

## Avaliação de propriedades mecânicas de revestimentos de aluminetos aspergidos

## Evaluation of mechanical properties of sprayed aluminide coatings

### RESUMO

Leonardo Noletto Vilela Pereira de Castro

[leonardocastro@alunos.utfpr.edu.br](mailto:leonardocastro@alunos.utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

Maria Nalu Verona Gomes

[nalu@utfpr.edu.br](mailto:nalu@utfpr.edu.br)

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, Paraná, Brasil

A utilização de revestimentos protetivos tem sido estudada pela sua relevância em ambientes corrosivos, de alto desgaste, ou que necessitem de isolamento elétrico e térmico. Nesse meio, os compostos intermetálicos de ferro e alumínio têm um grande destaque pela sua resistência à oxidação, até em altas temperaturas. Esses revestimentos podem ser depositados através da aspersão térmica, especificamente utilizando chama convencional a pó ou chama de alta velocidade. A partir de corpos de prova cilíndricos com deposição de alumineto de ferro com fase k por aspersão térmica (processos Chama pó e HVOF), foram realizados ensaios de adesão por tração utilizando adesivo epóxi entre as amostras e as contraprovas. Os ensaios foram realizados em uma máquina Universal de Ensaios utilizando um dispositivo específico com fixação por parafusos. Os resultados possibilitaram uma análise da tensão de arrancamento e uma observação visual do tipo de falha ocorrido em cada amostra. A condição que utilizou uma menor granulometria na aplicação do revestimento não atendeu a exigência mínima de valores de tensão, além de apresentar falha coesiva na fratura. Todas as outras condições apresentaram resultados satisfatórios para o ensaio de adesão por tração.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aspersão térmica. Revestimentos. Materiais compostos.

### ABSTRACT

The use of protective coatings has been studied for its relevance in corrosive environments, such as high wear and electrical and thermal insulation needed. In this field, iron and aluminum intermetallic compounds have a great prominence for their resistance to oxidation at high temperatures. These coatings can be applied through thermal spray, specifically using conventional powder flame or high velocity flame. From cylindrical specimens with deposition of iron aluminide by thermal spray, adhesion strength tests were performed using epoxy adhesive between the samples and the controls. The tests were performed on a Universal Testing machine using a specific device with screw fixation. The results allowed an analysis of the adhesion or cohesion strength and a visual observation of the type of failure that occurred in each sample. The condition that used a smaller grain size when applying the coating did not meet the minimum requirement for strength values, in addition to presenting cohesive failure in the fracture. All other conditions showed satisfactory results for the adhesion test.

**KEYWORDS:** Thermal spray. Coatings. Composite materials.

**Recebido:** 19 ago. 2020.

**Aprovado:** 01 out. 2020.

**Direito autoral:** Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



## INTRODUÇÃO

A utilização de revestimentos na engenharia tem o objetivo de fornecer uma proteção que o material do substrato não tenha, podendo melhorar a resistência contra a corrosão, desgaste, e promover isolamento térmico e elétrico, além de possibilitar o trabalho em ambientes adversos, incompatíveis com certos materiais (PAREDES, 2012).

Segundo Cinca (2015), as ligas intermetálicas de ferro e alumínio com alta concentração deste, como  $Fe_3Al$  e  $FeAl$ , estão em alta como objeto de estudo para o desenvolvimento de materiais com resistência a oxidação e a sulfidização (apud GOMES, 2016). De acordo com Calixto (2010), há aplicações na indústria petroquímica, principalmente pela boa resistência à oxidação, mas esses compostos intermetálicos também são úteis em outras aplicações, como na engenharia automotiva, no sistema de exaustão de gases dos motores, ou na parte térmica, especificamente em turbinas e trocadores de calor. O compósito  $Fe_3Al$  com adição da fase k ( $Fe_3AlC_x$ ) dispersa na matriz trouxe bons resultados, de acordo com Itoi et al (2010), aumentando a dureza e a tenacidade do intermetálico, sendo comparado ao aço alto carbono ao cromo.

Para a aplicação de revestimento com os compostos citados, um dos processos utilizados é a aspersão térmica. Para que seja feita a deposição, o material a ser aspergido deve ser levado a um estado fundido ou semifundido através de uma fonte de calor gerado em um bico direcionador. Esse material, logo após a fusão, é acelerado por gases sob pressão contra o substrato escolhido. Essa deposição vai formando camadas de revestimento, constituídas de partículas em forma de panquecas em direção paralela ao substrato, que leva à formação de lamelas (PAREDES, 2012).

