

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA**

WELLINGTON UCZAK DE GOES

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À EROÇÃO A QUENTE DE
REVESTIMENTOS CERÂMICOS YSZ DEPOSITADOS POR
ASPERSÃO TÉRMICA**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2016

WELLINGTON UCZAK DE GOES

**AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À EROSÃO A QUENTE DE
REVESTIMENTOS CERÂMICOS YSZ DEPOSITADOS POR
ASPERSÃO TÉRMICA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz

PONTA GROSSA

2016

FOLHA DE APROVAÇÃO

Título de Dissertação Nº 10/2016

**“AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À EROÇÃO A QUENTE DE REVESTIMENTOS
CERÂMICOS YSZ DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA”**

Por

Wellington Uczak de Goes

Esta dissertação foi apresentada às **14 horas de 12 de dezembro de 2016, na sala da COTED**, como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA, com Área de Concentração em Fabricação Mecânica e Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
(UFRGS)

Prof. Dr. Luciano Augusto Lourençato
(PPGEM/UTFPR-PG)

**Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena
Pukasiewicz (PPGEM-PG/UTFPR) –
Orientador**



Visto do Coordenador:

Prof. Dr. Thiago Antonini Alves
Coordenador Substituto do PPGEM
UTFPR – Câmpus Ponta Grossa

**A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO DE
REGISTROS ACADÊMICOS DA UTFPR –CÂMPUS PONTA GROSSA**

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz, que com paciência e dedicação me ajudou a elaborar este trabalho, por ser um excelente professor e profissional, ao qual me espelho.

Aos meus pais Gilson e Eronice por me proporcionarem o dom da vida e pela determinação e luta para a minha formação. Ao meu irmão Vinícius pelo convívio e amizade.

A todos os amigos do Laboratório de Materiais da UTFPR, pelo respeito, auxílio e também pela parceria, tanto nas horas de trabalho quanto nas horas de diversão e churrascos.

Aos velhos e novos amigos que fiz tanto os companheiros de profissão e os que também a vida me apresentou que são de muito valor para mim, pelo companheirismo, paciência e amizade.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul, especificamente o Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) por meio do prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann e do aluno de doutorado MSc. Matheus Araújo da Cunha.

Ao Instituto Lactec, pela concessão da bolsa de mestrado e dos recursos financeiros, possibilitando a realização dessa pesquisa.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa, que me proporcionou um ensino de qualidade e gratuito.

E finalmente agradeço a Deus, por tudo, sempre.

"There is no free lunch".
(Milton Friedman)

RESUMO

GOES, Wellington Uczak de. **Avaliação da resistência à erosão a quente de revestimentos cerâmicos YSZ depositados por aspersão térmica.** 2016. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2016.

O presente trabalho tem por objetivo principal estudar o comportamento à erosão a quente de revestimentos cerâmicos YSZ (*Yttria Stabilized Zirconia*) depositados por aspersão térmica a plasma. Os revestimentos YSZ, cuja função é diminuir a transferência de calor em componentes submetidos à elevadas temperaturas, são depositados sobre uma camada de revestimento metálico de NiCrAlY (níquel, cromo, alumínio e ítria), com a função de proteger contra a oxidação. A união destes revestimentos formam o revestimento do tipo TBC (*Thermal Barrier Coating*), normalmente aplicado para a proteção de componentes de turbinas a gás contra a ação da elevada temperatura e oxidação do ambiente. Além das altas temperaturas esses revestimentos também podem ser submetidos ao impacto de partículas sólidas, oriundas da poeira, que passam pelos filtros, ou dos estágios de compressão ou câmara de combustão, vinda da queima do combustível, ocasionando o desgaste do revestimento. Para entender o fenômeno e suas implicações nos revestimentos YSZ, avaliou-se a resistência destes revestimentos frente ao desgaste erosivo à altas temperaturas, avaliando-se a influência de sua composição química, ângulo de incidência e temperatura. Os ensaios de erosão foram realizados entre 700 e 900°C, sob diferentes ângulos de incidência entre 30° e 90°. Em todos os testes, a velocidade de impacto, fluxo de partículas e o abrasivo foram mantidos constantes, sendo que o teste teve embasamento na norma ASTM G 76. A superfície desgastada dos revestimentos foram avaliadas por meio de perfilometria ótica e microscopia eletrônica de varredura. Com as diferentes ligas comerciais, constatou-se que o revestimento YSZ 7Y 1,7Hf, menos poroso e mais aderente obteve uma maior resistência ao desgaste. O mecanismo de desgaste observado foi a partir da quebra e destacamento individual das lamelas do revestimento devido a intersecção de trincas. De forma geral, observou-se uma redução da perda de massa dos revestimentos com o aumento da temperatura, dentro das temperaturas utilizadas no trabalho. A taxa de erosão demonstrou ser diretamente proporcional aos perfis de rugosidade, dessa maneira uma diminuição da taxa de erosão acarreta uma diminuição da rugosidade do revestimento. Quanto ao efeito do ângulo de impacto, observou-se que o aumento do ângulo de incidência das partículas propiciou uma maior taxa de erosão.

Palavras-chave: Revestimento TBC. Revestimentos cerâmicos. Aspersão térmica. Erosão a quente. Erosão por partículas sólidas.

ABSTRACT

GOES, Wellington Uczak de. **Evaluation of hot erosion resistance of YSZ ceramic coatings deposited by thermal spray.** 2016. 96p. Dissertation (Masters in Mechanical Engineering) - Federal University of Technology- Parana. Ponta Grossa, 2016.

The present work has the main objective to study the behavior of YSZ (Yttria Stabilized Zirconia) deposited by thermal spraying exposed to solid particle hot erosion. The YSZ coatings, whose function is to decrease the heat transfer, are deposited over a metal coating layer of NiCrAlY (nickel, chromium, aluminum and yttrium), which has the function to protect against oxidation. The union of these layers form the coating of the type TBC (Thermal Barrier Coating), generally used for protection of gas turbine components against the action of elevated temperature and oxidizing environment. In addition to the high temperatures, these coatings can also be subjected to the impact of solid particles, that comes with the dust that pass through the filters, or that comes from the compression stages or combustion chamber and that comes from the fuel burns, leading to the wear of the coating. In order to understand the phenomenon and the implications of this for the application of coatings, it was evaluated the resistance of these coatings facing the erosive wear at high temperatures, evaluating the influence of the chemical composition, impingement angles and the temperature used. The tests were performed from 700 to 900 °C, under different impingement angles of 30 ° and 90 °. In all tests, the impact velocity, the flow and the abrasive particles were maintained constant, and the test was based in the ASTM G 76. The worn surfaces of the coatings were studied by optical profilometry and scanning electron microscopy. With the different commercial alloys, it was found that the YSZ 7Y 1,7Hf coating with lower porosity and more adherent coating obtained a higher wear resistance. The mechanism of mass loss observed was by individual rupture and detachment of the lamellae from the coating by the intersection of cracks. A reduction in the mass loss of the coatings was observed with the increasing of the temperature, within the temperatures used in the work. For the roughness of the coatings, the erosion rate was shown to be directly proportional, wherein with the decrease in erosion rate there was a reduction in the roughness of the coatings. As for the effect of the angle of impingement, it was observed that with the increase of the angle of impingement higher was the erosion rate.

Keywords: TBC coating. Ceramic coating. Thermal spray. Hot Erosion. Solid particle erosion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação de uma turbina a gás industrial de tamanho médio.....	17
Figura 2 - Vista em corte de uma palheta e representação de um revestimento TBC e, o seu gradiente de temperatura.	18
Figura 3 - Diagrama de fases da zircônia estabilizada com ítria.	20
Figura 4 – Princípio de funcionamento de uma pistola HVOF.....	22
Figura 5 – Modelo genérico de um processo de aspersão térmica por plasma APS.	23
Figura 6 – Forma de deformação e destacamento de material caracterizado no mecanismo dúctil A) Sulcamento, Tipo I) e Tipo II).	25
Figura 7 - Geometria da trinca cone Hertziana formada por um carregamento normal e uma esfera contra uma superfície plana de um material frágil.	26
Figura 8- Diagrama demonstrando a formação de uma trinca lateral (L) em um material frágil devido à indentação pontual.	26
Figura 9 – Representação esquemática do efeito do ângulo de impacto na taxa de erosão de materiais dúctil e frágil.	28
Figura 10 – Influência do ângulo de impacto em revestimentos.....	29
Figura 11 - Dependência da taxa de erosão em relação à dureza das partículas em um aço endurecido C60H.....	31
Figura 12 - Variação da taxa de erosão para algumas ligas.	32
Figura 13 - Mecanismo de desgaste: 1 - Fadiga da fase intergranular, 2 - Micro trincas no contorno de grão, 3 - Indução de micro trincas no grão, 4 - Desprendimento do grão, 5 - Perda de fragmentos de grão.	34
Figura 14 - Classificação da resistência ao desgaste de materiais dependendo do conteúdo volumétrico de fase dura.	35
Figura 15 - Taxa de erosão a 1000°C com erodente alumina de 150 mesh e variação de dois ângulos de incidência: comparação entre o revestimento poroso, o revestimento segmentado e os revestimentos avançados YAG (Ítrio) e Gd (Gadolínio).....	36
Figura 16 - Taxa de erosão a 1000°C com erodente alumina de 400 mesh e variação de dois ângulos de incidência: comparação entre o revestimento poroso, de baixa porosidade, o revestimento segmentado e os revestimentos avançados YAG (Ítrio) e Gd (Gadolínio).....	37
Figura 17 - Taxa de erosão em revestimentos porosos e segmentados com 1000°C e ângulo de incidência de 30°, variando a velocidade de impacto e o tamanho da partícula.	38
Figura 18 - Revestimento TBC mostrando o detalhe, após o ensaio de erosão, da morfologia de “parede de tijolos”.	39
Figura 19 – Etapas da metodologia para alcançar os objetivos.	40
Figura 20 – Aplicação do revestimento <i>Bond Coat</i> por HVOF.	42
Figura 21 – Pistola HVOF DJ2700.	43
Figura 22 - Pistola modelo 9MB.	43
Figura 23 – Processo de pré-aquecimento.	44

Figura 24 – Corpo de prova para o ensaio de aderência.	48
Figura 25 - Montagem dos corpos-de-prova no dispositivo de auto-alinhamento para ensaio de aderência.	48
Figura 26 - Montagem do dispositivo de auto-alinhamento para ensaio de aderência no equipamento para tração.....	49
Figura 27 – Parâmetro de rugosidade Sz.....	51
Figura 28 – Desenho esquemático de um equipamento de erosão por partículas sólidas.	52
Figura 29 – Equipamento de Erosão a Quente.	52
Figura 30 - Equipamento para ensaios de desgaste erosivo subdividido em partes principais: (1) sistema de pré-aquecimento do ar, (2) sistema de alimentação de partículas erodentes; (3) Sistema Venturi-acelerador de partículas, e; (4) Forno para os ensaios.	53
Figura 31 – Porta amostras detalhe termopar	53
Figura 32 – Porta amostras detalhe ângulo de impacto na amostra.	54
Figura 33 – Morfologia do pó YSZ 7Y1,7Hf.....	55
Figura 34 – Seção transversal do revestimento YSZ 7Y1,7Hf.	55
Figura 35 – Maior ampliação da seção transversal do revestimento YSZ 7Y1,7Hf...	56
Figura 36 – Imagem BSE (a) e SE (b) da superfície do revestimento YSZ 7Y1,7Hf.	57
Figura 37- Dureza do revestimento YSZ 7Y1,7Hf.	58
Figura 38 – DRX do revestimento YSZ 7Y1,7Hf.	58
Figura 39 – Morfologia do pó YSZ 8Y.	59
Figura 40 – Seção transversal do revestimento YSZ 8Y.....	60
Figura 41 – Maior ampliação da seção transversal do revestimento YSZ 8Y.	60
Figura 42 – Imagem BSE (a) e SE (b) da superfície do revestimento YSZ 8Y.....	61
Figura 43 – Dureza do revestimento YSZ 8Y.....	62
Figura 44 – DRX do revestimento YSZ 8Y.....	63
Figura 45 – Evolução da perda de massa no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com as variações da temperatura a 90° para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf e YSZ 8Y.	64
Figura 46 – Superfície do revestimento YSZ 7Y1,7Hf antes (a) e depois (b) do ensaio de erosão na temperatura de 700°C.	65
Figura 47 – Destaque da superfície do revestimento YSZ 7Y1,7Hf antes e depois do ensaio, respectivamente (a) e (b), na temperatura de 700°C.....	66
Figura 48 – Superfície do revestimento YSZ 8Y antes (a) e depois (b) do ensaio de erosão com a temperatura de 700°C.....	67
Figura 49 – Destaque da superfície do revestimento YSZ 8Y antes (a) e depois (b), do ensaio de erosão com a temperatura de 700°C.	68
Figura 50 – Superfície do revestimento YSZ 7Y1,7Hf antes (a) e depois (b) do ensaio de erosão na temperatura de 900°C.	68
Figura 51 – Destaque da superfície do revestimento YSZ 7Y1,7Hf, antes (a) e depois (b), na temperatura de ensaio de 900°C.	69
Figura 52 – Superfície do revestimento YSZ 8Y antes (a) e depois (b) do ensaio de erosão com a temperatura de 900°C.....	70

Figura 53 – Superfície do revestimento YSZ 8Y antes (a) e depois (b), do ensaio de erosão com a temperatura de 900°C.....	70
Figura 54 – Seção transversal do revestimento YSZ 7Y1,7Hf, antes (a) e depois (b), do ensaio de erosão na temperatura de ensaio de 900°C.	71
Figura 55 – Detalhe da seção transversal do revestimento YSZ 7Y1,7Hf, depois do ensaio de erosão, na temperatura de ensaio de 700°C e 900°C, respectivamente (a) e (b).....	72
Figura 56 – Seção transversal do revestimento YSZ 8Y antes e depois do ensaio de erosão (a) e (b) respectivamente, na temperatura de ensaio de 900°C.....	72
Figura 57 – Detalhe da seção transversal do revestimento YSZ 8Y, depois do ensaio de erosão, na temperatura de ensaio de 700 e 900°C, respectivamente (a) e (b). ...	73
Figura 58 - Evolução da Rugosidade, com a ampliação de 50x, para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf, antes (a) e depois (b) do ensaio de erosão na temperatura de 700°C com ângulo de ataque de 90°.....	74
Figura 59 - Evolução da Rugosidade, com a ampliação de 50x, para o revestimento YSZ 8Y antes (a) e depois (b), do ensaio de erosão na temperatura de 700°C com ângulo de ataque de 90°.....	74
Figura 60 - Evolução da Rugosidade Sq no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de ataque de 90° para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf.	75
Figura 61 - Evolução da Rugosidade Sq no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de ataque de 90° para o revestimento YSZ 8Y.	76
Figura 62 - Evolução da Rugosidade Sz no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de ataque de 90° para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf.	77
Figura 63 - Evolução da Rugosidade Sz no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de ataque de 90° para o revestimento YSZ 8Y.	78
Figura 64 - Evolução da Rugosidade Sa no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de ataque de 90° para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf.	79
Figura 65 - Evolução da Rugosidade Sa no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de ataque de 90° para o revestimento YSZ 8Y.	80
Figura 66 - Evolução da perda de massa no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com variação do ângulo de impacto.	82
Figura 67 – Imagem da superfície do revestimento depois do ensaio de erosão, na temperatura de ensaio de 700°C com 30° e 90°, respectivamente (a) e (b).....	83
Figura 68 – Imagem da superfície do revestimento depois do ensaio de erosão, na temperatura de ensaio de 800°C com 30° e 90°, respectivamente (a) e (b).....	84
Figura 69 - Evolução da Rugosidade Sq no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de incidência de 30°.....	85
Figura 70 - Evolução da Rugosidade Sq no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de incidência de 90°.....	85
Figura 71 - Evolução da Rugosidade Sz no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de incidência de 30°.....	86

Figura 72 - Evolução da Rugosidade Sz no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de incidência de 90°.	87
Figura 73 - Evolução da Rugosidade Sa no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de incidência de 30°.	88
Figura 74 - Evolução da Rugosidade Sa no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de incidência de 90°.	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química <i>Hastelloy X</i> em percentual de peso, obtida por EDS.	41
Tabela 2 – Composição química do revestimento <i>Bond Coat</i>	41
Tabela 3 – Composição revestimentos <i>Top Coat</i>	41
Tabela 4 – Parâmetros de deposição <i>Bond Coat</i>	44
Tabela 5 – Parâmetros de Deposição <i>Top Coat</i>	45
Tabela 6 – Parâmetros da análise por DRX.	46
Tabela 7 – Variação Rugosidade <i>Sq</i> para os revestimentos YSZ 7Y1,7Hf e YSZ 8Y.	76
Tabela 8 – Variação Rugosidade <i>Sz</i> para os revestimentos YSZ 7Y1,7Hf e YSZ 8Y.	78
Tabela 9 – Variação Rugosidade <i>Sa</i> para os revestimentos YSZ 7Y 1,7Hf e YSZ 8Y.	80
Tabela 10 – Revestimento cerâmico utilizado nos ensaios de variação do ângulo de impacto.	81
Tabela 11 – Variação Rugosidade <i>Sq</i> para os ângulos de ataque de 30 e 90°.	86
Tabela 12 – Variação Rugosidade <i>Sz</i> para os ângulos de ataque de 30 e 90°.	87
Tabela 13 – Variação Rugosidade <i>Sa</i> para os ângulos de ataque de 30 e 90°.	89

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ACRÔNIMOS

APS	<i>Air Plasma Spray</i> (Aspersão Plasma ao Ar)
ASTM	<i>American Standard for Testing Materials</i> (Norma Americana para Testes de Materiais)
BC	<i>Bond Coat</i> (Revestimento de Adesão ou Camada de Ligação)
EBPVD	<i>Physical Vapor Deposition by Electron Beam</i> (Deposição Física de Vapor por Feixe de Elétrons)
EDS	<i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i> (Espectroscopia por Dispersão de Energia de Raios X)
HVOF	<i>High Velocity Oxy-Fuel</i> (Aspersão por Chama de Alta Velocidade)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional para Padronização)
LPPS	<i>Low Pressure Plasma Spray</i> (Aspersão a Plasma de Baixa Pressão)
TBC	<i>Thermal Barrier Coating</i> (Revestimento de Barreira Térmica)
TC	<i>Top Coat</i> (Revestimento Térmico ou Revestimento de Isolamento Térmico)
TGO	<i>Thermally Grown Oxide</i> (Camada de Óxido Termicamente Crescida)
VPS	<i>Vacuum Plasma Spray</i> (Deposição Plasma em Vácuo)
YSZ	<i>Yttria Stabilized Zirconia</i> (Zircônia Estabilizada com Ítria)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	15
1.2.1 Objetivo geral.....	15
1.2.2 Objetivos específicos	15
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1 COMPONENTES REVESTIDOS DE UMA TURBINA A GÁS	16
2.2 REVESTIMENTOS DE BARREIRA TÉRMICA	18
2.3 TÉCNICAS DE ASPERSÃO TÉRMICA	21
2.3.1 Aspersão térmica HVOF (<i>High Velocity Oxy- Fuel</i>)	21
2.3.2 Aspersão térmica a plasma APS (<i>Air Plasma Spray</i>)	22
2.4 DESGASTE POR EROSIÃO	23
2.4.1 Modelos de erosão	23
2.4.1.1 Erosão por deformação plástica.....	24
2.4.1.2 Erosão por fratura frágil	25
2.4.2 Variáveis que influenciam no processo de erosão.....	27
2.4.3 Comportamento tribológico de materiais cerâmicos	33
2.4.4 Comportamento tribológico de revestimentos cerâmicos	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1 DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS E PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO	41
3.1.1 Composição química dos materiais utilizados	41
3.1.2 Preparação do substrato.....	42
3.1.3 Deposição dos revestimentos	42
3.1.4 Preparação metalográfica das amostras	45
3.1.5 Avaliação da microestrutura e superfície	45
3.1.6 Determinação da porosidade dos revestimentos	46
3.1.7 Ensaio de difratograma por DRX	46
3.1.8 Determinação da dureza dos revestimentos.....	47
3.1.9 Determinação da aderência dos revestimentos	47
3.1.10 Determinação da taxa de erosão volumétrica	49
3.1.11 Determinação da rugosidade	50
3.2 ENSAIO DE EROSIÃO A QUENTE	51
3.2.1 Equipamento utilizado para ensaio de erosão a quente	51
3.2.2 Parâmetros fixos de ensaio	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS <i>TOP COAT</i> YSZ	55
4.1.1 Revestimento YSZ 7Y 1,7Hf	55
4.1.2 Revestimento YSZ 8Y.....	59

4.2 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À EROSÃO DOS REVESTIMENTOS YSZ...	63
4.2.1 Comportamento da perda de massa para os diferentes revestimentos no ensaio de erosão à quente	64
4.2.2 Comportamento da rugosidade antes e após o ensaio de erosão para os diferentes revestimentos	74
4.3 AVALIAÇÃO DO ÂNGULO DE ENSAIO EM DIFERENTES TEMPERATURAS DE TESTE DE EROSÃO	81
4.3.1 Comportamento da perda de massa após o ensaio de erosão	81
4.3.2 Comportamento da rugosidade sob diferentes ângulos de incidência antes e após o ensaio de erosão	84
5 CONCLUSÃO.....	90
REFERÊNCIAS.....	91

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos 40 anos houve uma crescente utilização das turbinas a gás na produção de energia elétrica. Com isso, muitas pesquisas estão sendo feitas para que se possa ter uma maior eficiência do equipamento. Uma das linhas de pesquisa estudadas, busca o aumento da eficiência destes equipamentos com o aumento da temperatura e da pressão de trabalho. Fazendo com que o estudo dos revestimentos aspergidos, que são aplicados em alguns componentes das turbinas, seja cada vez mais necessário.

