, correspondendo a aproximadamente 15% a menos que o apresentado na parte sem revestimento. Já a amostra com camada da liga UltraBond 25000, apresentou temperatura de 159°C na parte com revestimento, correspondendo a aproximadamente 13% a menos que o apresentado na parte sem revestimento. Além disso, é possível observar que em ambas os casos, durante os 150 segundos analisados, a temperatura da parte sem revestimento caiu mais abruptamente do que a da parte com revestimento, demonstrando novamente a baixa condutividade térmica do revestimento.

Embora a amostra com camada de ligação da liga UltraBond 25000 apresente maior espessura, devido a essa camada extra, ela apresentou temperatura maior que a do revestimento sem camada da liga UltraBond 25000, pois essa liga é a base de níquel, um bom condutor térmico (INCROPERA, 2008).

O segundo ensaio térmico, com os valores médios e indicação do desvio padrão, está representado na Figura 34. Nesse caso, foi medido o tempo que as amostras com e sem revestimento, nos substratos de aço 1020 e da liga de alumínio 4032 com e sem camada de ligação da liga UltraBond 25000, demoraram para atingir 200°C enquanto estavam em contato com a placa aquecida a 300°C.

Figura 34 – Resultados do segundo ensaio térmico para todas as amostras.



Fonte: Autoria própria (2016).

Na Figura 34 é possível observar a ordem crescente de tempos para atingir a temperatura de 200°C: substrato da liga de alumínio 4032, amostra com revestimento e camada de ligação da liga UltraBond 25000 sobre o substrato da liga de alumínio 4032, substrato de aço 1020, amostra com revestimento sobre o substrato da liga de alumínio 4032 e amostra com revestimento sobre o substrato de aço 1020.

Quando comparadas as amostras com os mesmos substratos, têm-se os seguintes resultados:

- Amostras com substrato de aço 1020: a amostra com revestimento demorou 90% mais tempo para atingir a temperatura de 200°C em relação à amostra sem revestimento;

- Amostras com substrato da liga de alumínio 4032: a amostra com revestimento e camada de ligação da liga UltraBond 2500 demorou 65% mais tempo e a amostra com apenas revestimento demorou 100% mais tempo para atingir a temperatura de 200°C em relação à amostra sem revestimento.

Dessa forma, é possível analisar que a liga quasicristalina aproximante $Al_{71}Co_{13}Fe_8Cr_8$ funciona como barreira térmica, apresentando aumento percentual relativo de isolamento térmico, quando comparado com as amostras sem revestimento. Em relação à liga UltraBond 25000, apesar dela melhorar a aderência da camada de revestimento ao substrato, ela reduz em quase 20% o isolamento térmico obtido pela camada de revestimento, visto que essa camada não tem essa função e nem características de isolamento térmico, por ser uma liga metálica a base de níquel, confirmando o resultado apresentado no primeiro ensaio térmico.

7 CONCLUSÕES

O processo de aspersão térmica por chama a pó demonstrou-se adequado na tarefa de se obter revestimentos da liga quasicristalina aproximante $\text{Al}_{71}\text{Co}_{13}\text{Fe}_8\text{Cr}_8$.

A caracterização do revestimento por microscopia ótica apresentou um revestimento com óxidos e poros, principalmente na amostra com substrato de aço 1020. As causas do aparecimento desses óxidos e poros estão relacionadas com a baixa velocidade do método de aspersão térmica a chama a pó e as reações do revestimento de alumínio com o oxigênio presente na atmosfera, respectivamente.

O difratograma de raios-X identificou em todas as amostras a presença das fases Al_5Co_2 e $\text{Al}_{13}\text{Co}_4$ esperadas, as quais apresentam baixa condutividade térmica. Nos substratos de aço 1020 e da liga de alumínio 4032 com camada de ligação da liga UltraBond 25000 predominou a fase cristalina Al_5Co_2 e no substrato da liga de alumínio 4032 sem camada da liga UltraBond 25000 predominou a fase monoclinica $\text{Al}_{13}\text{Co}_4$, a qual possui maior concentração de alumínio. Além dessas fases, também foi encontrada a fase intermetálica $\text{Al}_{3,21}\text{Si}_{0,47}$ na amostra com substrato da liga de alumínio 4032 sem camada da liga UltraBond 25000 e as fases níquel-cfc e alumínio-cfc na amostra com substrato da liga de alumínio 4032 com camada de ligação da liga UltraBond 25000.

Embora o ensaio de dobramento no corpo de prova com substrato da liga de alumínio 4032 sem camada de ligação da liga UltraBond 25000 apresentou uma baixa aderência, com trincas, fendas e descascamento, foram conseguidos bons resultados no ensaio de microdureza Vickers e nos ensaios térmicos. Já os ensaios de dobramento para as amostras com substrato de aço 1020 e da liga de alumínio 4032 com camada de ligação da liga UltraBond 25000 apresentaram boa aderência, sem apresentar trincas, sendo ideais para aplicação.

A análise térmica do revestimento revelou que, apesar da espessura muito fina (na faixa de 300 μm), o revestimento apresentou bom isolamento térmico quando comparado aos substratos de aço 1020 e da liga de alumínio 4032, apresentando um aumento de isolamento térmico de praticamente 90% e 100%, respectivamente, confirmando essa liga como uma nova opção na seleção de materiais para aplicação em barreiras térmicas (TBC).