A aspersão térmica pode utilizar processos variados. Um deles utiliza uma chama gerada pela combustão de um gás combustível com oxigênio (oxigênio-acetileno ou oxigênio-propano) para fundir o material a ser depositado, e pode ser utilizado sob a forma de pó ou de arame. Quando se utiliza na forma de pó (FSp), este é levado até a pistola geralmente através de um gás de arraste (nitrogênio) (CALIXTO, 2010).

Outro processo utilizado é chamado de High Velocity Oxi-Fuel (HVOF), que utiliza uma chama de alta velocidade pela mistura de um combustível (gasoso ou líquido) e oxigênio. A razão dessa mistura determina a temperatura atingida, que pode chegar a  $2900^{\circ}C$  e velocidade supersônica, já que a queima acontece sob pressão em uma câmara, liberando os gases em seguida. Nesse processo, a alimentação do pó é feita logo após a expansão dos gases, saindo com alta velocidade até o substrato a ser revestido (PAREDES, 2012).

O objetivo desse trabalho é avaliar corpos de prova aspergidos termicamente com o intermetálico  $Fe_3Al-Fe_3AlC_x$  (processos Chama pó e HVOF), especificamente analisar a microestrutura e avaliar as propriedades mecânicas através do ensaio de adesão por tração e do ensaio de dureza e microdureza.

## MATERIAL E MÉTODOS

O compósito utilizado foi o  $Fe_3Al-Fe_3AlC_x$ , produzido pela técnica de Processamento Reativo de Líquidos (PRL), e sua composição é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição do intermetálico  $Fe_3Al-Fe_3AlC_x$

Elemento	Fe	Al	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
(%massa)	81,813	16,590	0,964	0,305	0,105	0,034	0,012	0,089	0,088
(% at.)	67,28	28,238	3,686	0,499	0,088	0,050	0,017	0,079	0,064

Fonte: VERONA (2017)

O compósito  $Fe_3Al-Fe_3AlC_x$  foi aplicado por aspersão térmica em corpos cilíndricos de aço inoxidável AISI 304, medindo 1 polegada de diâmetro por 1 polegada de comprimento, totalizando 3 amostras para cada uma das 5 condições mostradas na Tabela 2. Para as contraprovas, o material utilizado foi o aço SAE 1020 com superfície jateada. Em cada condição, um par de contraprovas foi reservado para controle da resistência do adesivo.

Tabela 2 – Descrição das condições

Número do experimento	Processo	Pré-aquecimento	Granulometria
Condição 1	FSp	Sem pré-aquecimento	75 $\mu$ m - 150 $\mu$ m
Condição 2	FSp	200°C	75 $\mu$ m - 150 $\mu$ m
Condição 3	FSp	200°C	45 $\mu$ m - 75 $\mu$ m
Condição 4	HVOF 30g/min	Sem pré-aquecimento	< 45 $\mu$ m
Condição 5	HVOF 50g/min	Sem pré-aquecimento	< 45 $\mu$ m

Fonte: O Autor (2020).

O ensaio de adesão por tração foi feito de acordo com as normas ASTM C633-13 (2013) e ABNT 15877:2010. Todas as amostras passaram por limpeza, colocadas imersas em Acetona em um béquer, e este colocado em uma Cuba Ultrassônica da marca Cristófoli por 11 minutos (para cada condição). O adesivo também foi colocado na Cuba Ultrassônica para retirar as bolhas. O adesivo utilizado foi a cola epóxi Araldite Profissional da marca TekBond, cujo manual aponta que a cura deve ser feita no período de 24 horas. Foi colocada uma quantidade de adesivo suficiente para cobrir toda a superfície, retirando o excesso com uma espátula. Para assegurar o alinhamento correto e a pressão constante dos pares de amostras, foi construído um dispositivo em aço com mola e um parafuso para ajuste da pressão, conforme visto na Figura 1.

Figura 1 – Dispositivo de alinhamento.



Fonte: O Autor (2020).

Após a cura, os corpos de prova foram submetidos à tração na Máquina Universal de Ensaios Time modelo WDW100E, sendo fixados às garras através de parafusos com roscas M12 e M14. A velocidade do ensaio foi de 1 mm/min. A montagem do experimento está demonstrada na Figura 2.

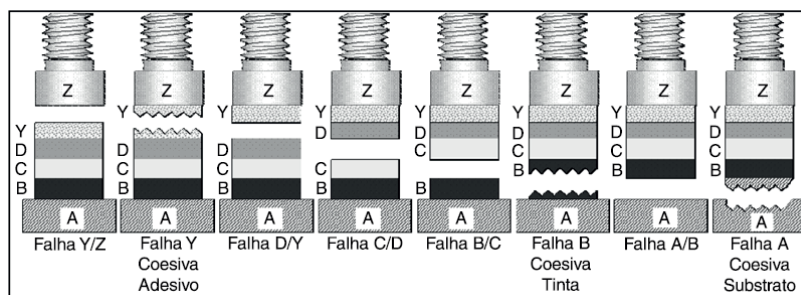
Figura 2 – Montagem do ensaio de adesão.