Os revestimentos aplicados em condições extremas são os revestimentos TBC (*Thermal Barrier Coatings*) conhecidos em português como revestimentos de barreira térmica. Os revestimentos TBC são revestimentos multicamadas que possuem três constituintes principais. Primeiramente uma superliga, de níquel ou cobalto, que forma um substrato para o revestimento, sobre a qual é depositada a primeira camada de revestimento, conhecida como BC (*Bond Coat*) que é uma camada mais resistente à oxidação, formada principalmente pela liga NiCrAlY. Sobre esta camada, uma segunda camada é depositada, ou TC (*Top Coat*), a qual é a camada de revestimento cerâmico que tem por função diminuir a condutividade térmica, e aumentar a resistência a altas temperaturas (CLARKE *et al.*, 2012).

O material cerâmico adotado como revestimento tem o objetivo de reduzir a transferência de calor, entretanto, esses revestimentos também podem ser submetidos a erosão a quente devido ao impacto de partículas sólidas, que podem ser originada de poeira, que passa pelos filtros da turbina, ou oriunda dos estágios de compressão ou câmara de combustão, vinda da queima do combustível.

Segundo a ASTM G 40-92, a erosão é a perda progressiva de material de uma superfície sólida devido à interação mecânica entre a superfície e um fluido, contendo partículas líquidas ou sólidas. Sendo assim, o desgaste erosivo é caracterizado pela perda de material devido ao impacto sucessivo de partículas sólidas ou não, dependendo das suas características estruturais e propriedades associadas.

No que diz respeito ao teste de erosão, em 1904 já existia um equipamento pneumático de teste equipado com um bico injetor de partículas, contudo somente a partir do ano de 1938, diferentes estudos sobre erosão começaram a surgir devido a utilização de combustíveis ricos em cinzas, empregados em plantas de geração de energia, sendo que, as cinzas acabavam por realizar um desgaste nos tubos das

caldeiras. Mais tarde, o que motivou o interesse nesses estudos foram as pás de turbinas a gás e as linhas de transporte pneumático utilizadas na segunda guerra mundial (KLEIS e KULU, 2008).

Os problemas decorrentes da erosão dos revestimentos cerâmicos, vão desde à formação de trincas, à um desgaste mais elevado do componente, diminuindo seu ciclo de vida, podendo levar à falha prematura do equipamento. Neste sentido, o estudo da erosão de revestimentos cerâmicos é importante para aprofundar o conhecimento e poder avaliar as características microestruturais que alteram o comportamento da erosão destes revestimentos, possibilitando conhecer melhor o fenômeno e até obter um material mais resistente à erosão a quente.

1.1 JUSTIFICATIVA

A importância de conhecer o fenômeno da erosão nos revestimentos cerâmicos decorre destes revestimentos serem expostos à erosão a quente. Conhecendo-se mais profundamente esse fenômeno, pode-se aplicar os conhecimentos adquiridos em diferentes campos de aplicação de revestimentos cerâmicos, entre eles: tubos de caldeira, superaquecedores, transporte pneumático de materiais sólidos, mineração e economizadores de plantas industriais baseadas em carvão mineral.

Este projeto tem como principal justificativa buscar uma construção do conhecimento do fenômeno da erosão a quente em revestimentos cerâmicos YSZ (*Yttria Stabilized Zirconia*), em português Zircônia Estabilizada com Ítria, e dessa forma possibilitar a aplicação dos conhecimentos gerados no desenvolvimento de revestimentos que tenham uma melhor resistência a esse fenômeno.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o processo de erosão à quente de revestimentos cerâmicos YSZ, bem como estudar a correlação entre diferentes aspectos da erosão, como temperatura e ângulo de incidência em revestimentos YSZ depositados com diferentes ligas comerciais.

1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a resistência à erosão a quente de diferentes ligas comerciais de revestimentos cerâmicos YSZ, avaliando-se a perda de massa e os mecanismos de desgaste envolvidos.

- Analisar a influência da temperatura e do ângulo de incidência no desgaste erosivo do revestimento YSZ.

- Verificar os mecanismos de desgaste observados nos ensaios de erosão à quente dos diferentes revestimentos depositados, avaliando a influência dos aspectos microestruturais na perda de massa dos revestimentos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2, de Revisão Bibliográfica serão abordados os seguintes assuntos: descrição dos componentes de turbinas a gás submetidos ao desgaste erosivo, características dos revestimentos TBC, descrição das técnicas de aspersão térmica e dos mecanismos de desgaste por erosão observados na literatura.

No Capítulo 3, serão detalhados os Materiais e os Métodos utilizados na realização desta pesquisa. Também, serão apresentados os equipamentos utilizados e a preparação para a execução dos ensaios.

No Capítulo 4, serão apresentados os Resultados e Discussões com a avaliação da resistência à erosão a quente de diferentes ligas comerciais de revestimentos cerâmicos YSZ de acordo com a variação da temperatura e ângulo de impacto baseando-se na perda de massa, nos mecanismos de desgaste e na rugosidade superficial.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 COMPONENTES REVESTIDOS DE UMA TURBINA A GÁS

A estrutura de uma turbina a gás é apresentada na Figura 1, seu funcionamento começa quando o ar atmosférico admitido no primeiro estágio do compressor, segue para os diferentes estágios de compressão, onde acontece o aumento da pressão e da temperatura desse ar. Quando a pressão e a temperatura estão adequadas, o ar é injetado na câmara de combustão e misturado com o combustível, formando a mistura que será queimada.

Em decorrência dessa combustão, gases sob altas temperaturas, na faixa de 1500°C, são produzidos e passam para a turbina que é responsável por retirar a energia desses gases, transformando-os em potência mecânica, através da rotação de suas pás. Depois os gases são eliminados na exaustão à temperaturas na faixa de 500°C. Ainda é interessante ressaltar que aproximadamente metade da energia de rotação da turbina é utilizada para movimentar o compressor, gerando uma eficiência de aproximadamente 50% (MASTERS, 2004); (ESTRADA e CARLOS, 2007).

A região da turbina a gás que possui as temperaturas mais elevadas de operação é a câmara de combustão. Neste elemento as temperaturas podem chegar na faixa dos 1650 °C, existe um controle térmico posterior a queima por meio da injeção de um excesso de ar do compressor para que dessa forma a câmara de combustão tenha uma queda na temperatura. Neste componente, os revestimentos térmicos são aplicados no interior dos combustores e dutos de transição proporcionando um isolamento térmico, um revestimento refletivo e também uma proteção contra a erosão (SIMS *et al.*, 1987).

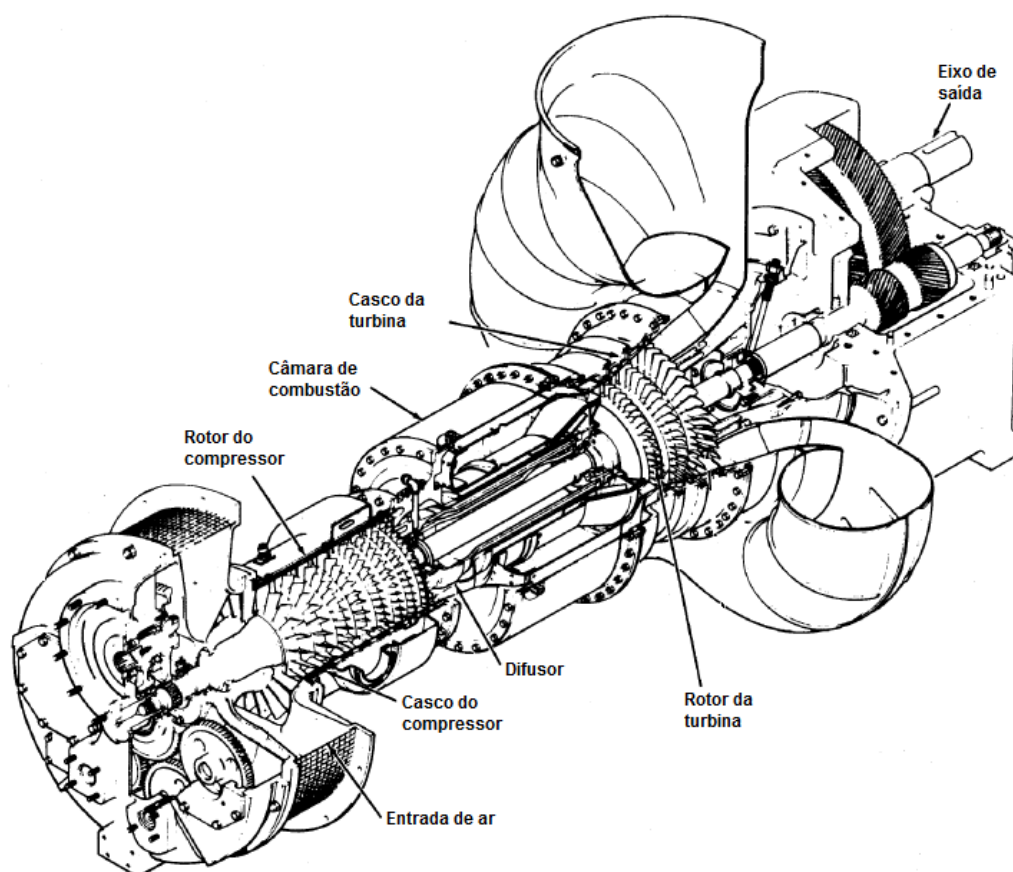


Figura 1 – Representação de uma turbina a gás industrial de tamanho médio.
Fonte: Boyce (2006).

Após a câmara de combustão encontram-se as palhetas estatoras do primeiro estágio, que têm por função primordial acelerar e direcionar os gases quentes no ângulo correto para o rotor da turbina. O componente é altamente exigido, com isso o revestimento aplicado tem por função a proteção do mesmo contra a elevada temperatura e contra à oxidação decorrente deste ambiente agressivo (ROLLS-ROYCE, 1986); (SIMS *et al.*, 1987).

As palhetas rotoras da turbina são as responsáveis pela conversão da energia cinética dos gases quentes, provenientes das palhetas estatoras, em energia de rotação do eixo, que leva energia para o compressor, movimentando também os elementos que estão ligados à turbina. As palhetas estão sujeitas à diversas intempéries tanto no que diz respeito às temperaturas elevadas quanto à diferentes elementos que entram no sistema por meio do combustível e do ar admitido, podendo gerar um desgaste erosivo destes elementos (SIMS *et al.*, 1987).

Os discos da turbina são onde as palhetas rotoras estão posicionadas por meio de juntas de encaixe e estão sujeitos, além da força centrífuga dos componentes que estão encaixados na mesma, à exposição das altas temperaturas de descarga do compressor (SIMS *et al.*, 1987).

2.2 REVESTIMENTOS DE BARREIRA TÉRMICA

Os revestimentos de barreira térmica são necessários para proteger os diferentes componentes contra a ação de fenômenos físicos como o desgaste erosivo, a corrosão à quente, a oxidação e a degradação das propriedades mecânicas com a temperatura. O aumento da eficiência das turbinas acarreta em um aumento da temperatura de trabalho dos componentes, esses revestimentos tornam-se cada vez mais necessários e seu estudo mais importante (BOYCE, 2006).

Para um melhor entendimento do que significa cada um destes elementos do revestimento TBC tem-se o desenho esquemático Figura 2, que além de representar os constituintes do revestimento, apresenta também o gradiente térmico obtido entre os gases quentes e o substrato da palheta (ALMEIDA, 2005).

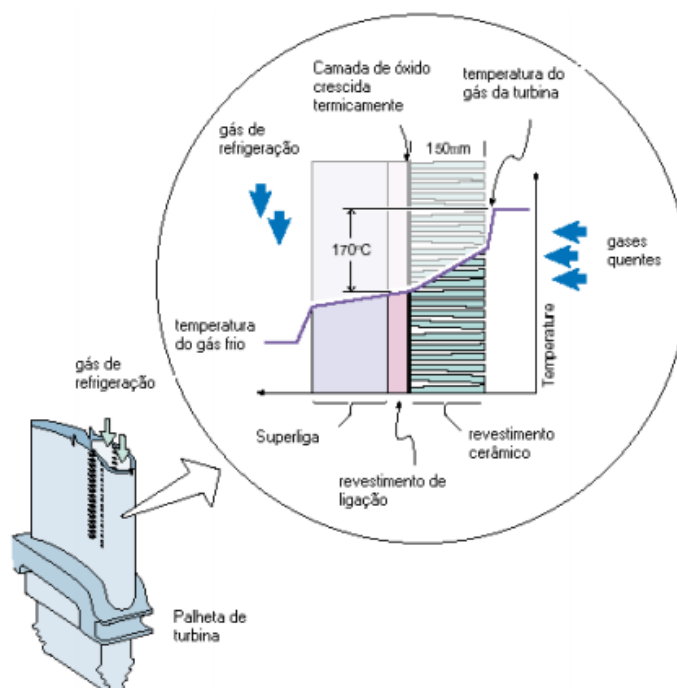


Figura 2 - Vista em corte de uma palheta e representação de um revestimento TBC e, o seu gradiente de temperatura.
Fonte: Almeida (2005).

Num olhar mais específico nos elementos básicos, tem-se primeiramente o substrato normalmente constituído de uma superliga de níquel ou cobalto, que são preferidas devido às suas características de elevada resistência mecânica a altas temperaturas, combinada com uma resistência elevada à corrosão e oxidação.

Depois deposita-se uma camada de ligação *Bond Coat*, que tem como base a liga MCrAlY onde M é Co (cobalto) ou Ni (níquel) juntamente com Cr (cromo), Al (alumínio) e Y (íttria) e também variações das composição de acordo com o substrato e as condições para as quais o componente revestido será utilizado. Algumas composições focam na proteção contra a corrosão a altas temperaturas e outras na oxidação a altas temperaturas. Os principais elementos presentes na camada de ligação são os seguintes: níquel, cobalto, alumínio, cromo, silício, ítrio, háfnio, platina, tântalo e titânio (ESKNER, 2004).

Entre a camada de ligação e a camada cerâmica existe a camada de óxido crescida TGO (*Thermally Grown Oxide*), ela é constituída normalmente de Al_2O_3 (óxido de alumínio) puro. A formação dessa camada pode ocorrer durante a operação desse componente, como durante a aplicação da camada cerâmica, ou também através de diferentes técnicas de oxidação do alumínio. Esta camada tem por função evitar a difusão do oxigênio para dentro do revestimento, diminuindo assim a oxidação do mesmo (ALMEIDA, 2005).

Por último tem-se a camada superior *Top Coat*, que é a camada de isolamento térmico do componente, composta por um material cerâmico. Esta camada deve apresentar algumas características, tais como: baixa condutividade térmica, alto ponto de fusão e um alto coeficiente de dilatação térmica; aproximando o coeficiente de dilatação do revestimento ao do coeficiente de dilatação do substrato. Sendo que essas cerâmicas, em sua maioria, são produzidas a partir de zircônia parcialmente estabilizada com ítria, cálcio, magnésia e cério (ALMEIDA, 2005).

A estabilização da zircônia é imprescindível, devido que durante o resfriamento ocorrem mudanças de fases, quando utilizada de maneira pura. Para a estabilização da zircônia o elemento ítria é o mais utilizado, devido à sua maior resistência a corrosão e a redução da condutividade térmica. Contudo segundo Aygun, (2008) deve-se ter como limite máximo de 10% de ítria, para não aumentar o risco de deslocamento do revestimento devido a tensão de cisalhamento. No que diz respeito as fases mostradas na Figura 3, a zircônia pura é estável na fase cúbica entre a temperatura de 2370°C e 2680°C (ponto de fusão). A ítria se apresenta com a fase

tetragonal com a temperatura na faixa de 1170 a 2370°C, e é estável na sua fase monoclinica abaixo de 1170°C. Com as mudanças de fase tem-se uma variação de 4 a 6% em seu volume durante o resfriamento, que leva ao deslocamento do mesmo (OLIVEIRA e DUARTE, 2013).

Como pode ser visto na Figura 3 a zircônia estabiliza a fase tetragonal, mas, em temperatura ambiente, se transforma em uma mistura de fases cúbica e monoclinica. Contudo, uma fase tetragonal metaestável t' é formada com um resfriamento rápido, essa fase não sofre transformação martensítica e é mais desejável em relação à fase tetragonal t . Sendo que a estabilidade da fase t' pode ainda ser elevada através de uma homogeneidade química, a utilização de pós mais uniformes e uma alta taxa de resfriamento, durante o processo de deposição do revestimento (AYGUN, 2008); (OLIVEIRA e DUARTE, 2013).

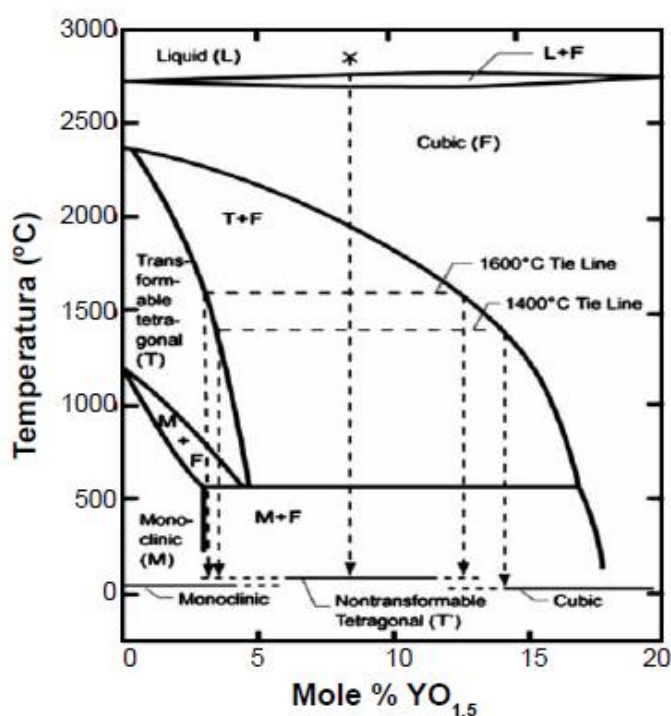


Figura 3 - Diagrama de fases da zircônia estabilizada com ítria.
Fonte: Oliveira e Duarte (2013).

As características microestruturais e químicas do revestimento TBC são sempre diretamente relacionadas com o seu modo de deposição, sendo alguns dos seus aspectos como porosidade, dureza e aderência, alcançados somente através de um processo de aspersão térmica particular.

O revestimento YSZ pode ser depositado pelo processo de deposição plasma em vácuo (VPS – *Vacuum Plasma Spray*) e a aspersão a plasma de baixa pressão (LPPS – *Low Pressure Plasma Spray*), que devido a aplicação em situações em vácuo ou com pressões baixas apresentam revestimentos livres de oxidação. A deposição física de vapor por feixe de elétrons EBPVD (*Electron Beam Physical Vapor Deposition*) formam revestimentos com microestrutura do tipo colunar (SCHULZ e SCHMÜCKER, 2000); (PAWLOWSKI, 2008).

As deposições de destaque devido a serem processos mais econômicos e de fácil aplicação são a aspersão térmica plasma ao ar (APS - *Air Plasma Spray*) a qual apresenta revestimentos com estrutura lamelar com ótimas características na aplicação de locais que exigem esforços térmicos e a aspersão por chama de alta velocidade (HVOF - *High Velocity Oxy Fuel*) que demonstra também o atributo de resistir a esforços térmicos e a resistência à oxidação (PAWLOWSKI, 2008).

2.3 TÉCNICAS DE ASPERSÃO TÉRMICA

A aspersão térmica abrange diversos processos de deposição de materiais, podendo ter características metálicas ou não metálicas, sobre uma superfície chamada de substrato, com a finalidade de obter novas propriedades para essa superfície. Essa técnica pode possuir diversas formas de alimentação e também diferentes fontes de aquecimento, sendo que como este trabalho está focado na aspersão térmica a plasma ao ar (Air Plasma Spray) APS e a aspersão por chama de alta velocidade (High Velocity Oxy Fuel) HVOF, serão explicadas estas duas técnicas de deposição. Basicamente na aspersão térmica o material a ser depositado é fundido ou aquecido, e então acelerado contra a superfície a ser aspergida, dessa forma, com o impacto o material é achatado e adere-se ao substrato gerando uma camada superficial (PAWLOWSKI, 2008).

2.3.1 Aspersão térmica HVOF (*High Velocity Oxy- Fuel*)

Neste processo de aspersão, uma chama é formada por um gás combustível e pelo oxigênio na saída de uma câmara de combustão do tipo Venturi, então os produtos dessa combustão se expandem através de um bocal para o pó ser

introduzido, também por meio de um Venturi, com um gás de arraste, normalmente posicionado de modo axial a chama (LIMA e TREVISAN, 2007).

O princípio de funcionamento do processo de aspersão térmica HVOF é mostrado na Figura 4.