A camada de ligação da liga UltraBond 25000 mostrou-se eficiente na função de melhorar a aderência do revestimento ao substrato, fato comprovado pelo teste de dobramento e principalmente pelo ensaio de adesão, apresentando uma aderência pelo menos 68% maior que no corpo de prova sem camada da liga UltraBond 25000. Porém, em relação à parte térmica, a camada da liga UltraBond 25000, por ser uma camada metálica a base de níquel, reduziu em quase 20% a resistência de isolamento térmico do revestimento.

Dessa forma, aconselha-se o uso da camada de ligação da liga UltraBond 25000 em situações que exijam uma maior aderência, porém quando é necessária a maior quantidade de isolamento térmico possível, sem precisar de uma aderência tão grande, o uso do revestimento sem camada de ligação da liga UltraBond 25000 é o mais recomendado.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR NM ISO 6507-1. **Materiais metálicos – Ensaio de dureza Vickers**. ABNT, 2008.
- ALCOA GLOBAL COLD FINISHED PRODUCTS. **Deltalloy 4032**. 2016
- ALMEIDA, Daniel S. de. **Estudo de revestimentos cerâmicos sobre substrato metálico, obtidos por deposição física de vapores por feixe de elétrons para aplicação como barreira térmica**. 2005. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005.
- ASM Handbook. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**. Vol. 2. 1992.
- ASTM-C633-01. **Standard Test Method for Adhesion or Cohesive Strength of Thermal Spray Coatings**. ASTM, 2008.
- AWS - American Welding Society. **Safety and Health Fact Sheet**, n. 20, p. 3, out. 2014.
- BEARDSLEY, M. Brad. **Potential use of quasicrystalline materials as thermal barrier coatings for diesel engine components**. 2008. 150 f. Dissertação (Doutorado em Filosofia) – Iowa State University, Ames, 2008.
- CANARIM, Rubens C. **Influência da composição na mistura de pós de alumínio e ferro na formação de revestimentos de alumineto de ferro depositados por aspersão térmica a chama**. 2013. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2013.
- CARACELLI, Ignez. Nobel em Química 2011: Descoberta dos Quasicristais, uma Nova Classe de Sólidos. **Química Nova na Escola**, v. 33, p. 206-210, nov. 2011.
- DUBOIS, Jean-Marie. New prospects from potencial applications of quasicrystalline materials. **Materials Science and Engineering**, v. 294-296, p. 4-9, 2000.
- EUTECTIC CASTOLIN. **Manual de utilização do processo: RotoTec 1A**. [S. l.]. [19-].
- EUTECTIC CASTOLIN. **UltraBond 25000**. 2016.
- HUTTUNEN-SAARIVIRTA, Elina. Microstructure, fabrication and properties of quasicrystalline Al-Cu-Fe alloys: a review. **Journal of Alloys and Compounds**. Tampere, Finlândia, v. 363, p. 150-174, mar. 2004.
- INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de Transferência de calor e massa**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

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

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

MOSKAL, Grzegorz. Thermal barrier coatings: characteristics of microstructure and properties, generation and directions of development of bond. **Jornal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering**, v. 37, ed. 2, p. 323-331, dez. 2009.

NORTON, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**. 4 ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

OLIVEIRA, J. P.; DUARTE, J. F. **Revestimentos cerâmicos utilizados como barreira térmica**. *Cerâmica* 59, p. 186-191, 2013.

OLIVIO, Émillyn F. T. **Avaliação de ligas de Ni-Al utilizadas como revestimento estáveis a altas temperaturas depositados por aspersão térmica à chama pó**. 2012. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

PADTURE, Nitin P.; GELL, Maurice; JORDAN, Eric H. Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications. **Science**, Storrs, v. 296, p. 280-284, abr. 2002.

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

PAWLOWSKI, Lech. **The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings**. 2 ed. Villeneuve d'Ascq – John Wiley & Sons, 2008.

PETROBRAS N-2568. **Revestimentos Metálicos por Aspersão Térmica**. Petrobras, 2011.

RODRIGUEZ, REGINA MARIA H. P. **Formação de óxidos nos revestimentos de alumínio depositados por aspersão térmica**. 2003. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SHAITURA, D. S.; ENALEEVA, A. A. Fabrication of Quasicrystalline Coatings: A Review. **Crystallography Reports**, v. 52, n. 6, p. 945-952, 2007.

SOUZA, Angelo M. de. **Estudo para caracterização de quasicristal (AlCuFe) visando aplicação na indústria do petróleo**. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Universidade Tiradentes, Aracaju, 2009.

SUCHARSKI, Gustavo B. **Deposição de revestimentos tipo barreira térmica por aspersão térmica**. 2012. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

WOLF, Witor; AFONSO, Conrado. R. M. Ligas metálicas quasicristalinas e processos de aspersão térmica para revestimentos como barreira térmica. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**. São Carlos, v. 9, p. 01-09, maio 2014.

WOLF, Witor. **Produção e caracterização de ligas do sistema Al-Co-Fe-Cr e aplicações como recobrimentos para barreiras térmicas**. 2015. 142 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais) – Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2015.

Zircotec. **High Performance exhaust system coating**. Disponível em: <www.zircotec.com/page/exhaust-system-coating/60>. Acesso em: 13 de mar. de 2016.