Fonte: O Autor (2020).

Foi possível observar dois pontos principais, que são a tensão máxima suportada (tensão de arrancamento) e a análise visual do arrancamento, identificando o tipo de falha. As amostras foram fotografadas após a ruptura, sendo a contraprova colocada à esquerda do corpo de prova com revestimento. Os possíveis tipos de falha são especificados na norma NBR 15877:2010 (ABNT, 2010), demonstrados na Figura 3, sendo A o substrato, B, C e D as camadas de revestimento aplicadas, o adesivo é representado pela letra Y e o dispositivo da máquina de ensaio pela letra Z.

Figura 3 – Desenho esquemático para interpretação dos resultados do ensaio de adesão



Fonte: Norma ABNT NBR 15877:2010 (ABNT, 2010).

De acordo com a norma NBR 15877:2010 (ABNT, 2010), a falha adesiva ocorre na interface substrato/revestimento (A/B), a falha coesiva ocorre no interior das camadas de revestimento, e a falha mista é uma combinação das duas anteriores. Caso haja falha entre o adesivo e a contraprova (Y/Z), há indicação de que a adesão e a coesão ficaram acima do limite do adesivo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ensaio de adesão retorna um valor máximo de força utilizada em cada teste. A tensão de arrancamento é a tensão máxima suportada pelos corpos de prova com o revestimento, e é mostrada na norma NBR 15877:2010 (ABNT, 2010) como a avaliação da força pelo diâmetro da amostra. Os valores calculados estão mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Tensão de arrancamento através do ensaio de adesão

Número do experimento	Tensão de arrancamento (MPa)
Condição 1	24,36 ± 0,05
Condição 2	16,74 ± 3,26
Condição 3	7,90 ± 0,36
Condição 4	17,42 ± 4,20
Condição 5	20,99 ± 5,44
Adesivo	19,21 ± 2,70

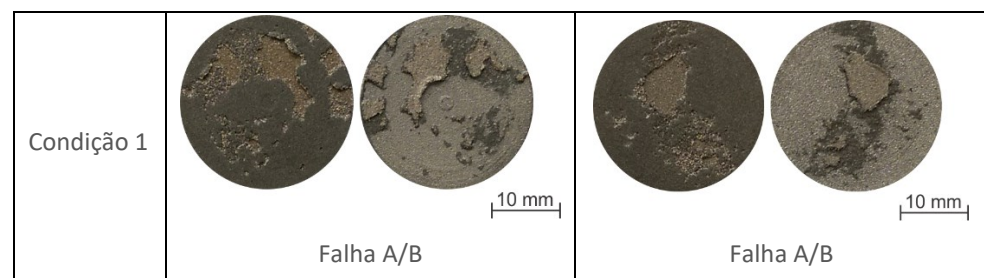
Fonte: O Autor (2020).

A norma ANSI/AWS C2.18-93 apresenta um padrão aceitável mínimo, com média de 13,8 MPa e valores maiores do que 10,3 MPa. Dessa forma, a condição 3 (menor granulometria) não atende a exigência. Observando as outras amostras, a condição 1 se destacou por não apresentar pré-aquecimento, diferente do visto em Gomes (2016), em que os melhores resultados estiveram entre aqueles com pré-aquecimento e distância de aplicação superiores.

O Quadro 1 apresenta dois corpos de prova (do total de três) que sofreram rompimento no ensaio de aderência por tração, para cada condição. A contraprova foi colocada à esquerda do corpo de prova com revestimento.