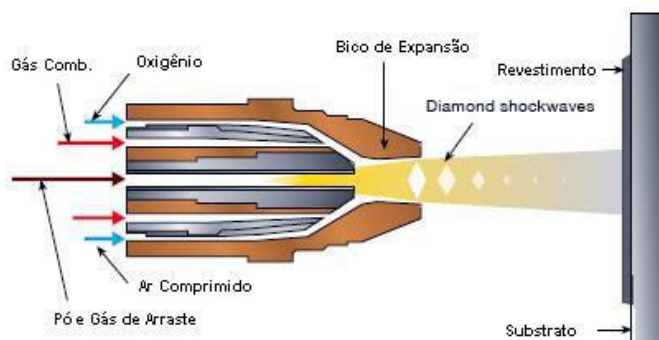


Figura 4 – Princípio de funcionamento de uma pistola HVOF.
 Fonte: adaptado de www.sulzermetco.com.

Esse processo de aspersão é amplamente utilizado para a deposição da camada metálica *Bond Coat*, devido principalmente a sua característica de elevada energia, dessa maneira as partículas aspergidas possuem um tempo reduzido de contato com a chama do processo. Apresentando um revestimento de maior qualidade e nível de tensões residuais inferior, devido a uma menor temperatura de deposição que resulta em uma grande aderência, porosidade extremamente reduzida, uma densidade elevada do revestimento e também uma menor degradação das características químicas do pó aspergido (PAWLOWSKI, 2008).

2.3.2 Aspersão térmica a plasma APS (*Air Plasma Spray*)

A aspersão térmica a plasma pode ser realizada nas mais diversas atmosferas, como, por exemplo: no vácuo, em atmosfera controlada, plasma por indução entre outras, contudo quando realizada ao ar ela é conhecida como APS. O processo APS funciona de maneira que um arco elétrico não transferido é mantido entre um bocal de constrição e um eletrodo de tungstênio coaxialmente alinhado. A zona central do plasma possui um gás inerte ionizado (na maioria das vezes sendo este gás argônio) envolvido por um gás de proteção (este sendo em sua grande maioria hélio, argônio, nitrogênio, hidrogênio e misturas destes) (LIMA E TREVISAN, 2007).

O conceito da deposição APS é apresentado na Figura 5.

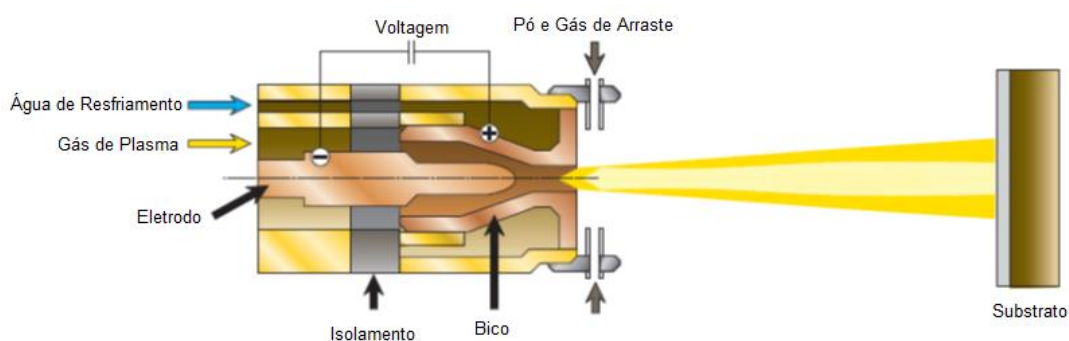


Figura 5 – Modelo genérico de um processo de aspersão térmica por plasma APS.
Fonte: Adaptado de <http://www.oerlikon.com>.

O processo APS é um dos principais métodos de deposição da camada cerâmica do revestimento TBC. No processo de deposição APS pode ocorrer a formação de micro trincas, sendo essa uma característica esperada em algumas aplicações, além de que com o impacto das partículas contra o substrato a estrutura pode incorporar entre 10 a 20% de porosidade, levando a uma redução na condutividade térmica e no módulo de elasticidade do revestimento cerâmico (ALMEIDA, 2005).

A presença de porosidade e microtrincas dos revestimentos YSZ depositados por APS, auxiliam na redução do módulo de elasticidade da cerâmica e redução da condutividade térmica, minimizando as tensões geradas durante a operação, tornando o revestimento cerâmico mais resistente às tensões geradas durante sua utilização. Contudo, torna o revestimento menos resistente, reduzindo a aderência entre as lamelas devido a menor área de contato (SOBHANVERDI e AKBARI, 2015).

2.4 DESGASTE POR EROSÃO

2.4.1 Modelos de erosão

Diversos são os modelos existentes e mecanismos propostos de erosão, contudo, fundamentalmente podem ser expostos dois modelos: a erosão por deformação plástica e a erosão por fratura frágil.

Quando se pensa em deformação plástica supõe-se um mecanismo dúctil de erosão, o qual é automaticamente associado a um material dúctil. Contudo esse mecanismo não é exclusividade do material dúctil, assim como a erosão por fratura frágil não é exclusividade de um material frágil. Para elucidar tem-se uma situação com um material frágil, onde não é possível iniciar as trincas pela energia cinética, pode apresentar a erosão de forma dúctil por deformação plástica (WENSINK e ELWENSPOEK, 2002).

2.4.1.1 Erosão por deformação plástica

A deformação plástica que governa os mecanismos dúcteis de desgaste erosivo é caracterizada pelo desgaste por microcorte e microssulcamento. Os estudos indicam que as maiores taxas de desgaste para este tipo de deformação são encontradas em ângulos baixos de incidência, entre 20° e 30° e cai drasticamente quando os ângulos são próximos do ângulo normal de incidência das partículas.

Este fenômeno é ilustrado na Figura 6, onde são apresentados, de forma básica, 3 tipos de danos, dano por sulcamento e os danos tipos I e II. Primeiramente tem-se o sulcamento (a), quando a partícula erosiva arredondada, sendo que no impacto o material, é deslocado para o lado ou para frente da partícula, e conforme as vizinhanças sejam atacadas, ocorre uma remoção do material que foi deformado.

Para os danos tipos I e II, inicialmente, define-se que são para quando as partículas erosivas são angulares, e então quando a partícula angular se move em direção à superfície tem-se o tipo I, sendo que ela penetra na superfície da amostra e provoca uma saliência vulnerável na superfície para os próximos ataques e, por fim, quando a partícula se move na direção oposta à superfície ocorre o tipo II que consiste de uma usinagem, com a partícula abrasiva removendo material da superfície.

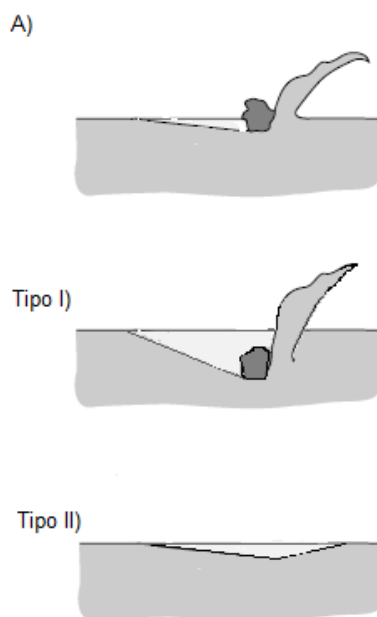


Figura 6 – Forma de deformação e destacamento de material caracterizado no mecanismo dúctil A) Sulcamento, Tipo I) e Tipo II).

Fonte: Adaptado de Stachowiak e Batchelor (2001).

2.4.1.2 Erosão por fratura frágil

No momento em que surge uma fratura frágil, devido ao impacto de uma partícula erosiva na superfície, ocorre a formação e intersecção de micro trincas na superfície e abaixo da superfície do material, causando um comportamento totalmente diferente de materiais que apresentam comportamento dúctil.

Dentre os diversos tipos de micro trincas existentes, dois merecem destaque, primeiramente as trincas Hertzianas, ilustrada na Figura 7. As trincas Hertziana ocorrem quando existem partículas arredondadas e macias, sendo esta uma trinca cônica formada na parte externa do círculo de contato da partícula (LIU, 2003).

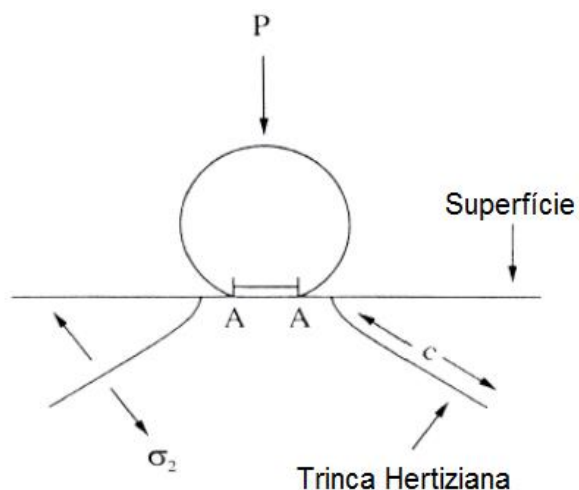


Figura 7 - Geometria da trinca cone Hertziana formada por um carregamento normal e uma esfera contra uma superfície plana de um material frágil.
Fonte: Adaptado de Liu (2003).

O outro tipo de trinca são as trincas laterais que ocorrem quando partículas duras e angulares são projetadas contra a superfície. Tais trincas surgem conforme ilustrado na Figura 8.

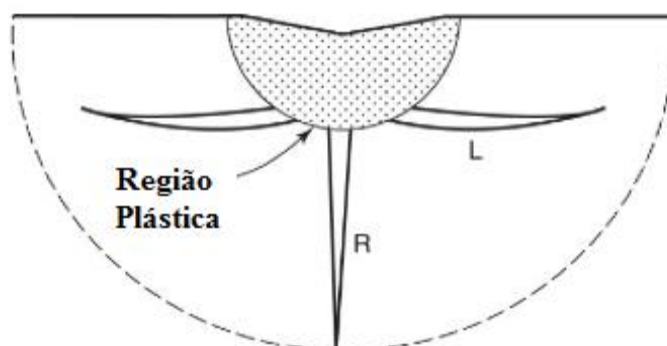


Figura 8- Diagrama demonstrando a formação de uma trinca lateral (L) em um material frágil devido à indentação pontual.
Fonte: Adaptado de Marinescu *et al.* (2015).

O processo de perda de massa ocorre devido à intersecção de trincas, que são resultantes da deformação plástica no ponto de impacto. A elevada tensão na superfície da amostra, até o ponto crítico, promove a formação de trincas medianas (R), então quando se tem o alívio da tensão elas se fecham, e dão origem às trincas laterais (L), que crescem até a superfície da amostra (LIU, 2003); (MARINESCU *et al.*, 2015).

2.4.2 Variáveis que influenciam no processo de erosão

Diversas variáveis influenciam o processo de erosão dos materiais, tais como: velocidade da partícula, ângulo de impacto, tamanho, forma, e dureza da partícula, taxa de fluxo da partícula, temperatura e oxidação (BALL, 1986); (FINNIE, 1995).

Segundo Vicenzi (2007) os principais fatores responsáveis pelo processo de erosão podem ser distribuídos em três diferentes grupos:

i) Operacionais: velocidade da partícula, ângulo de ataque, temperatura, número de partículas por unidade de área por unidade de tempo, corrosividade do meio;

ii) Propriedades das partículas erodentes: tipo de material, tamanho, forma, propriedades físicas e mecânicas;

iii) Propriedades da superfície: tipo de material, morfologia, nível de tensões, propriedades físicas e mecânicas, rugosidade, tamanho de grão e porosidade.

Velocidade da partícula

A velocidade da partícula é uma propriedade que detém uma grande influência no estudo da erosão. De acordo com Lindsley e Marder (1999) a taxa de erosão segue a Equação 1:

$$E' = k' \cdot V^{n'} \text{Equação (1)}$$

Sendo que E' é a taxa de desgaste erosivo em mg/min, V é a velocidade da partícula em m/s, k' é uma constante relacionada com o comportamento do substrato e n' é um expoente experimental relacionado com as propriedades do erodente (LINDSLEY e MARDER, 1999); (STACK e STOTT, 1993).

É possível constatar na pesquisa conduzida por Kleis e Kulu (2008), que com o aumento da velocidade das partículas acontece um aumento na perda de massa independentemente do processo de desgaste envolvido.

Ângulo de impacto

Ângulo de impacto é o ângulo formado entre o movimento da partícula e o plano da superfície desgastada sendo que é utilizado apenas o primeiro quadrante para valores absolutos (SUNDARARAJAN E ROY, 1997).

O ângulo de impacto influencia diretamente o tipo de mecanismo de remoção e a taxa de desgaste erosivo da amostra. Materiais dúcteis e frágeis apresentam comportamentos distintos de acordo com o ângulo de incidência das partículas erosivas, como é possível observar na Figura 9.

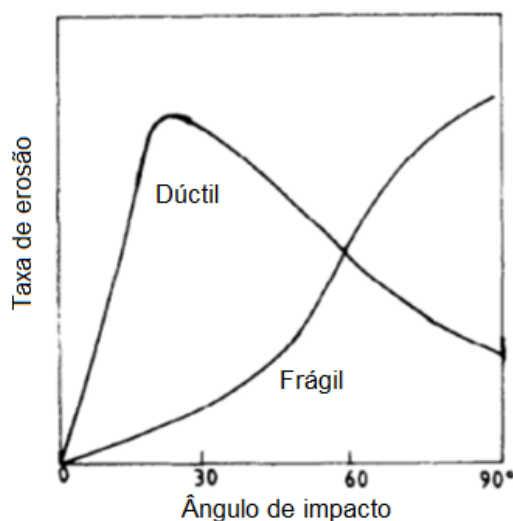


Figura 9 – Representação esquemática do efeito do ângulo de impacto na taxa de erosão de materiais dúctil e frágil.

Fonte: Adaptado de Sundararajan e Roy (1997).

Com o auxílio da Figura 9 é possível analisar que, quando o material possui um comportamento frágil, a máxima taxa de erosão acontece em ângulos de incidência próximos a 90°. Já no que diz respeito ao comportamento dúctil a máxima taxa de erosão acontece quando a incidência das partículas se encontra em ângulos menores (FINNIE, 1995).

O trabalho de Cernuschi, *et al.* (2011) mostra a influência direta do ângulo de impacto na taxa de erosão de diferentes revestimentos cerâmicos, ilustrada na Figura 10.

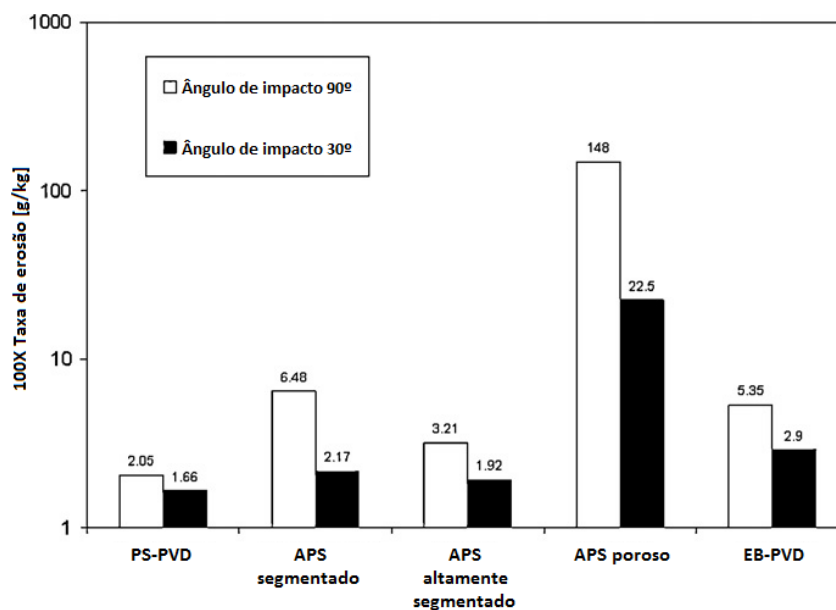


Figura 10 – Influência do ângulo de impacto em revestimentos.
Fonte: Adaptado de Cernuschi, et al. (2011).

O gráfico da Figura 10, observado para diferentes revestimentos YSZ, mostra a evolução da taxa de erosão de acordo com os diferentes ângulos de impacto de 90° e 30°. Sendo observado que para todos os revestimentos, independentemente do processo de deposição, o ângulo de impacto normal é sempre mais agressivo ao revestimento que o ângulo de impacto de 30°, sendo isto devido ao tipo de fratura característica dos revestimentos cerâmicos em questão.

Tamanho da partícula

O tamanho da partícula erosiva é um parâmetro fundamental no que diz respeito ao controle do processo erosivo. Segundo os autores Misra e Finnie (1981) e Hutchings (1987), o tamanho crítico para a partícula é de 100 µm, para os ensaios de erosão de materiais dúcteis. As partículas com tamanho abaixo de 100 µm apresentam menores taxas de erosão, enquanto que partículas maiores que 100 µm as mudanças nas taxas de erosão não são significativas.

Esse fenômeno se deve ao fato de que para partículas maiores que 100 µm forma-se uma camada adjunta à camada superficial do material com uma elevação do limite de escoamento em relação ao restante da amostra, formando uma camada mais resistente à erosão.

Já no caso de partículas menores que 100 μm , existe o fenômeno do “efeito de escala” (*size effect*). Esse efeito tem por definição que conforme o tamanho da partícula for reduzido, reduzindo a massa da mesma, menor será a taxa de erosão (HUTCHINGS, 1987).

Forma da partícula

A influência da forma ou geometria da partícula erodente é uma característica fundamental quando se diz respeito ao ensaio de erosão, Sundararajan e Roy (1997) destacaram a importância da angularidade da partícula para o desgaste erosivo, sendo definida em dois grupos: as partículas angulares e as partículas esféricas. Pois constataram que para as partículas angulares as taxas de erosão são mais elevadas em todos os ângulos de incidência quando comparados as partículas esféricas.

Dureza da partícula

Dentro das propriedades mecânicas do material da partícula erosiva, a dureza se destaca, pois afeta significativamente o desgaste erosivo.

Segundo Hutchings (1987) esta importância é nítida quando a dureza da partícula (H_a) é comparada com a dureza da superfície (H_s) a ser atacada, de maneira que, se a dureza da partícula for superior a 20% a dureza do material de superfície o regime de desgaste da superfície será severo.

Para exemplificar a dependência deste parâmetro para com a pesquisa, utiliza-se o gráfico da Figura 11, que expõe a erosão relativa de uma amostra de aço em função de diversos tipos de partículas erosivas, apresentando assim uma escala de durezas em relação a uma evolução da erosão.

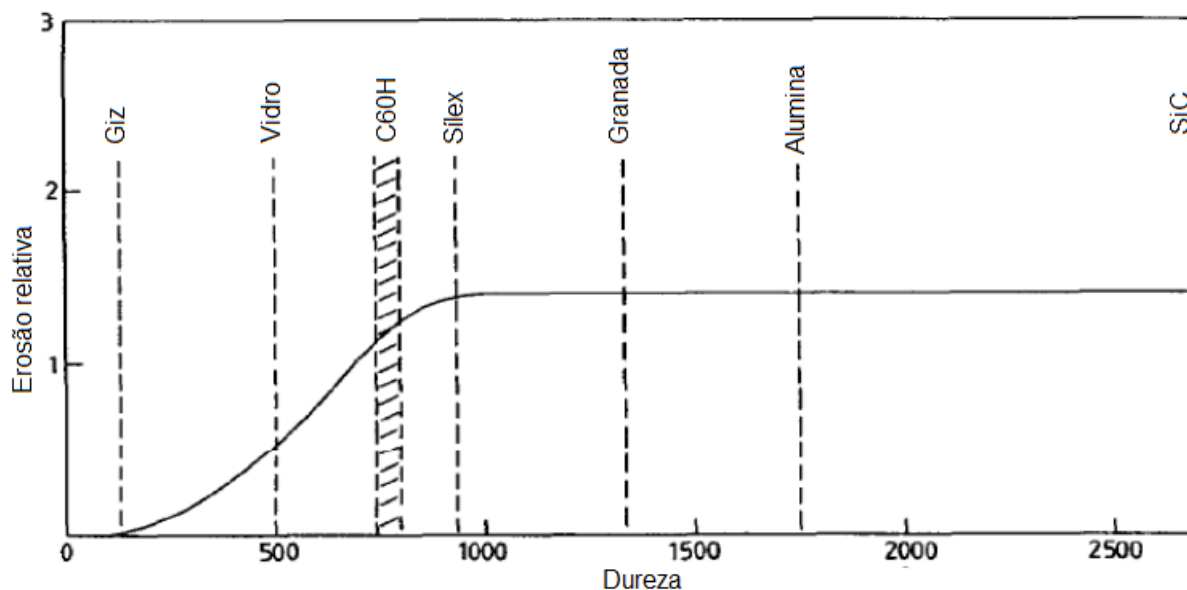


Figura 11 - Dependência da taxa de erosão em relação à dureza das partículas em um aço endurecido C60H.

Fonte: Adaptado de Hutchings (1987).

Como foi destacado anteriormente, é possível observar no gráfico da Figura 11 duas regiões de perda de massa características: a primeira região onde as partículas apresentam dureza inferior ou igual ao do material erodido, demonstrando um aumento gradual da erosão relativa com o aumento da dureza das partículas até um ponto de estagnação, a segunda região, quando a dureza das partículas é superior a dureza do material da amostra e a erosão relativa se torna uma constante.

Outro fator importante que pode ser correlacionado a dureza e que influencia nas taxas de erosão é a energia elástica durante o impacto, sendo que com uma maior dureza do erodente acaba sendo necessária uma maior energia para iniciar o processo de perda do material.

Taxa de fluxo da partícula

A taxa de fluxo de partículas apresenta diversos comportamentos relacionados. Alguns autores, como Anand *et al.* (1987), Stachowiak e Batchelor (2001) e Sundararajan e Roy (1997), demonstram que a taxa de erosão aumenta proporcionalmente com a taxa de fluxo das partículas até um valor limite. No momento em que existe um aumento excessivo da taxa de fluxo das partículas, então ocorre um decréscimo na taxa de erosão do material, devido principalmente ao ricocheteamento após o impacto, e consequente interação entre as partículas que

estão chegando ao material e desse modo a taxa de erosão decresce exponencialmente.

Temperatura

Quando é abordada a questão da temperatura na erosão, deve-se observar a sua influência nas propriedades mecânicas do material, ou seja, quando existe um aumento na temperatura do teste, algumas partículas ou a própria superfície, podem apresentar variação nas características do material. De forma que quando ocorre uma diminuição da dureza e resistência mecânica, tem-se o aumento da ductilidade do material podendo reduzir o desgaste do material (CALLISTER, 1999); (FIGUEIREDO, 2005).

Sundararajan e Roy (1997) abordaram a taxa de erosão em relação à temperatura, dividindo os materiais em 2 grupos, sendo que no primeiro grupo os materiais tem a tendência de inicialmente, com o aumento da temperatura, diminuir a taxa de erosão até que seja atingido um valor mínimo; a partir deste ponto aumentam a taxa de erosão como o aço 410 SS, conforme é possível observar na Figura 12.

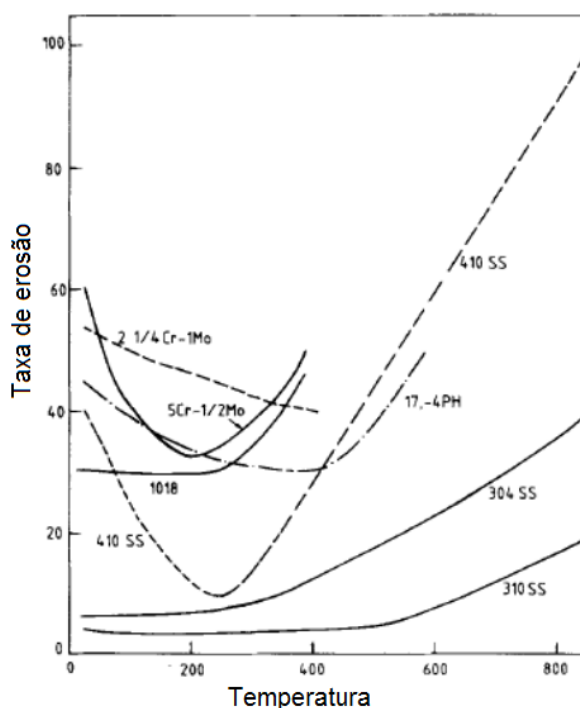


Figura 12 - Variação da taxa de erosão para algumas ligas.
Fonte: Adaptado de Sundararajan e Roy (1997).

O segundo grupo mostrado na Figura 12 abrange materiais que apresentam inicialmente uma independência da temperatura. Quando estes materiais atingem uma temperatura crítica, então ocorre um aumento da taxa de erosão logo que a temperatura aumenta. Sendo os mesmos representados pelas ligas de aço 304 SS, 310 SS, quando existem ângulos normais de impacto, o aço 1018 e o alumínio 1100.

Os experimentos realizados por Sundararajan e Roy (1997), consideram a erosão-corrosão dos materiais metálicos e os diferentes regimes pelos quais os materiais passam até a sua completa degradação. Todavia deve-se levar em consideração que algumas das vezes as partículas erosivas estão colidindo não com a superfície da amostra, e sim com a superfície oxidada, dessa maneira erodindo um óxido formado na oxidação primeiramente.

2.4.3 Comportamento tribológico de materiais cerâmicos

A utilização dos materiais cerâmicos como revestimento decorre principalmente de sua estabilidade química, resistência mecânica sob altas temperaturas e da sua elevada dureza. Neste sentido quando comparado com os materiais metálicos, as cerâmicas têm uma possibilidade muito menor de serem afetados por meio corrosivos e pela ação da temperatura.

Levy e Wang (1988), Wang *et al.* (1990), Zhavi e Schmitt Jr. (1981) e Alonso *et al.* (1991) observaram que revestimentos cerâmicos apresentam a maior perda de massa sob impacto normal (90°), enquanto os revestimentos metálicos e poliméricos, que também podem ser generalizados como revestimentos dúcteis, apresentam a maior perda de massa em ângulos em torno de 30°. Em ângulos rasos, os materiais cerâmicos são mais resistentes que materiais metálicos sob erosão (OKA *et al.*, 2009).

Wang (1996) conclui que sob elevadas temperaturas as cerâmicas, e cermets, apresentam um comportamento frágil com maiores perdas de material em ângulos de 90°. Materiais cerâmicos têm uma baixa resistência à fratura, dessa forma as trincas que ocorrem são facilmente propagadas através do material, e os impactos sucessivos acabam por erodir o material (CURKOVIĆ *et al.*, 2011).

Os cerâmicos tem uma propensão a sofrerem erosão devido à propagação e intersecção de trincas que são produzidas conforme o material é submetido à ação

das partículas erodentes, como é possível observar na Figura 13, onde são vistos esquematicamente os tipos de falhas que acontecem no material cerâmico.

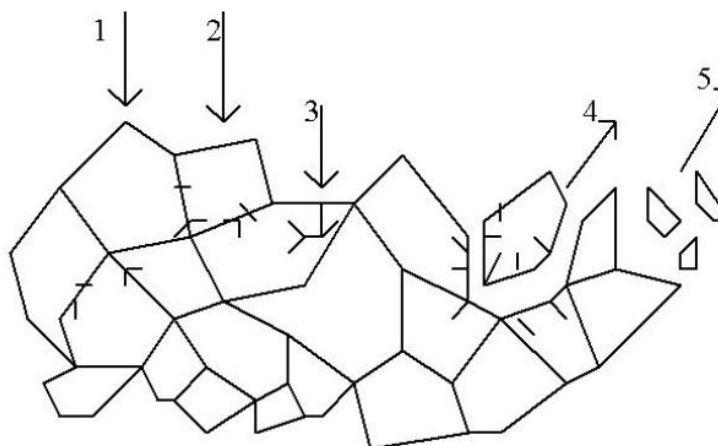


Figura 13 - Mecanismo de desgaste: 1 - Fadiga da fase intergranular, 2 - Micro trincas no contorno de grão, 3 - Indução de micro trincas no grão, 4 - Desprendimento do grão, 5 - Perda de fragmentos de grão.

Fonte: Madruga, Silveira e Bergmann *apud* Vicenzi (2007).

Há duas teorias que são utilizadas para explicar o fenômeno da fratura para os materiais cerâmicos: a primeira tem seu embasamento no mecanismo de fratura puramente elástica, e a outra no mecanismo de fratura elástico-plástico, variando de acordo com o tamanho das partículas erodentes utilizadas (KATO, 1990); (ZHOU e BAHADUR, 1993).

No que diz respeito à fratura puramente elástica, ela tem sua aplicação onde são produzidas trincas *Hertizianas*. O mecanismo de fratura elástico-plástico atua por meio de partículas pequenas que produzem trincas laterais e radiais.

De acordo com Krishnamurthy *et al.* (2012), a porosidade no revestimento influencia de 3 maneiras diferentes: em um primeiro momento diminui a resistência dos materiais e promove a formação de lascas que levam ao deterioramento do revestimento. A segunda maneira diz respeito à concavidade da superfície formada no vazio poroso fazendo com que seja alterado o ângulo de impacto neste local e, dessa forma, alterando a erosão dos materiais e por fim os poros acabam diminuindo a superfície de contato e atuando como concentradores de tensão. Assim a porosidade apresenta um comportamento de evolução diretamente proporcional a taxa de erosão.

2.4.4 Comportamento tribológico de revestimentos cerâmicos

Os revestimentos tem uma combinação de fatores excepcional, sendo estes, a alta dureza, a capacidade de resistir à elevadas temperaturas, a alta resistência a corrosão e a elevada resistência mecânica, com isso sua aplicação em casos que exigem uma alta resistência dos materiais é essencial (KLEIS e KULU, 2008).

Segundo Kleis e Kulu (2008), a dureza e a tenacidade à fratura são os parâmetros importantes que controlam a erosão de revestimentos, pois com o aumento da dureza tem-se um aumento da resistência a deformação plástica do revestimento e com uma elevação da tenacidade a fratura é aumentada a resistência do material em começar as trincas.

Diversos são os tratamentos para aumentar a dureza dos materiais tradicionais, como tratamentos térmicos, termoquímicos entre outros. Dessa forma aumentando a sua resistência a desgaste por pressão, alta velocidade e fadiga, assim com a dureza a tenacidade é importante como demonstrado na Figura 14 (KLEIS E KULU, 2008).

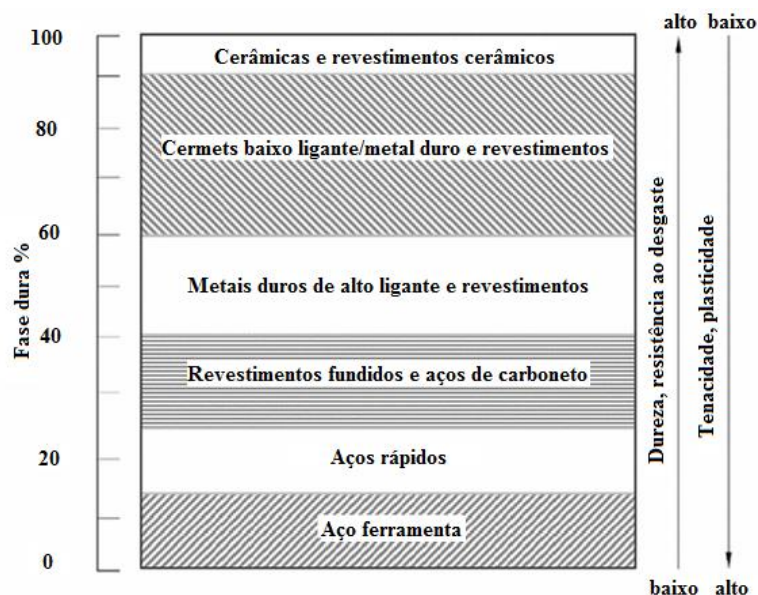


Figura 14 - Classificação da resistência ao desgaste de materiais dependendo do conteúdo volumétrico de fase dura.

Fonte: Adaptado de Kleis e Kulu (2008).

Como é possível constatar na Figura 14, segundo Kleis e Kulu (2008), a resistência ao desgaste é proporcional a dureza do material. Contudo, quando compara-se diferentes categorias de material é inversamente proporcional a

tenacidade e plasticidade do mesmo. Em grande parte das situações que requerem materiais resistentes ao desgaste são utilizados materiais produzidos pela metalurgia do pó, sendo eles os revestimentos cerâmicos e cermets e, os revestimentos de metal duro.

Em relação a erosão, os revestimentos cerâmicos e cermets são considerados suficientes para reduzir desgastes leves, como arranhões, quando expostos ao impacto de partículas com um baixo ângulo devido a sua alta dureza e rigidez. Quando diz respeito a ângulos de impacto altos, a superfície exposta ao desgaste será resistente a deformação repetitiva, até certo ponto (KLEIS E KULU, 2008).

Um fator importante para a resistência ao desgaste dos revestimentos cerâmicos é a porosidade. Esta característica é fundamental, juntamente com o processo de fabricação do revestimento, como é possível de observar nos gráficos das Figura 15 e Figura 16, provenientes da pesquisa de Cernuschi *et al.*(2016).

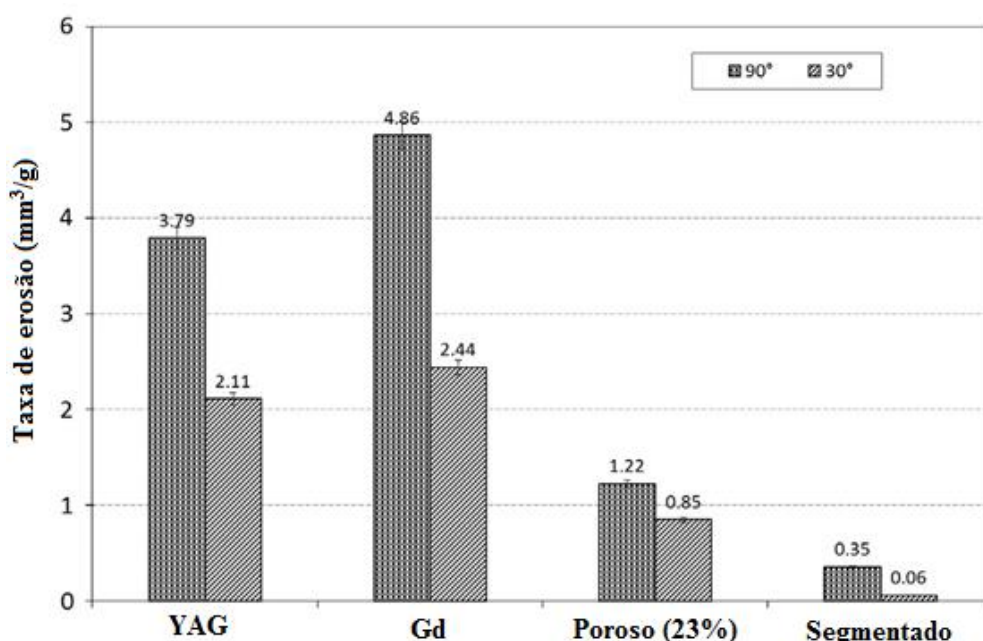


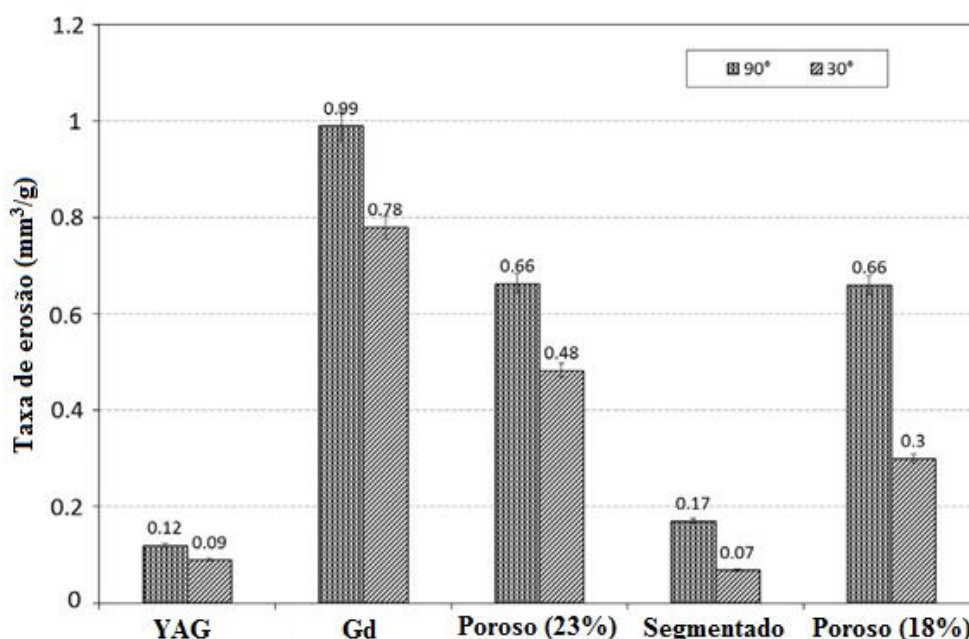
Figura 15 - Taxa de erosão a 1000°C com erodente alumina de 150 mesh e variação de dois ângulos de incidência: comparação entre o revestimento poroso, o revestimento segmentado e os revestimentos avançados YAG (Ítrio) e Gd (Gadolínio).

Fonte: Adaptado de Cernuschi *et al.* (2016).

No gráfico da Figura 15, pode-se observar o comparativo entre os revestimentos avançados com base em Ítrio, o revestimento avançado com Gadolínio, os revestimentos porosos e o revestimento segmentado em relação a dois ângulos de

impacto e com o erodente de 150 mesh. Dentro deste comparativo destaca-se a diferença entre os ângulos de ataque, sendo que independente do material cerâmico, o ataque mais agressivo se dá em ângulos normais.

Para ampliar o estudo relacionado a outros parâmetros de erosão, tem-se o gráfico da Figura 16, que apresenta a taxa de erosão a 1000°C com um erodente de 400 mesh.



**Figura 16 - Taxa de erosão a 1000°C com erodente alumina de 400 mesh e variação de dois ângulos de incidência: comparação entre o revestimento poroso, de baixa porosidade, o revestimento segmentado e os revestimentos avançados YAG (Ítrio) e Gd (Gadolínio).
Fonte: Adaptado de Cernuschi *et al.* (2016).**

No gráfico da Figura 16, é possível analisar o comparativo entre os revestimentos avançados com base em Ítrio e Gadolínio e os revestimentos altamente porosos, de baixa porosidade e densamente segmentado em relação a dois ângulos de impacto e o erodente de 400 mesh. Dentro deste comparativo observa-se a diferença entre os ângulos de ataque, sendo que novamente independente do material cerâmico o ataque mais agressivo se dá em ângulos normais.

Como foi constatado pelos gráficos das Figura 15 e Figura 16, e destacado anteriormente, alguns fatores tem suma importância na taxa de erosão para os revestimentos cerâmicos tais como: o tamanho das partículas erodentes, o ângulo de impacto e a porosidade. De forma a comparar especificamente outro fator importante para os revestimento a velocidade de impacto, tem-se o gráfico da Figura 17.

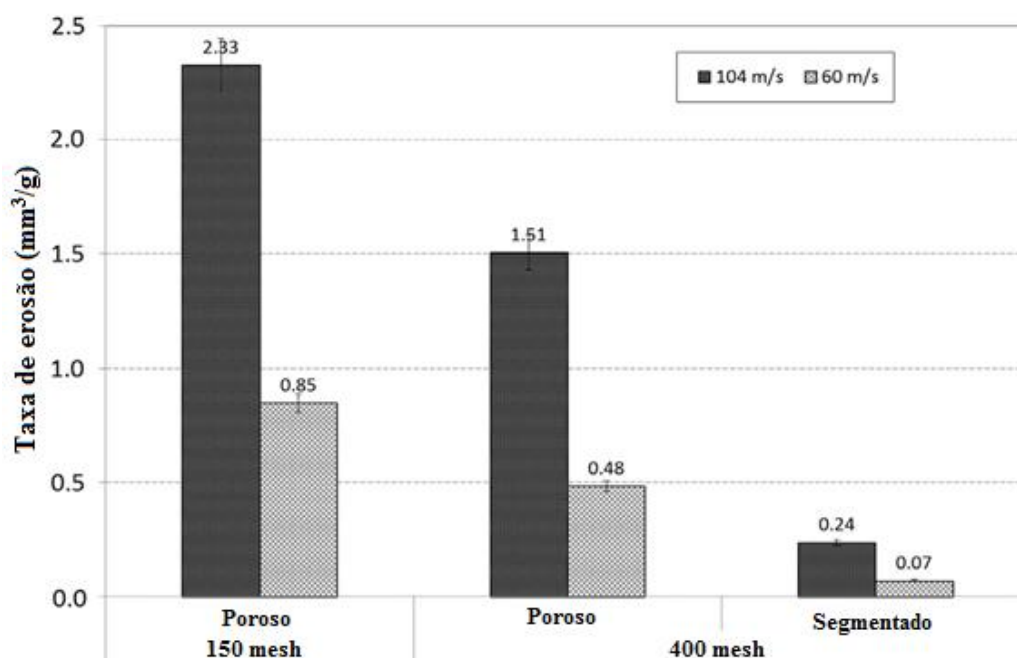
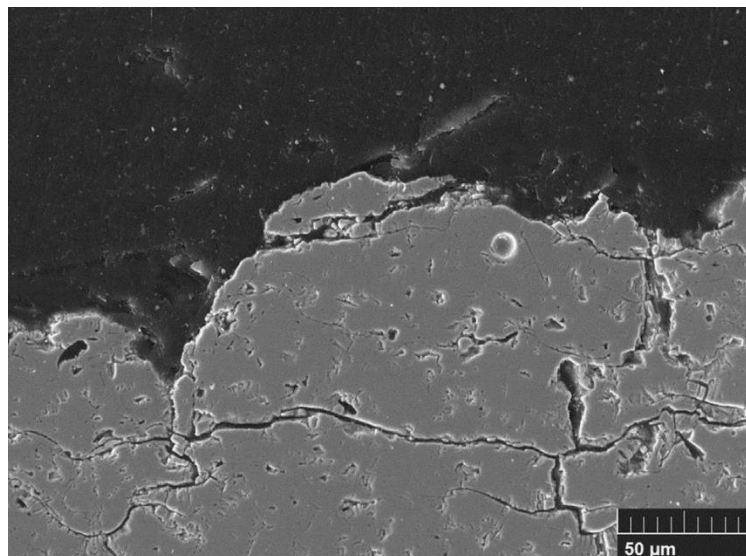


Figura 17 - Taxa de erosão em revestimentos porosos e segmentados com 1000°C e ângulo de incidência de 30°, variando a velocidade de impacto e o tamanho da partícula. Fonte: Adaptado de Cernuschi *et al.* (2016).