Quadro 1 – Vista superior da região de fratura do ensaio de adesão por tração

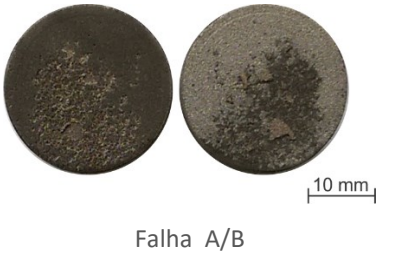
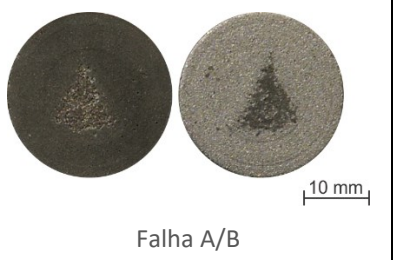
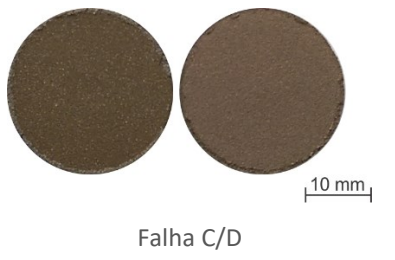
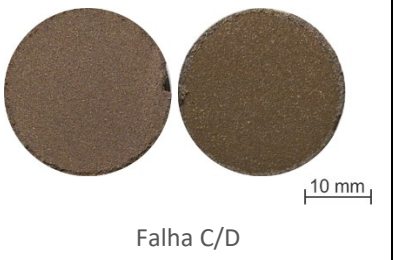
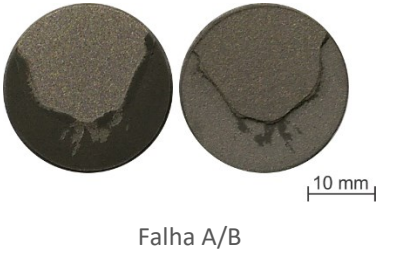
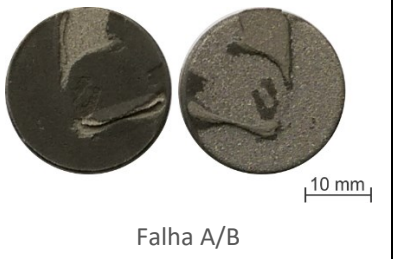
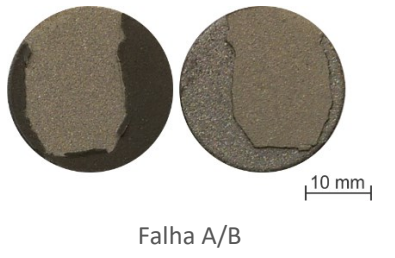
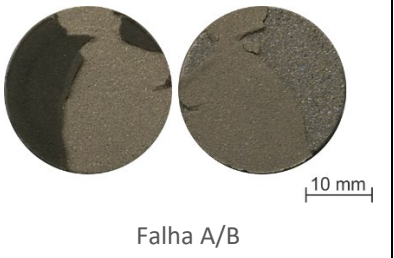
Continua



Fonte: O Autor (2020).

Quadro 1 – Vista superior da região de fratura do ensaio de adesão por tração

Conclusão

Condição 2		
Condição 3		
Condição 4		
Condição 5		

Fonte: O Autor (2020).

A condição 3, amostra com menores valores de resistência, as falhas se deram por coesão. Todas as outras amostras tiveram falhas por aderência. Excetuando-se a Condição 3, todas as outras mostraram que o substrato ficou com resíduos do revestimento, demonstrando uma possível união metalúrgica entre o revestimento substrato, contribuindo para a resistência.

## CONCLUSÃO

Foi possível realizar com sucesso o ensaio de adesão por tração com todas as amostras. A Condição 3 (condição com aspersão por Chama pó, pré-aquecimento de 200°C e granulometria menor) não apresentou resultados satisfatórios, não atendendo os valores mínimos da norma ANSI/AWS C2.18-93, além da falha coesiva analisada na observação visual da fratura. Todas as outras condições atenderam satisfatoriamente os valores mínimos, sendo que a Condição 1

(processo Chama pó, sem pré-aquecimento) alcançou os melhores valores de tensão de arrancamento.

### AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná/Brasil. Agradeço à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Nalu Verona Gomes e à Prof<sup>a</sup>. M<sup>a</sup> Silvana Verona Gomes por todo o conhecimento passado, pelo apoio e pela oportunidade dada.

### REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15877**: Pintura industrial – Ensaio de aderência por tração. Rio de Janeiro. 2010.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM C 633-13**: Standard Test Method for Adhesion or Cohesive Strength of Thermal Spray Coatings. 8 p, Reapproved, 2017.

CALIXTO, A. **Desenvolvimento “in situ” de intermetálicos fe-al em superfícies de aço carbono através da aplicação por aspersão térmica de pós de ferro e alumínio misturados**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

GOMES, M. N. V. **Desenvolvimento do compósito de fe3al-k nanométrico em matriz de alumínio para revestimento depositado por aspersão térmica chama a pó**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

ITOI, T.; MINETA, S.; KIMURA, H.; YOSHIMI, K.; HIROHASHI, M. Fabrication and wear properties of fe3al-based composites. **Intermetallics**, v.18, p. 2169-2177. 2010.

PAREDES, R. S. C. **Aspersão térmica**. Texto Guia da Disciplina de Aspersão Térmica na Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPR (disponível na Biblioteca da UFPR – Centro Politécnico) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

VERONA, M. N.; SETTI, D.; PAREDES, R.S.C. Microstructure and properties of fe3al-fe3alc x composite prepared by reactive liquid processing. **Metalurgical and Materials Transactions B**, v. 49, p. 529-536. 2017.