Baseando-se no gráfico da Figura 17, são confirmadas mais algumas características descritas na revisão, dentre elas, que o revestimento mais poroso possui a característica de ser mais suscetível a erosão que revestimentos com menor porosidade e também que revestimentos submetidos a maior velocidade de impacto possuem uma taxa de erosão maior. O fator tamanho das partículas erodentes também é explorado no respectivo gráfico, mostrando que com a redução do tamanho não foi observado um aumento da taxa de erosão, confirmando o que foi exposto na revisão.

O mecanismo de falha dos revestimentos cerâmicos aspergidos segue a literatura utilizando um termo para a região formada pela propagação e intersecção de trincas de “*wall brick like morphology*”, ou seja, morfologia de parede de tijolos, representada na Figura 18.



**Figura 18 - Revestimento TBC mostrando o detalhe, após o ensaio de erosão, da morfologia de “parede de tijolos”.
Fonte: Cernuschi *et al.* (2016).**

Observando-se a Figura 18 é possível constatar a morfologia de parede de tijolos, formada pela propagação e intersecção de trincas e dessa forma ocorre o processo de perda do revestimento pela remoção de lamelas simples ou múltiplas, pela propagação das trincas ao longo dos contornos de lamelas.

Os revestimentos TBC tem sido aplicados a muitos anos, com a visão de aumentar a performance das turbinas onde são aplicados os revestimentos. Além disso estão surgindo diversos revestimentos avançados como os revestimentos com base em Ítrio e Gadolínio de Cernuschi *et al.* (2016) e os revestimentos nanoestruturados como exposto em (Qu *et al.*, 2016) que são considerados os mais promissores materiais para TBC, devido as características de alto coeficiente de expansão, baixa condutividade térmica e a alta força de ligação, características que segundo os estudos tornam esses materiais ideais para as aplicações propostas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho é dividida em três etapas: primeiramente escolheu-se o material, em seguida realizou-se a preparação dos corpos de prova, seguido dos testes de erosão e na última etapa os respectivos ensaios de caracterização foram realizados, conforme o esquema da Figura 19.

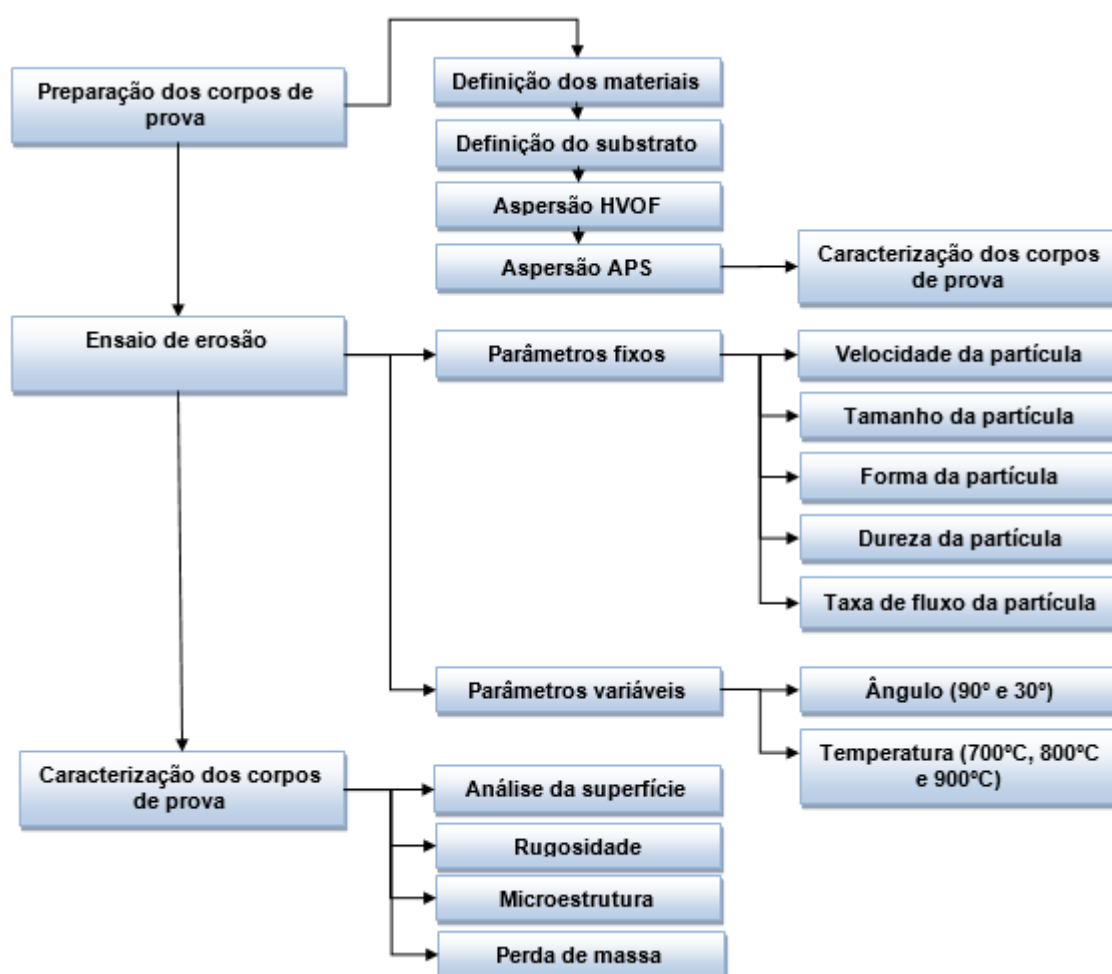


Figura 19 – Etapas da metodologia para alcançar os objetivos.
Fonte: Autoria própria.

Para que os objetivos específicos fossem alcançados foram utilizados dentro dos parâmetros de teste de erosão a variação de dois ângulos de incidência (30° e 90°) e a variação da temperatura de 700°, 800°C e 900°C do forno de ensaios, em um esquema de tréplicas, dessa forma foram utilizadas 27 amostras para o estudo. No que diz respeito aos parâmetros do revestimento, foram utilizados uma liga para o

substrato com o mesmo revestimento *Bond Coat* e dois diferentes revestimentos cerâmicos *Top Coat*, com diferente composição e morfologias.

3.1 DEFINIÇÃO DOS MATERIAIS E PARÂMETROS DE DEPOSIÇÃO

3.1.1 Composição química dos materiais utilizados

O substrato utilizado, foi a superliga de níquel *Hastelloy X*, cuja composição é apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1 – Composição química *Hastelloy X* em percentual de peso, obtida por EDS.
Fonte: Autoria própria.**

Ni	Cr	Al	Fe	Mo	Co	W	Mn	Si
46,7	22,3	0,4	19,3	9,2	1,0	1,2	0,4	0,5

Para o primeiro revestimento depositado, a camada *Bond Coat*, foi utilizado o revestimento com composição química descrita na Tabela 2.

**Tabela 2 – Composição química do revestimento *Bond Coat*.
Fonte: Autoria própria.**

Ni	Cr	Al	Y
65,5	22	11,2	1,2

Na deposição dos revestimentos cerâmicos *Top Coat* foram utilizadas duas ligas comerciais com as composições diferentes, as quais encontram-se na Tabela 3.

**Tabela 3 – Composição revestimentos *Top Coat*.
Fonte: <http://www.oerlikon.com>; <http://www.praxairsurfacetechologies.com>.**

Nomenclatura	Composição	Fabricação	Morfologia
YSZ 8Y	ZrO ₂ 8Y ₂ O ₃	Aglomerado e HOSP	Esferoidal vazia
YSZ 7Y 1,7Hf	ZrO ₂ 7Y ₂ O ₃ 1,7HfO ₂	Aglomerado e Sinterizado	Esferoidal
HOSP (Plasma densified hollow sphere) - Densificação a plasma de esfera vazia			

3.1.2 Preparação do substrato

O substrato foi recebido em forma de barra, sendo usinado para ficar com um diâmetro de 35 mm e então seccionado, com o auxílio da cortadeira de precisão da marca Buehler ISOMET 4000 com disco abrasivo, produzindo amostras com uma espessura de 12 mm. Posteriormente foram catalogadas e pesadas para garantir massas semelhantes.

Os corpos de provas foram primeiramente submetidos ao processo de jateamento abrasivo com o objetivo de produzir uma superfície rugosa (R_a (rugosidade aritmética) de $9 \mu\text{m}$ e R_y (rugosidade máxima) de $50 \mu\text{m}$) e também remover os contaminantes existentes em sua superfície. O processo de jateamento foi realizado com os seguintes parâmetros: distância de jateamento de 150 mm, pressão de 0,55 MPa e ângulo de incidência de 90° .

3.1.3 Deposição dos revestimentos

A primeira parte no processo de deposição dos revestimentos consiste em fixar os corpos de prova em um porta amostra, Figura 20, em frente a uma pistola de aplicação do revestimento, instalada em um torno horizontal, de forma a obter um revestimento uniforme e plano em todas as amostras.



Figura 20 – Aplicação do revestimento *Bond Coat* por HVOF.
Fonte: Autoria própria.

Os processos de deposição do material foram realizados com os equipamentos da empresa Revesteel localizada em Pinhais no estado do Paraná, sendo que os equipamentos utilizados foram: para o processo HVOF o equipamento da *Sulzer Metco* tipo DJP (Figura 21) e para o processo APS o equipamento da *Sulzer Metco*, com pistola modelo 9MB (Figura 22).



Figura 21 – Pistola HVOF DJ2700.
Fonte: <http://www.revesteel.com.br>.



Figura 22 - Pistola modelo 9MB.
Fonte: <http://www.oerlikon.com>.

Os parâmetros de deposição que foram utilizados para a camada *Bond Coat*, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de deposição *Bond Coat*.
Fonte: Autoria Própria.

HVOF		Tipo de Pistola	DJ 2700
Pressão de Oxigênio - bar	10,3	Pressão Gás de Arraste N2 - bar	150
Pressão de Propileno - bar	6,2	Distância de Deposição (mm)	200
Razão de combustível	1	Taxa de Alimentação do pó (g/min)	40
Distância entre passes (mm)	2,5	Velocidade da Pistola (mm/s)	300

Um parâmetro que também foi controlado, diz respeito a temperatura de pré-aquecimento das amostras antes da deposição da camada cerâmica. A realização do pré-aquecimento é ilustrado na Figura 23. Segundo Vanat (2015), com o aumento da temperatura de pré-aquecimento tem-se uma diminuição da porosidade, aumento da dureza e uma melhora da aderência do revestimento. Assim sendo a temperatura de pré-aquecimento foi padronizada em 320°C.



Figura 23 – Processo de pré-aquecimento.
Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros utilizados para a deposição dos revestimentos *Top Coat* estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros de Deposição Top Coat.
Fonte: Autoria própria.

Tipo de Pistola	9MB
Gás de Plasma	Ar/H2
Potência (kW)	32,25
Corrente (A)	430
Tensão (V)	75
Distância de Deposição (mm)	150

3.1.4 Preparação metalográfica das amostras

A preparação metalográfica iniciou-se pelo corte da seção transversal, realizado em uma cortadeira de precisão da marca Buehler ISOMET 4000 com disco HC15. Com o material cortado, as amostras foram embutidas em resina epóxi de cura a frio de forma a não comprometer os revestimentos cerâmicos utilizados.

Depois do embutimento as amostras passaram pelo processo de lixamento com discos de desbaste de 50 μ m e 8 μ m, seguido pelo processo de polimento com suspensão de diamante de 3 μ m e 0,25 μ m. Para todas as etapas utilizou-se uma Politriz automática da marca Buehler Vector com uma carga de 20 N. Para finalizar a preparação as amostras passaram pelo processo de polimento com a politriz vibratória Buehler Vibromet com sílica coloidal 0,04 μ m.

3.1.5 Avaliação da microestrutura e superfície

A caracterização da morfologia e dos mecanismos de perda de massa, assim como a análise microestrutural, foi realizada com o auxílio de um microscópio ótico Zeiss modelo A2.m, e um microscópio eletrônico de varredura VEGA 3LM da marca TESCAN, que se encontra no laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa. Foram realizadas imagens na região submetida à erosão, e fora da região submetida à erosão, com o intuito de avaliar o comportamento do revestimento quando submetido ao ensaio de erosão a quente.

Também foi realizada, com o auxílio do MEV, análises da superfície da amostra, na região do ataque erosivo e fora, de forma a entender os mecanismos que levam ao desgaste do revestimento e conseqüentemente a perda de massa.

3.1.6 Determinação da porosidade dos revestimentos

Para a análise da porosidade dos revestimentos, utilizou-se a análise segundo o método de teste B da norma ASTM E2109 *Standard test Method for determining area percentage porosity of thermal spray coatings*, com o microscópio eletrônico de varredura modelo VEGA 3LM da TESCAN em conjunto com o software de análise de imagens AxioVision SE 64, com as imagens obtidas alterando-se para tons de cinza e o ajuste de contraste, seguido do estabelecimento de um limiar do cerâmico e dos poros com o uso da ferramenta de análise do *software* e obtendo-se a porcentagem de poros em relação ao total do revestimento cerâmico.

3.1.7 Ensaio de difratograma por DRX

A análise das fases presentes na microestrutura dos revestimentos foi possível pela técnica da difração de raios X (DRX) com os parâmetros apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros da análise por DRX

Alvo	Cu K α
Tensão (kV)	40
Corrente (mA)	40
Faixa de varredura	20° a 80°
Velocidade da varredura	0,11°/s
Configuração da varredura	<i>Spinner</i>
Modo de varredura	Contínua

As fases foram analisadas a partir da superfície da amostra após o processo de deposição, sendo estas fases identificadas com as seguintes cartas de análise de picos de difração: a carta JCPDS (*Joint Committee on Powder Diffraction Standards*)

37-1484 que representa a fase monoclinica da zircônia estabilizada com ítria; a carta JCPDS 38-1437 que representa a fase tetragonal da zircônia estabilizada com ítria; e a carta JCPDS 30-1468 que representa a fase cúbica da zircônia estabilizada com ítria.

3.1.8 Determinação da dureza dos revestimentos

Para a caracterização da dureza Vickers, foi utilizado o equipamento Shimadzu HMV-G, que se encontra no laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa, segundo a norma ASTM E384 - *Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials*.

Foi empregada no ensaio uma carga de 300 gf (gramas-força), durante 15 segundos, com o indentador em forma da pirâmide de diamante Vickers com um ângulo de 136° entre as faces. As medições foram realizadas em linhas e colunas ao longo do revestimento, de modo a obter 12 diferentes pontos de medição na seção transversal em 4 regiões e 3 linhas de coleta de dados.

3.1.9 Determinação da aderência dos revestimentos

O ensaio de aderência foi realizado segundo a norma ASTM C-633-13 *Standard test method for adhesion or cohesion strength of thermal spray coatings*, que estabelece o ensaio destrutivo de aderência em revestimentos depositados por aspersão.

O ensaio consiste da tração de uma superfície depositada por aspersão colada a outra superfície preparada com jateamento, de modo a coletar a tensão de rompimento da união entre o revestimento e o substrato. O corpo de prova foi preparado de acordo com o ilustrado na Figura 24.

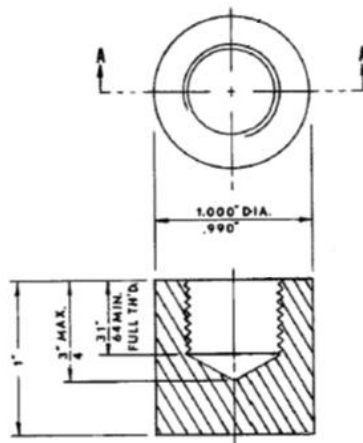


Figura 24 – Corpo de prova para o ensaio de aderência.
Fonte: Norma ASTM C-633.

Para a realização do ensaio de aderência há a necessidade de união de dois corpos de prova, um revestido e outro sem o revestimento, de mesmas dimensões, que são colados usando-se um adesivo de base epóxi (Araudite Hobby) e então, após completa cura desse adesivo (cerca de 12h), é montado num dispositivo de auto-alinhamento indicado na Figura 25.

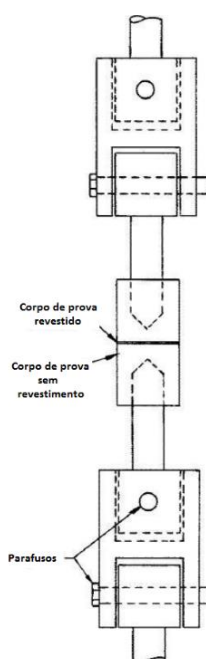


Figura 25 - Montagem dos corpos-de-prova no dispositivo de auto-alinhamento para ensaio de aderência.

Fonte: Norma ASTM C-633.

Finalizada a montagem dos corpos de prova no dispositivo de auto-alinhamento, tem início o ensaio de tração, conforme ilustrado na Figura 26. Os ensaios são realizados com uma velocidade de alongamento dos corpos entre 0,013mm/s e 0,021mm/s até que ocorra o rompimento do revestimento. Dessa forma então quando se tem a região correta de rompimento entre o revestimento e o substrato, tem-se a tensão máxima de resistência do revestimento.



**Figura 26 - Montagem do dispositivo de auto-alinhamento para ensaio de aderência no equipamento para tração.
Fonte: Autoria própria.**

3.1.10 Determinação da taxa de erosão volumétrica

Para a análise da perda de massa, realizou-se uma preparação preliminar de forma a retirar todas as impurezas da superfície da amostra, para isto o corpo de prova é limpo com álcool e então devidamente seco.

Após este procedimento o corpo de prova é pesado e posteriormente está pronto para a realização do ensaio erosivo. Após o ensaio erosivo o corpo de prova é devidamente limpo e seco novamente para aferir o peso, para a pesagem adotou-se uma balança analítica de precisão de 0,1 mg, obtendo assim a perda de massa, sendo que todas as medidas foram realizadas por meio de cinco aferições e o valor utilizado é a média.

Para que os resultados pudessem ser comparados com outros trabalhos, foi determinada a taxa de erosão apresentada na Equação 2, de acordo com citado por Vicenzi, (2007).

$$T = \frac{(m_i - m_f)}{\rho' \cdot m_e} \text{ Equação (2)}$$

Onde:

T=Taxa de erosão volumétrica ($\text{cm}^3_{\text{alvo}}/\text{g}_{\text{erodente}}$);

Mi= massa inicial da amostra (g);

mf= massa final da amostra (g);

me=massa de erodente utilizada (g);

ρ' =densidade do revestimento;

Para utilizar a Equação 2, é necessário a pesagem do erodente utilizado no ensaio de erosão, que segue o procedimento de pesagem do total de erodente antes e após o ensaio. A diferença entre as duas pesagens resulta na massa de erodente que foi utilizada.

3.1.11 Determinação da rugosidade

A rugosidade dos revestimentos depositados foi avaliada com o uso do perfilômetro ótico 3D da marca *Taylor Hobson CCI Lite*, com aumentos de 10x e 50x, o qual pertence ao laboratório de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Ponta Grossa.

Seguindo a norma ISO 25178 *geometrical product specifications*, que rege as especificações geométricas dos produtos, dentre os parâmetros de rugosidade, foram escolhidos o Sq, Sz e Sa, com o objetivo de caracterizar os diferentes tipos de rugosidades, possibilitando a avaliação dos mecanismos de desgaste do material.

O parâmetro Sq, que segundo a norma ISO 25178 é o desvio médio quadrático do perfil avaliado (A), é calculado segundo a Equação 3 e foi utilizado com o objetivo de identificar desvios significativos nas características da superfície do revestimento.

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A Z^2(x, y) dx dy} \text{ Equação (3)}$$

O parâmetro S_z é a altura máxima do perfil, consiste da soma da altura máxima do maior pico e da maior profundidade do menor vale dentro da área definida, conforme mostrado na Figura 27.

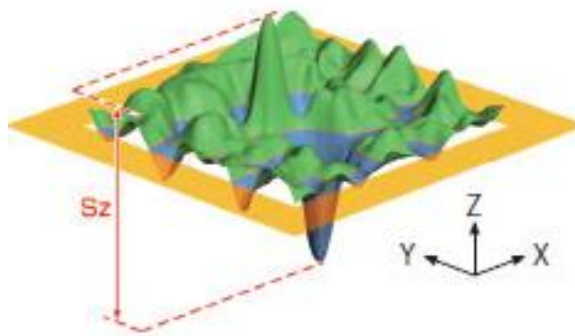


Figura 27 – Parâmetro de rugosidade S_z .
Fonte: <http://www.olympus-ims.com/>.

O parâmetro S_a é o desvio aritmético médio do perfil avaliado (A), calculado segundo a Equação 4, e que tem como objetivo avaliar os desvios dos picos e vales em relação a superfície.

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |Z(x, y)| dx dy \text{ Equação (4)}$$

3.2 ENSAIO DE EROSÃO A QUENTE

3.2.1 Equipamento utilizado para ensaio de erosão a quente

Neste trabalho, utilizou-se um equipamento de ensaio por erosão segundo a norma ASTM G-76 *Standard test Method for conducting erosion tests by solid particle impingement using gas jets*, que tem como desenho esquemático representado na Figura 28.

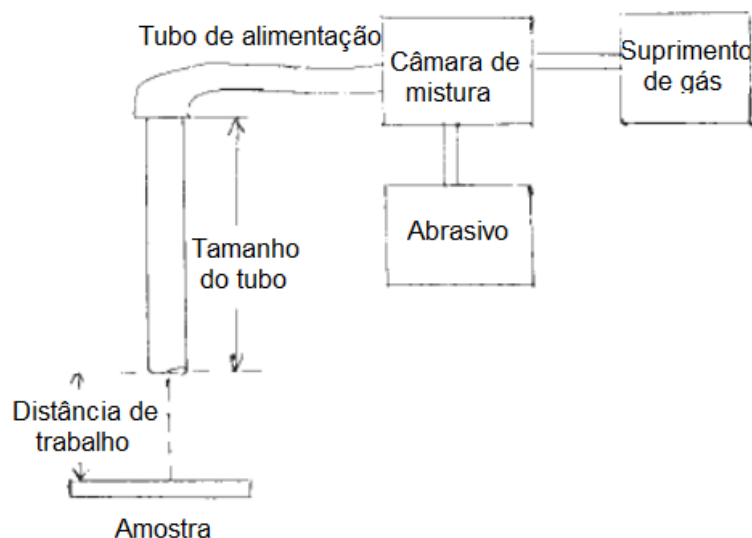


Figura 28 – Desenho esquemático de um equipamento de erosão por partículas sólidas.
Fonte: Adaptado de ASTM G-76 05.

O equipamento utilizado para o ensaio de erosão a quente foi o do LACER (Laboratório de Materiais Cerâmicos) da Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, que segue a norma ASTM G-76 e é observado na Figura 29.



Figura 29 – Equipamento de Erosão a Quente.
Fonte: Autoria própria.

O funcionamento do equipamento segue um esquema estabelecido por Vicenzi (2007). Observa-se na Figura 30 o sistema de pré-aquecimento do ar (1), esse sistema tem por função obter um ar comprimido seco e aquecido, para então serem adicionadas as partículas erosivas, por meio de um Sistema Venturi-acelerador de partículas (3). Esta seção tem como objetivo a mistura do ar aquecido com as partículas erosivas e a aceleração destas contra o material alvo que se encontra dentro de (4) que é o forno de ensaio onde ocorre o ensaio erosivo.

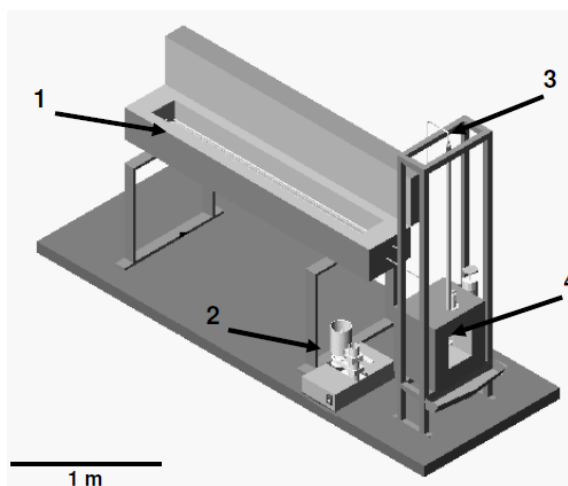


Figura 30 - Equipamento para ensaios de desgaste erosivo subdividido em partes principais: (1) sistema de pré-aquecimento do ar, (2) sistema de alimentação de partículas erodentes; (3) Sistema Venturi-acelerador de partículas, e; (4) Forno para os ensaios.
Fonte: Vicenzi, 2007.

A amostra se localiza em um porta amostras, Figura 31, onde é fixado o corpo de prova, sendo a temperatura avaliada por meio de um termopar. O ângulo de ataque é definido através do giro do corpo de prova em relação à projeção das partículas. Na Figura 32 visualiza-se um ensaio erosivo com o ângulo de 30° .



Figura 31 – Porta amostras detalhe termopar
Fonte: Autoria própria.



**Figura 32 – Porta amostras detalhe ângulo de impacto na amostra.
Fonte: Autoria própria.**

3.2.2 Parâmetros fixos de ensaio

O erodente escolhido foi a alumina eletrofundida angular com 97 μm de diâmetro, pois este formato seria o mais crítico para a determinação da resistência à erosão. O diâmetro foi estabelecido através dos estudos de Misra e Finnie (1981) Hutchings (1987) que determinam como tamanho crítico para o teste erosivo a partícula de 100 μm e a forma angular segundo de Sundararajan e Roy (1997).

O tempo de ensaio foi definido segundo pré-testes que foram realizados com o intuito de determinar qual seria o tempo de ensaio ideal para a observação dos fenômenos de desgaste. De modo a não ser um processo demasiadamente agressivo, desgastando o revestimento *Bond Coat*, e nem pouco agressivo, onde as características de perda de massa não pudessem ser observadas. Dessa maneira foi definido o tempo padrão de 10 minutos de permanência no forno, para estabilização da temperatura da peça, seguida de 2 minutos de ensaio de erosão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS REVESTIMENTOS *TOP COAT* YSZ

4.1.1 Revestimento YSZ 7Y 1,7Hf

A morfologia do pó YSZ 7Y1,7Hf é mostrada na Figura 33, observa-se que a morfologia do pó, obtido por aglomeração e sinterização, apresenta uma característica refinada e irregular. A estrutura do revestimento TBC depositado pode ser observada por microscopia ótica na Figura 34.

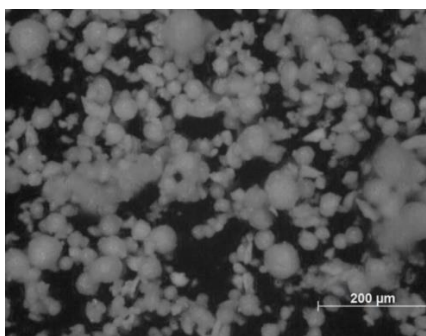


Figura 33 – Morfologia do pó YSZ 7Y1,7Hf.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 34, observa-se as dimensões da camada *Top Coat*, que fornece o isolamento térmico, da camada *Bond Coat*, que fornece a proteção contra oxidação e corrosão em elevadas temperaturas e o substrato a base de níquel que tem resistência mecânica a elevadas temperaturas.

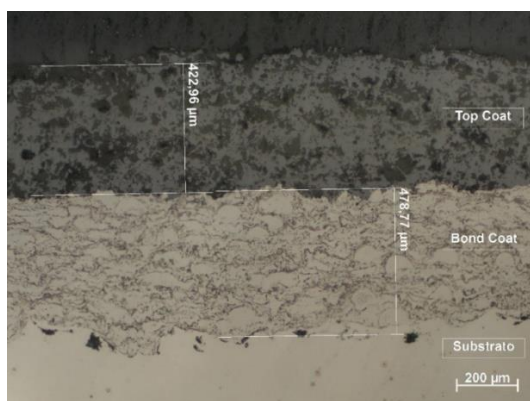
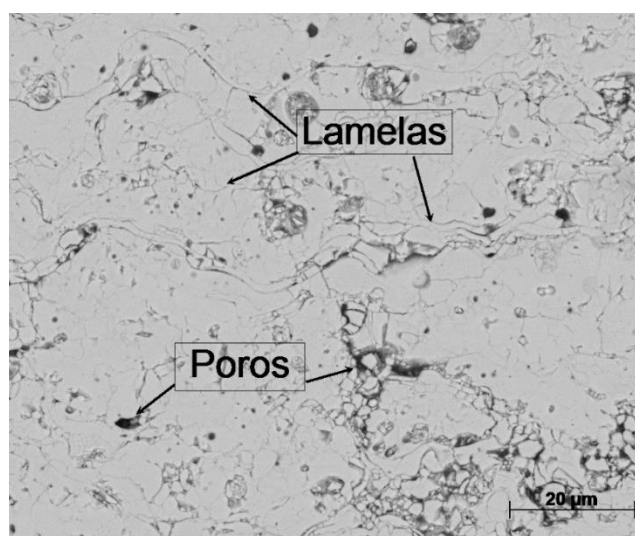


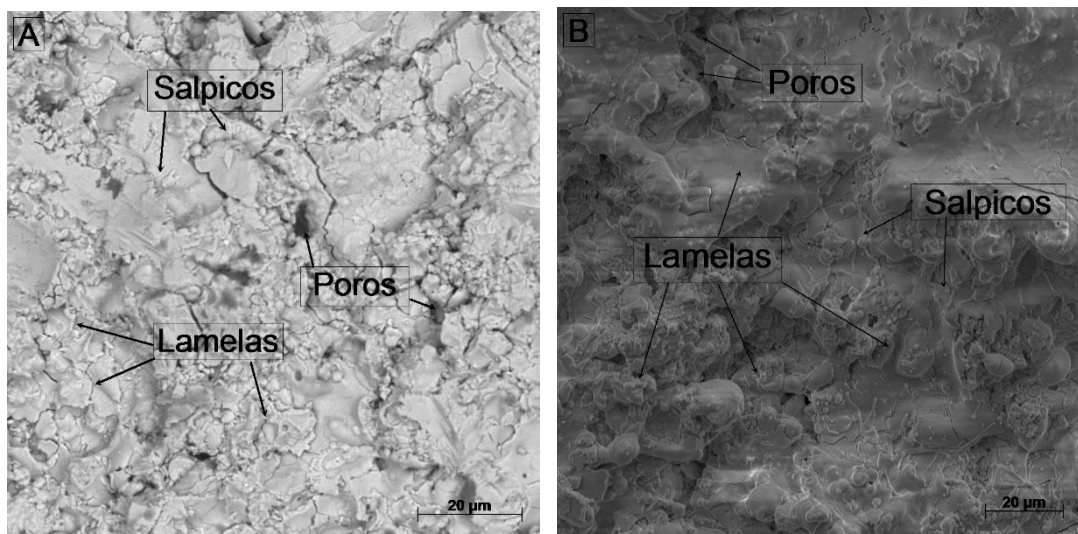
Figura 34 – Seção transversal do revestimento YSZ 7Y1,7Hf.
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 35, tem-se a microestrutura do revestimento YSZ 7Y1,7Hf com uma maior ampliação, na qual algumas características específicas do revestimento cerâmico são apresentadas, como a presença das lamelas e dos poros, que são vazios que ocorrem entre as lamelas depositadas, estes atributos dão ao revestimento a sua resistência a temperaturas elevadas mas também acabam interferindo na tolerância a deformação do revestimento, ainda é possível observar algumas micro trincas possivelmente decorrentes das tensões residuais do processo de deposição.



**Figura 35 – Maior ampliação da seção transversal do revestimento YSZ 7Y1,7Hf.
Fonte: Autoria própria.**

Observa-se a partir de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, com o uso de dois diferentes detectores, BSE (retro espalhamento de elétrons) na Figura 36 (a) e SE (elétrons secundários) na Figura 36 (b), a superfície do revestimento YSZ 7Y1,7Hf.



**Figura 36 – Imagem BSE (a) e SE (b) da superfície do revestimento YSZ 7Y1,7Hf.
Fonte: Autoria própria.**

A superfície do revestimento YSZ 7Y1,7Hf, mostrada nas imagens da Figura 36, apresenta algumas características como a presença de pequenas partículas que podem ser salpicos originados da fragmentação de partículas maiores, ou pequenas partículas que se deformam ao serem depositadas no revestimento devido ao rápido resfriamento e impedindo o escoamento uniforme da partícula. Observa-se também a presença de lamelas típicas de revestimentos aspergidos de formato regular e arredondado, além dos poros abertos (BIANCHI *et al.*, 1994).

Por meio das técnicas apresentadas nos materiais e métodos, a porosidade do revestimento YSZ 7Y1,7Hf foi medida e teve-se o resultado de 8,0%. Outro fator importante para o estudo do revestimento cerâmico diz respeito a dureza, sendo estes valores expostos na Figura 37.

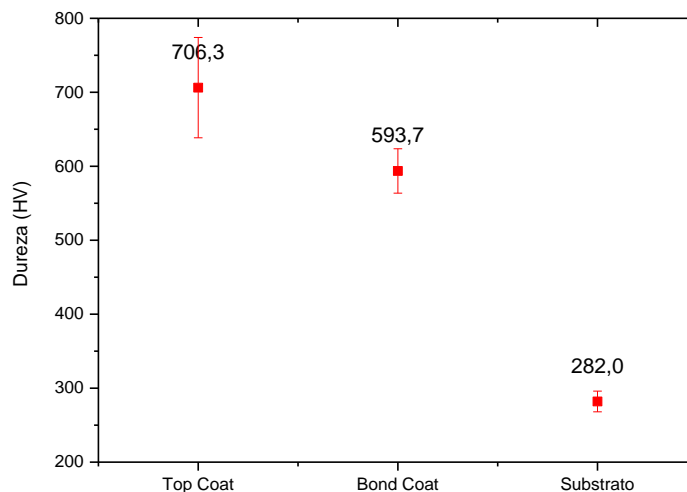


Figura 37- Dureza do revestimento YSZ 7Y1,7Hf.
Fonte: Autoria própria.

Com a Figura 37, observa-se uma variação dos valores de dureza, sendo isto possivelmente devido a porosidade do revestimento. Dessa forma tem-se a variação conforme a região atingida pela indentação, sendo a média dos valores de 706,3 HV, para a região de interesse, o revestimento *Top Coat*.

Na caracterização do revestimento pelo teste de aderência, o revestimento YSZ 7Y 1,7Hf apresentou uma aderência de $17 \pm 0,84$ MPa.

Conforme constatado por DRX pela Figura 38, o revestimento YSZ 7Y1,7Hf apresentou a formação de uma microestrutura tetragonal, monoclínica e cúbica, apresentada na análise das imagens de difratograma nas regiões de interesse.

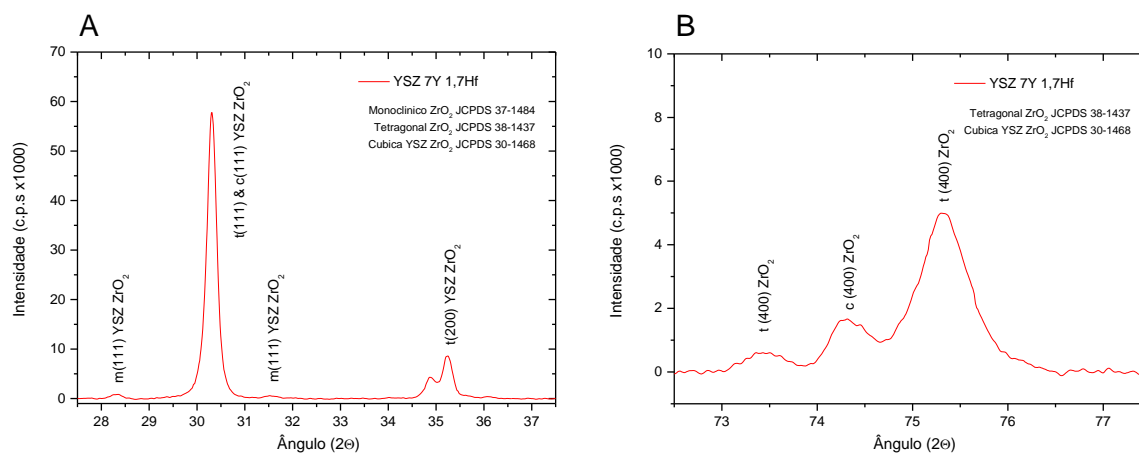
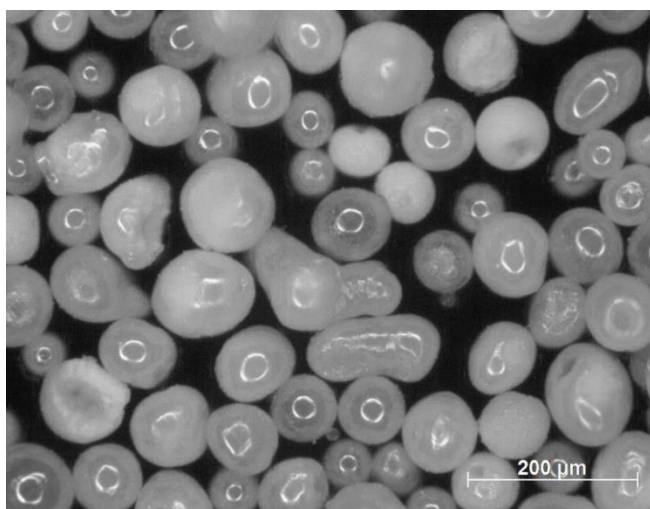


Figura 38 – DRX do revestimento YSZ 7Y1,7Hf.
Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 38 (a) observa-se que o revestimento apresenta as fases monoclinica (111) da zircônia estabilizada com ítria, pela presença dos picos em 28,5 e 31,5, que segundo Ibégazene (1995) é decorrente da presença de Háfnio. A fase tetragonal (111) da zircônia estabilizada com ítria ocorre em um mesmo ângulo que o plano (111) da fase cúbica, porém a presença de fase cúbica não é esperada em grande quantidade devido à adição de ítria, segundo Tsipas (2010) e Ibégazene (1995). Na Figura 38 (b), observa-se os picos das fase cúbica (400) e tetragonal (400) da zircônia estabilizada com ítria.

4.1.2 Revestimento YSZ 8Y

Observa-se na Figura 39 a morfologia do pó da liga YSZ 8Y do tipo esferoidal vazia, apresenta-se uma morfologia esférica contendo um orifício em seu interior, resultado do processo de fabricação conhecido como HOSP (*hollow spheres*) em português esferas vazias, esta característica melhora a fluidez do pó, quando comparado ao pó do revestimento YSZ 7Y 1,7Hf. Observa-se também que a granulometria do pó é maior que da liga YSZ 7Y 1,7Hf.



**Figura 39 – Morfologia do pó YSZ 8Y.
Fonte: Autoria própria.**

Para a caracterização do material, após a deposição do revestimento, em um primeiro momento, é mostrada a seção transversal na Figura 40, por meio da microscopia ótica, sendo caracterizado as dimensões das camadas do revestimento

YSZ 8Y, é observado que este revestimento apresenta a camada cerâmica maior que no revestimento YSZ 7Y1,7Hf.

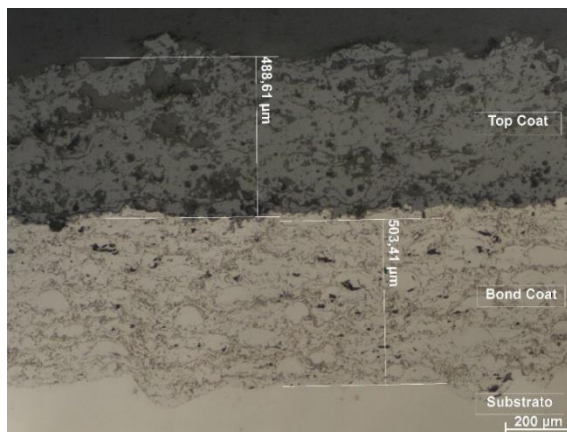


Figura 40 – Seção transversal do revestimento YSZ 8Y.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 41 apresenta a microestrutura do revestimento YSZ 8Y da seção transversal com uma maior ampliação, as características são mostradas, com as lamela, os poros e também algumas micro trincas advindas das tensões residuais do processo de deposição. Comparativamente o revestimento YSZ 8Y possui uma espessura das lamelas maior, assim como uma maior porosidade que o revestimento YSZ 7Y1,7Hf.

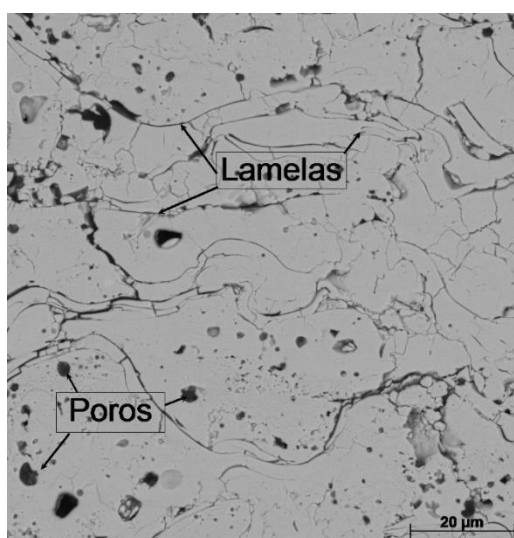
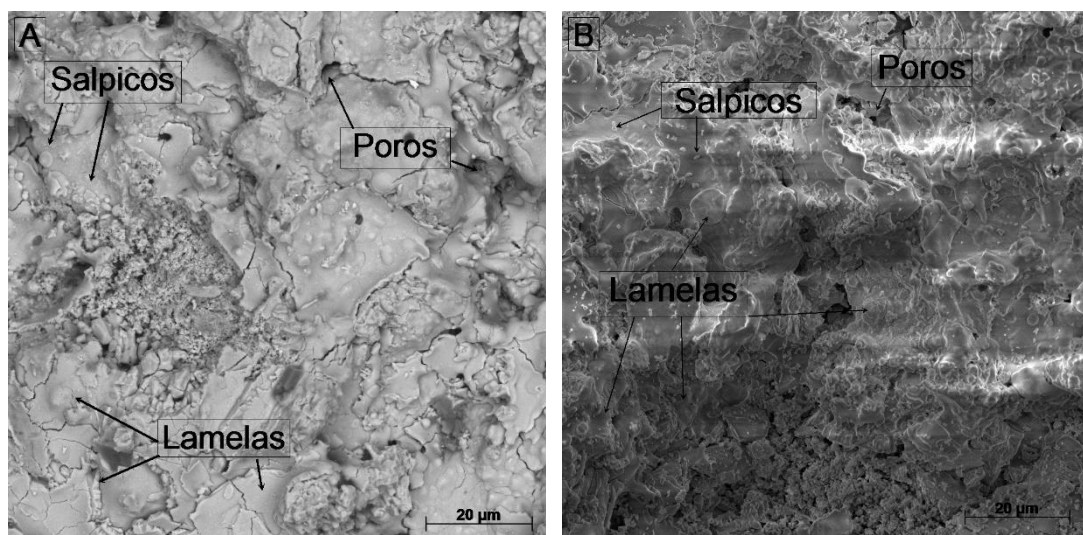


Figura 41 – Maior ampliação da seção transversal do revestimento YSZ 8Y.
Fonte: Autoria própria.

Por microscopia eletrônica de varredura, observa-se a superfície do revestimento YSZ 8Y com o uso de dois diferentes detectores, BSE (retro espalhamento de elétrons) na Figura 42 (a) e SE (elétrons secundários) na Figura 42 (b).



**Figura 42 – Imagem BSE (a) e SE (b) da superfície do revestimento YSZ 8Y.
Fonte: Autoria própria.**

Na Figura 42 são destacadas certas características superficiais do revestimento cerâmico que são os salpicos, lamelas e os poros. Comparando com o revestimento YSZ 7Y1,7Hf observa-se uma maior quantidade de salpicos e porosidades abertas.

A partir de imagens obtidas por MEV determinou-se uma porosidade de 12,1% para o revestimento YSZ 8Y, sendo esta uma porosidade maior que a do revestimento YSZ 7Y 1,7Hf conforme constatado na Figura 41, indicando provavelmente uma menor coesão entre as lamelas e interfaces das camadas. Esta característica leva o revestimento a ser mais facilmente sujeito ao fenômeno da erosão (RAMACHANDRAN *et al.*, 2013); (VANAT, 2015); (SCHMITT *et al.*, 2016) E (SOBHANVERDI E AKBARI, 2015).

A dureza do revestimento cerâmico YSZ 8Y é exposta na Figura 43.

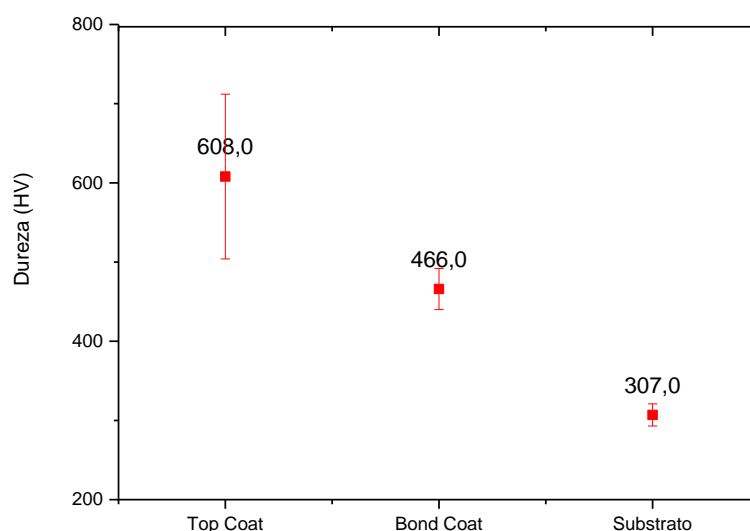


Figura 43 – Dureza do revestimento YSZ 8Y.
Fonte: Autoria própria.

Com a Figura 43 observa-se que os valores de dureza são menores no revestimento YSZ 8Y, tendo uma média de 608 HV para a região de interesse *Top Coat*. Também destaca-se uma maior dureza no *Bond Coat* com YSZ 7Y 1,7Hf, provavelmente decorrente do maior número de passes de deposição necessário para a deposição deste *Top Coat*.

A aderência do revestimento YSZ 8Y determinado pela norma ASTM C633 é de $8,9 \pm 1,0$ MPa, observa-se neste caso que o revestimento YSZ 8Y apresentou uma aderência inferior ao revestimento YSZ 7Y 1,7Hf.

Para terminar a caracterização do revestimento YSZ 8Y tem-se a análise do revestimento por meio da Difração de Raios-x (DRX) na Figura 44 (a) e (b), mostrando as regiões de interesse e as fases presentes no revestimento.

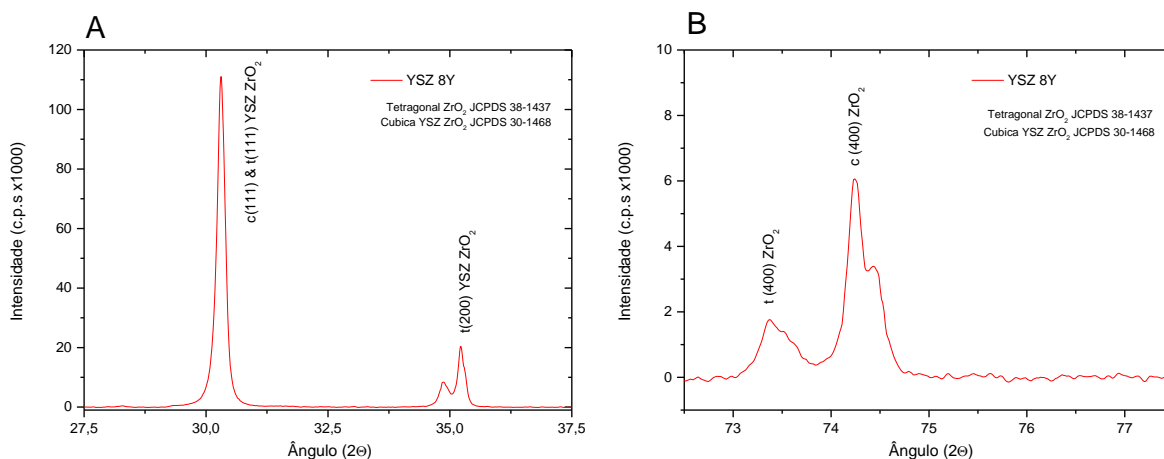


Figura 44 – DRX do revestimento YSZ 8Y.
Fonte: Autoria própria.

Com base na Figura 44 (a), observa-se a formação de uma microestrutura totalmente tetragonal, diferentemente do revestimento YSZ 7Y 1,7Hf onde não obteve-se a fase monoclinica, confirmando com o que foi proposto por Ibégazene (1995), que estabelece esse comportamento decorrente da presença de Háfnio. O pico mostrado no revestimento YSZ 7Y 1,7Hf que é tetragonal (111), também pode ser considerada cúbica (111) da zircônia estabilizada com ítria, segundo Tsipas (2010) e Ibégazene (1995). Observou-se o pico característico da fase cúbica (400) na Figura 44 (b), entre 73 e 75° e também a formação da fase tetragonal (400), diferentemente do revestimento YSZ 7Y 1,7Hf que apresentava dois picos da fase tetragonal (400) e também um pico da fase cúbica (400).

4.2 AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À EROÇÃO DOS REVESTIMENTOS YSZ

Nesta seção será avaliada a influência da utilização de duas diferentes ligas comerciais na resistência à erosão e mecanismos de desgaste sob diferentes temperaturas de ensaio.

4.2.1 Comportamento da perda de massa para os diferentes revestimentos no ensaio de erosão à quente

Na Figura 45, são visualizadas as taxas de erosão obtidas dos revestimentos depositados com as duas diferentes ligas comerciais, segundo as diferentes temperaturas de ensaio.

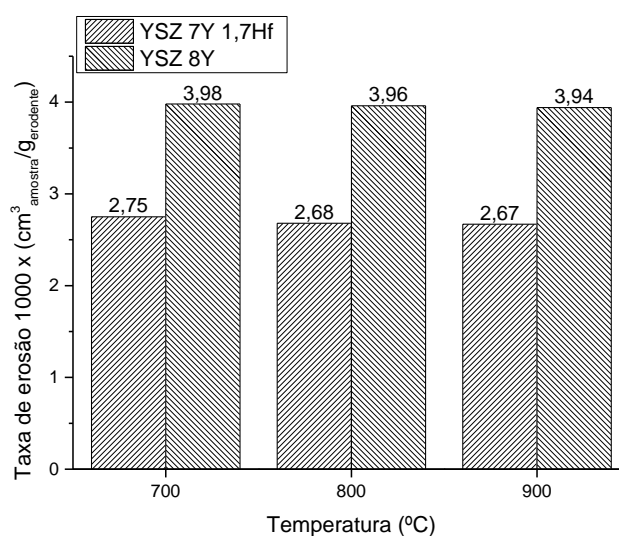


Figura 45 – Evolução da perda de massa no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com as variações da temperatura a 90° para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf e YSZ 8Y.

Fonte: Autoria própria.

Com a análise do gráfico da Figura 45, observou-se que o revestimento YSZ 7Y1,7Hf do tipo aglomerada e sinterizada apresentou uma melhor performance que o revestimento YSZ 8Y do tipo esferas vazias, pois esta última apresentou maiores taxas de erosão em todas as temperaturas de ensaio utilizadas, ou seja, foi necessária uma maior energia para começar as trincas e levar ao desgaste do revestimento YSZ 7Y1,7Hf. Adicionalmente verificou-se que ambos os revestimentos apresentaram, com o aumento da temperatura de ensaio, uma mesma tendência de queda da perda de massa.

A maior resistência dos revestimentos YSZ 7Y1,7Hf pode estar ligada a maior aderência do revestimento, e provavelmente à maior adesão entre as lamelas, efeito verificado no capítulo 4.1, onde observou-se uma aderência de 17 Mpa para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf, e de 8,9 MPa para o revestimento YSZ 8Y.

Outro fator que complementa esta análise, é a maior porosidade do revestimento YSZ 8Y (12,10%) quando comparado com a porosidade do revestimento YSZ 7Y1,7Hf (7,99%). Com esse menor valor de porosidade o revestimento possui uma maior coesão entre as partículas, e provavelmente uma melhor adesão das camadas, o que determina uma maior capacidade de suportar os impactos do erodente, em função da menor área e força de contato entre as lamelas. Os trabalhos desenvolvidos por Ramachandran *et al.* (2013), Sobhanverdi e Akbari (2015), Cernuschi *et al.* (2016) e Schmitt *et al.* (2016) indicam que revestimentos mais porosos, e portanto com tendência de apresentar menor aderência, apresentam uma menor resistência à erosão.

Com o auxílio da microscopia foram feitas imagens das superfícies dos revestimentos, antes e depois do ensaio de erosão para discutir o efeito da perda de massa nos revestimentos. Primeiramente tem-se na Figura 46 da superfície do revestimento YSZ 7Y1,7Hf com a morfologia aglomerada e sinterizada antes (a) e depois (b) do processo de erosão na temperatura de ensaio de 700°C.

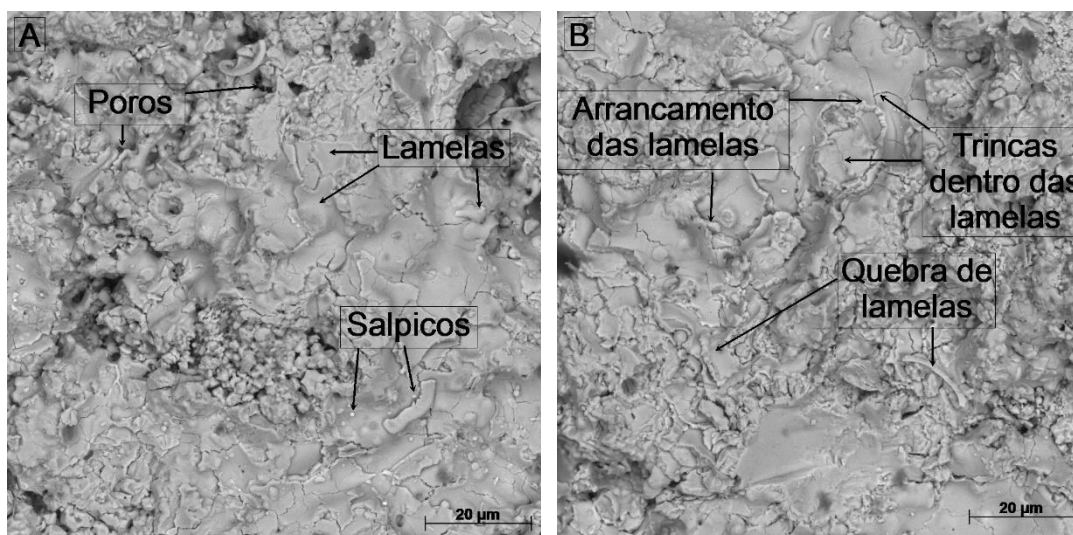


Figura 46 – Superfície do revestimento YSZ 7Y1,7Hf antes (a) e depois (b) do ensaio de erosão na temperatura de 700°C.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 46 (a) observa-se na superfície antes do ensaio erosivo diversas características de revestimentos cerâmicos como as lamelas, os poros e os salpicos. Após o ensaio de erosão Figura 46 (b) são observados os fenômenos expostos por Ramachandran *et al.* (2013), que levam a perda do revestimento cerâmico, como as

trincas que surgem dentro das lamelas, que levam a quebra das lamelas e que também acarretam o fenômeno de arrancamento das lamelas por completo, outro fenômeno observado é a diminuição dos salpicos que não são mais encontrados na superfície, devido a serem estruturas mais facilmente removidas. Para uma visualização específica da perda de massa tem-se a Figura 47, na Figura 47 (b), observa-se o processo de erosão pelo arrancamento de lamelas devido a intersecção das trincas dentro das lamelas, que leva a quebra das lamelas.

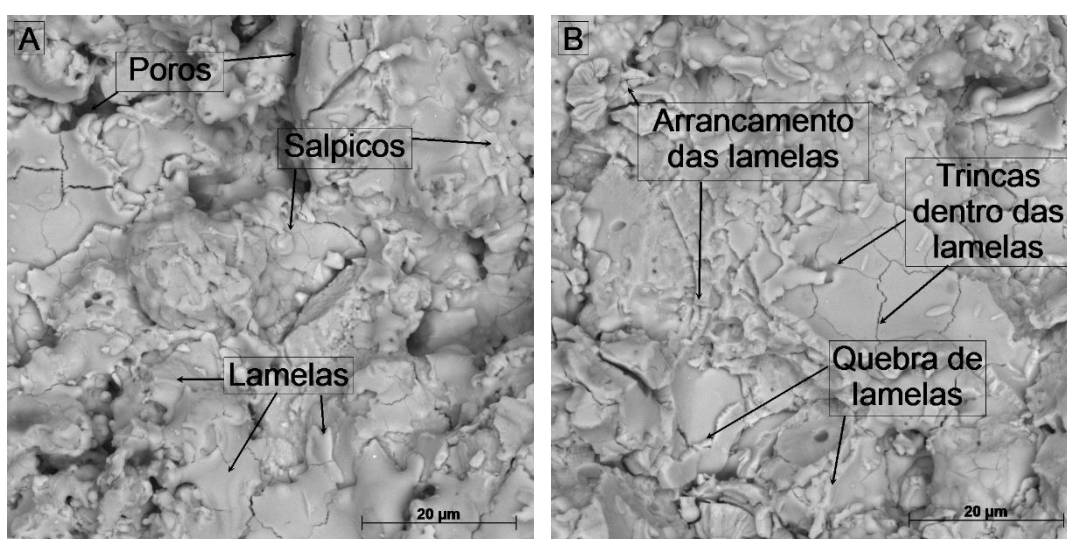


Figura 47 – Destaque da superfície do revestimento YSZ 7Y1,7Hf antes e depois do ensaio, respectivamente (a) e (b), na temperatura de 700°C.

Fonte: Autoria própria.

A análise da superfície antes e depois do ensaio de erosão dos revestimentos YSZ 8Y com uma temperatura de ensaio de 700°C é mostrada na Figura 48.

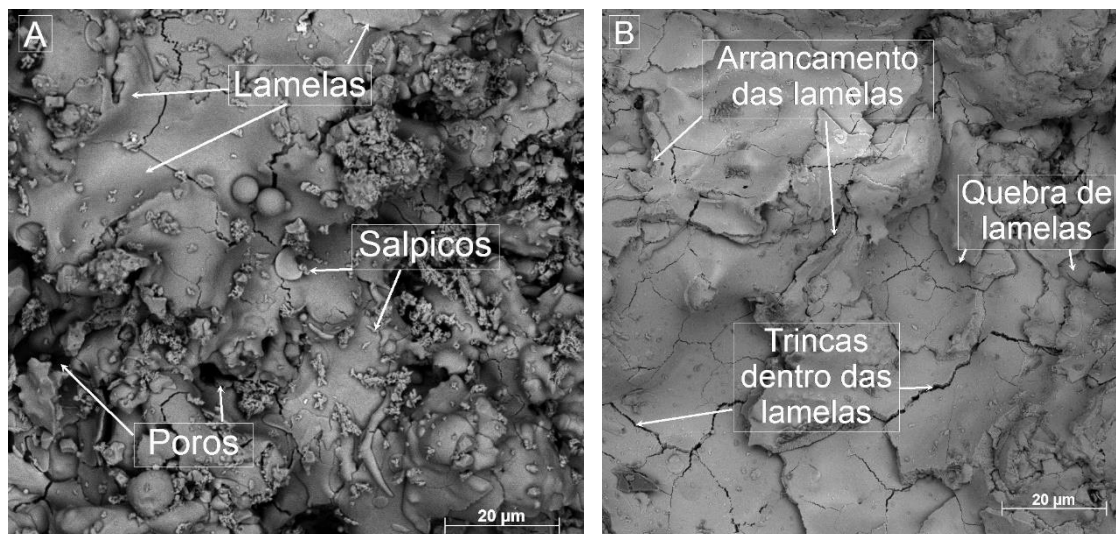


Figura 48 – Superfície do revestimento YSZ 8Y antes (a) e depois (b) do ensaio de erosão com a temperatura de 700°C.

Fonte: Autoria própria.

Na imagem da Figura 48 (a) observa-se que a microestrutura do revestimento YSZ 8Y apresenta as características do revestimento cerâmico com lamelas, salpicos e poros. A perda de massa do revestimento YSZ 8Y é mostrada na imagem da Figura 48 (b), ressalta-se uma maior presença de trincas dentro das lamelas após o ensaio de erosão quando comparado com o revestimento YSZ 7Y1,7Hf, dessa forma tem-se uma maior quebra das lamelas e decorrente arrancamento, sendo também maior a presença dos salpicos.

Tem-se então na Figura 49, uma maior ampliação do revestimento YSZ 8Y, com a Figura 49 (a) é ressaltada as características do revestimento cerâmico com a presença das lamelas, salpicos e poros antes do ensaio de erosão e na Figura 49 (b) depois do ensaio de erosão observa-se a quantidade elevada de trincas dentro das lamelas que leva a quebra das lamelas seguida do arrancamento do revestimento.

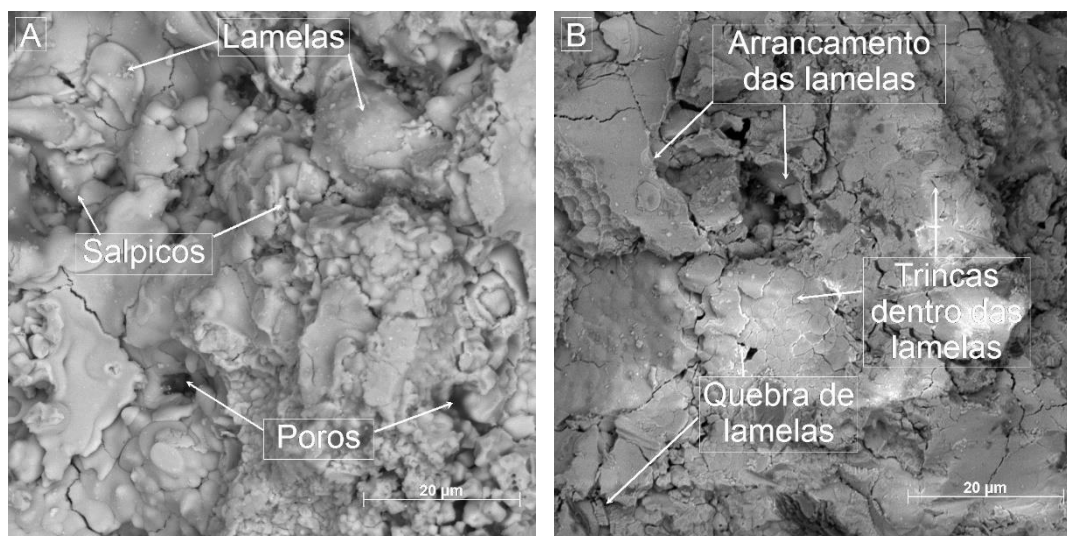


Figura 49 – Destaque da superfície do revestimento YSZ 8Y antes (a) e depois (b), do ensaio de erosão com a temperatura de 700°C.

Fonte: Autoria própria.

Nas imagens da Figura 50 é mostrada a superfície do revestimento YSZ 7Y1,7Hf antes e após o ensaio de erosão a 900°C.

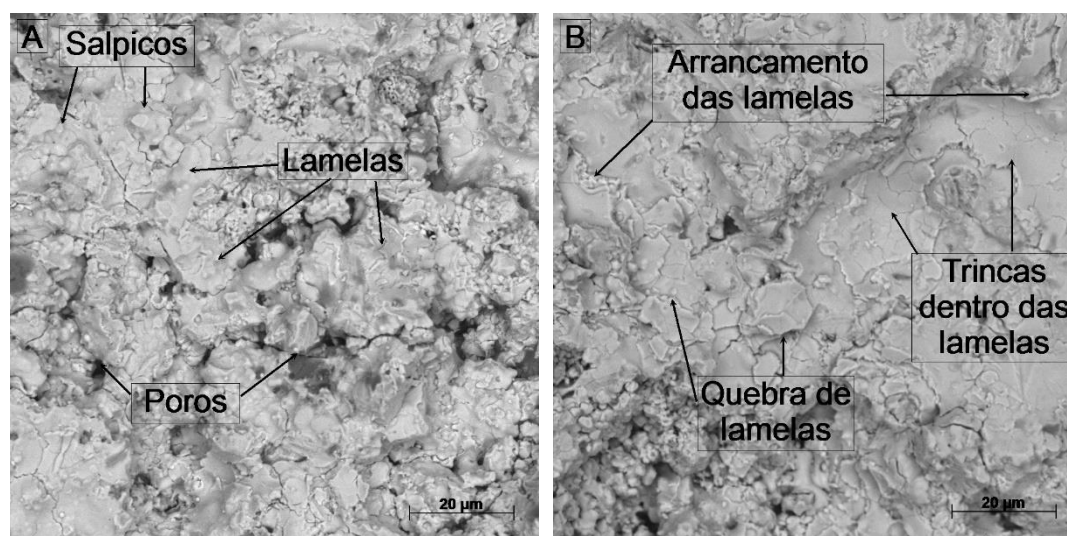


Figura 50 – Superfície do revestimento YSZ 7Y1,7Hf antes (a) e depois (b) do ensaio de erosão na temperatura de 900°C.

Fonte: Autoria própria.

Com as imagens da Figura 50 constata-se a agressividade do ensaio de erosão nas amostras YSZ 7Y1,7Hf, devido que antes do ensaio na Figura 50 (a) o revestimento apresenta as características de salpicos, lamelas e porosidade e com a Figura 50 (b) após o ensaio é apresentada uma quantidade elevada de trincas dentro das lamelas que levam ao arrancamento das mesmas, devido as quebras das

lamelas. Para o destaque da região erodida tem-se as imagens da Figura 51, com uma maior ampliação na região exposta ao ataque erosivo de 900°C.

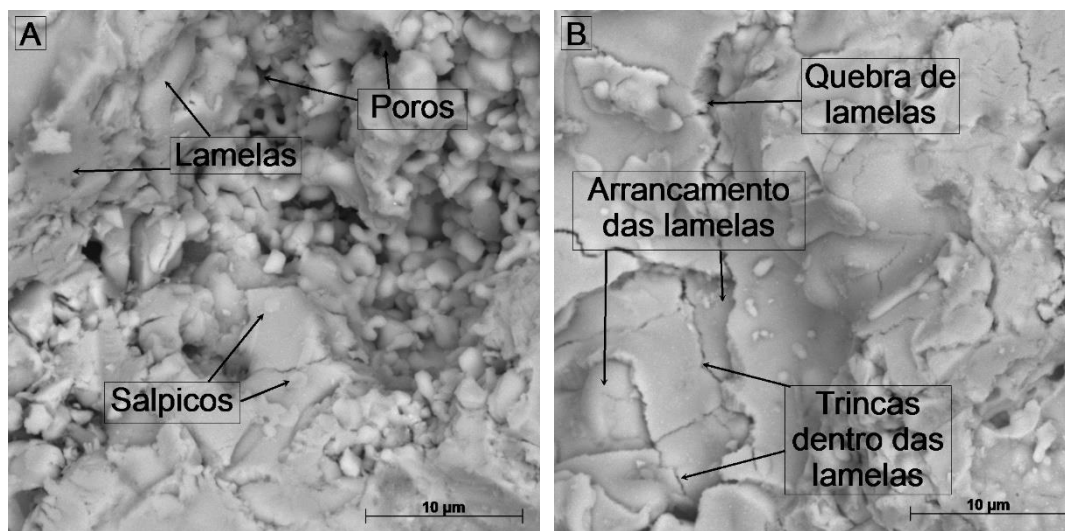


Figura 51 – Destaque da superfície do revestimento YSZ 7Y1,7Hf, antes (a) e depois (b), na temperatura de ensaio de 900°C.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 51 (a) a estrutura básica de um revestimento antes da erosão é mostrada com a presença das estruturas típicas como as lamelas, poros e salpicos e após o ensaio de erosão na Figura 51 (b) observa-se a degradação da superfície através das trincas que se formam dentro das lamelas que levam a perda da resistência da estrutura e ao arrancamento das lamelas.

Para a temperatura mais elevada de 900°C tem-se a comparação antes e depois do ensaio de erosão para o revestimento YSZ 8Y, por meio das imagens da Figura 52. A partir da imagem da Figura 52 (a), observa-se que antes do ensaio de erosão tem-se as estruturas dos revestimentos com os poros, salpicos e lamelas, características que dão ao revestimento a sua resistência a erosão e a altas temperatura e na Figura 52 (b), apresenta-se uma degradação elevada da superfície por meio de trincas dentro das lamelas que acarretam no arrancamento das lamelas com a erosão.

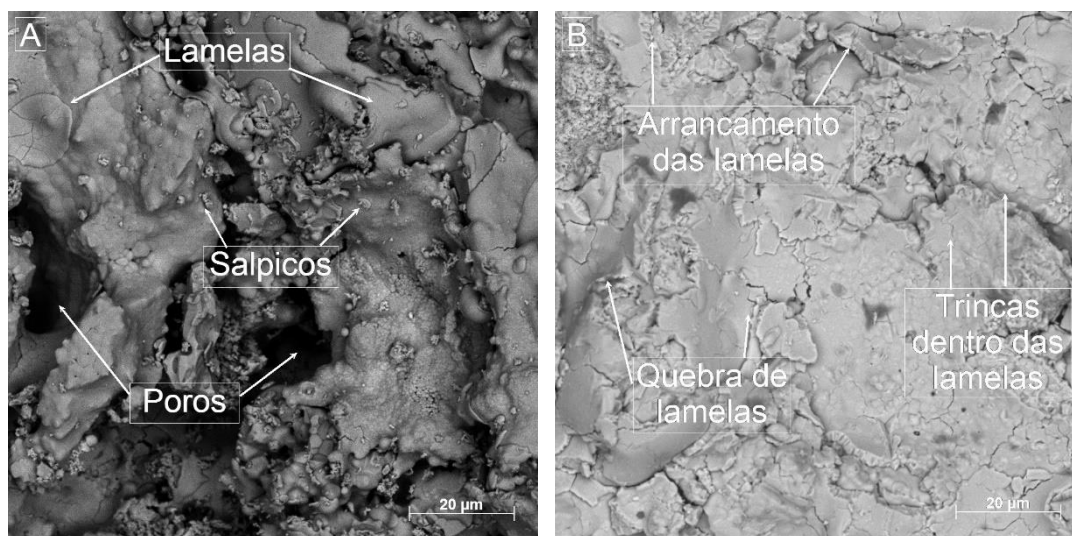


Figura 52 – Superfície do revestimento YSZ 8Y antes (a) e depois (b) do ensaio de erosão com a temperatura de 900°C.

Fonte: Autoria própria.

Para uma melhor observação do mecanismo de perda de massa do revestimento YSZ 8Y tem-se as imagens da Figura 53.

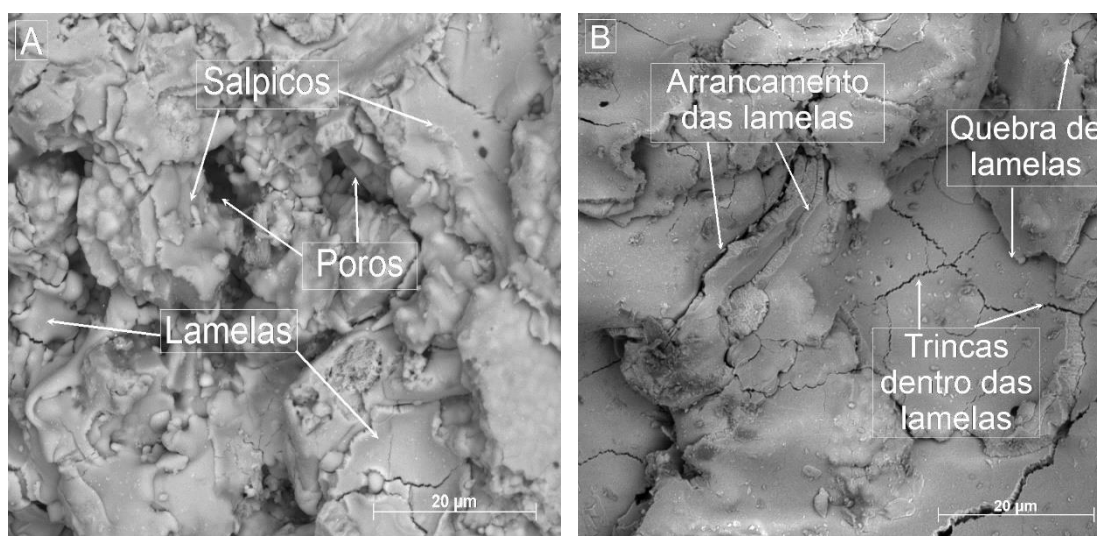


Figura 53 – Superfície do revestimento YSZ 8Y antes (a) e depois (b), do ensaio de erosão com a temperatura de 900°C.

Fonte: Autoria própria.

Com a Figura 53 (a) mostra-se a típica estrutura para o revestimento e na Figura 53 (b) tem-se uma maior presença de trincas e da intersecção dessas trincas, onde as lamelas são quebradas levando a degradação das propriedades do revestimento.

De forma a complementar o estudo das características dos revestimentos, são exploradas as análises das seções transversais das amostras, primeiramente na Figura 54 tem-se a microestrutura do revestimento YSZ 7Y1,7Hf antes e depois o ensaio de erosão.

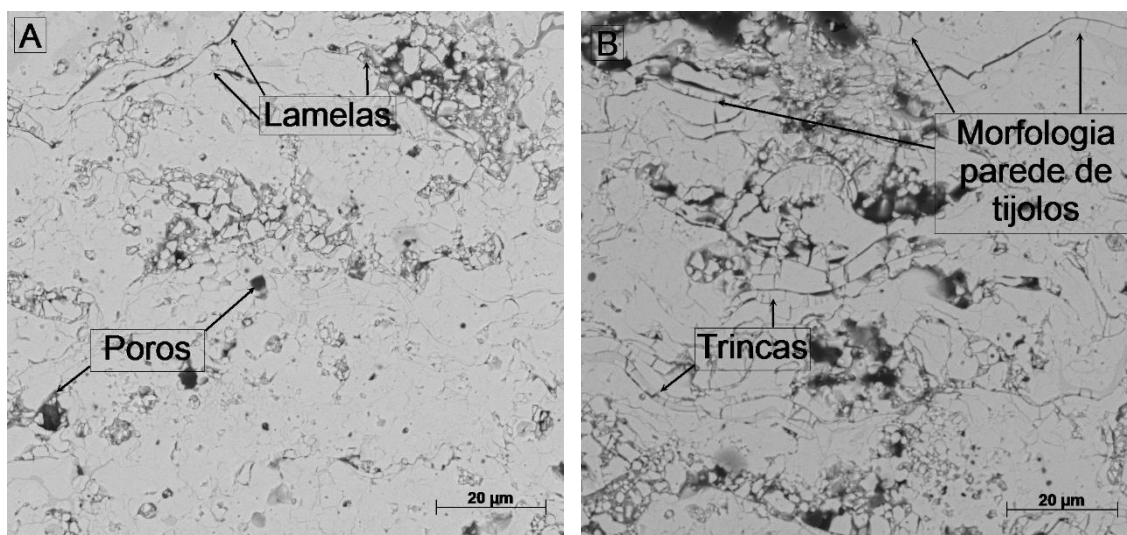


Figura 54 – Seção transversal do revestimento YSZ 7Y1,7Hf, antes (a) e depois (b), do ensaio de erosão na temperatura de ensaio de 900°C.

Fonte: Autoria própria.

Com base na imagem da Figura 54 (a) observa-se as características do revestimento com as lamelas e a partir da Figura 54 (b) o mecanismo de perda de massa que foi exposto por Cernuschi *et al.* (2016) é observado e que consiste na formação e intersecção de trincas formando a morfologia de parede de tijolos, podendo também ser interpretado conforme Wellman e Nicholls (2007), Ramachandran *et al.* (2013) e Fang *et al.* (2015), que especifica a forma de perda de massa pela intersecção de trincas no revestimento cerâmico.

Para um estudo específico do mecanismo de perda de massa tem-se as imagens da Figura 55 para duas temperaturas de ensaio. Na Figura 55 (a) e (b) observa-se as trincas que formam o mecanismo de perda de massa do revestimento depositado por meio da morfologia parede de tijolos, que ocorre pela remoção de uma ou múltiplas lamelas, através da propagação de trincas entre as lamelas, causadas pelo impacto das partículas de erodente.

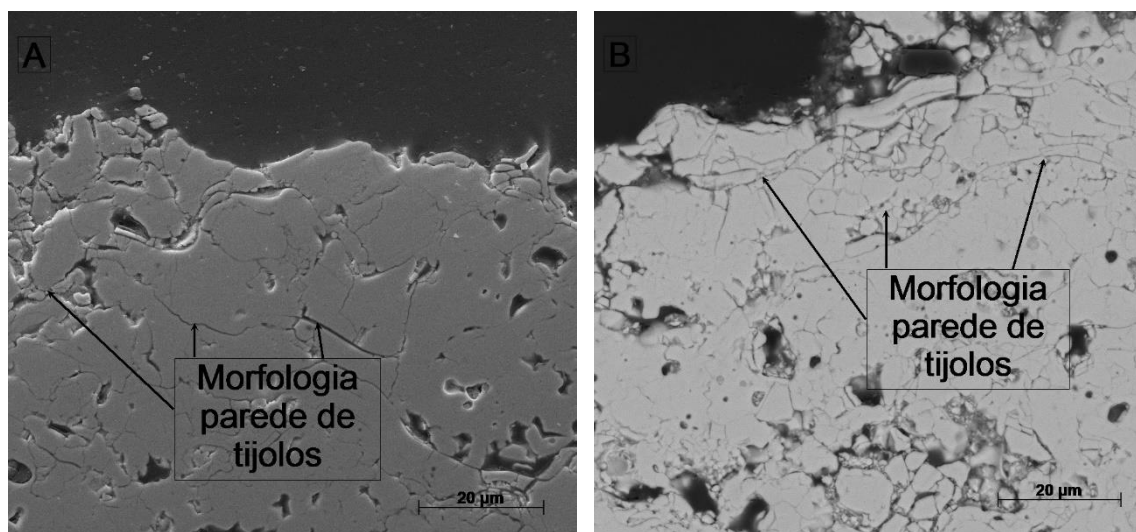


Figura 55 – Detalhe da seção transversal do revestimento YSZ 7Y1,7Hf, depois do ensaio de erosão, na temperatura de ensaio de 700°C e 900°C, respectivamente (a) e (b).

Fonte: Autoria própria.

A seguir na Figura 56 são apresentadas as seções transversais das amostras do revestimento YSZ 8Y, em um primeiro momento tem-se a comparação entre o revestimento antes e depois do ensaio de erosão.

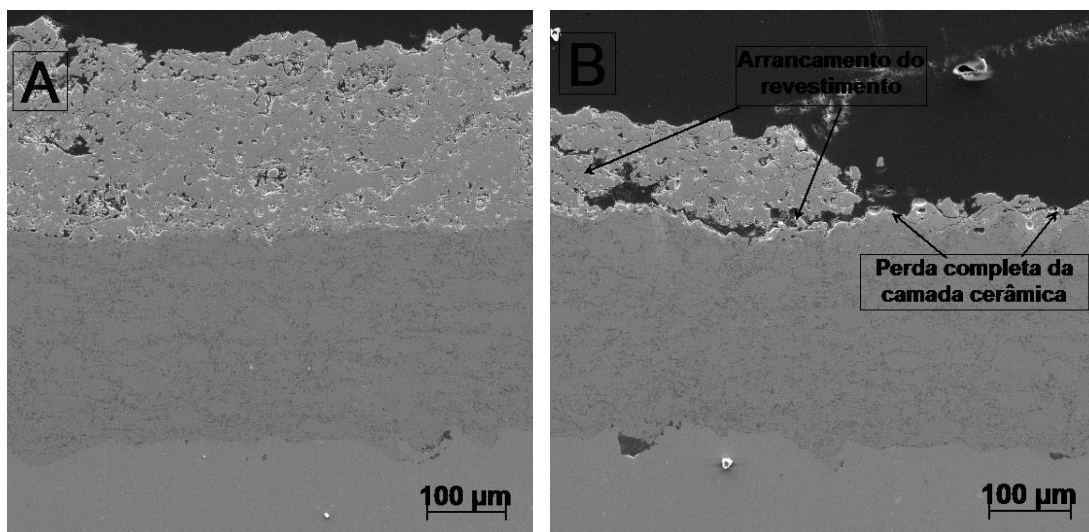


Figura 56 – Seção transversal do revestimento YSZ 8Y antes e depois do ensaio de erosão (a) e (b) respectivamente, na temperatura de ensaio de 900°C.

Fonte: Autoria própria.

Com as imagens da Figura 56 observa-se uma perda de massa elevada devido ao arrancamento do revestimento, sendo notado alguns locais onde houve a perda

completa da camada cerâmica devido a intersecção de trincas que acabam remover todo o revestimento cerâmico.

Para uma observação do fenômeno tem-se as imagens da Figura 57, que possui uma ampliação do revestimento YSZ 8Y para o ensaio de erosão a temperatura de 700°C e 900°C.

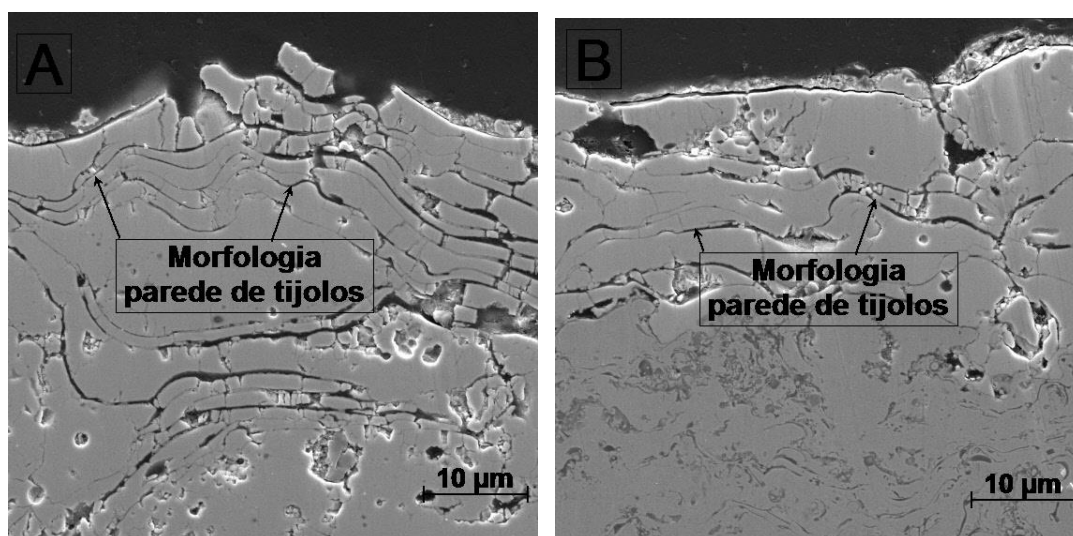


Figura 57 – Detalhe da seção transversal do revestimento YSZ 8Y, depois do ensaio de erosão, na temperatura de ensaio de 700 e 900°C, respectivamente (a) e (b).

Fonte: Autoria própria.

Com as imagens da Figura 57, pode ser observado com mais de detalhe o mecanismo de perda de massa por meio da intersecção de trincas e a formação da morfologia de parede de tijolos, conforme mostrado por Cernuschi *et al.* (2016).

Comparando-se com a Figura 55 observa-se uma maior separação entre as lamelas para o revestimento YSZ 8Y que o revestimento YSZ 7Y1,7Hf. Provavelmente esta característica deve ser decorrente da menor porosidade deste último, e consequentemente uma menor tendência a formar as trincas que levam a separação das lamelas do revestimento. Outra característica que deve ser avaliada é a maior aderência do revestimento YSZ 7Y 1,7Hf, o que provavelmente acarreta uma maior aderência entre as lamelas, conforme foi observado por Sobhanverdi e Akbari (2015).

4.2.2 Comportamento da rugosidade antes e após o ensaio de erosão para os diferentes revestimentos

A análise da rugosidade tem por objetivo avaliar o fenômeno da perda de massa por meio de dados ligados as mudanças superficiais, primeiramente tem-se as imagens da superfície obtidas por perfilometria nas Figura 58 e Figura 59, respectivamente para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf e revestimento YSZ 8Y, de forma a mostrar como o fenômeno da erosão afeta a rugosidade dos revestimentos.

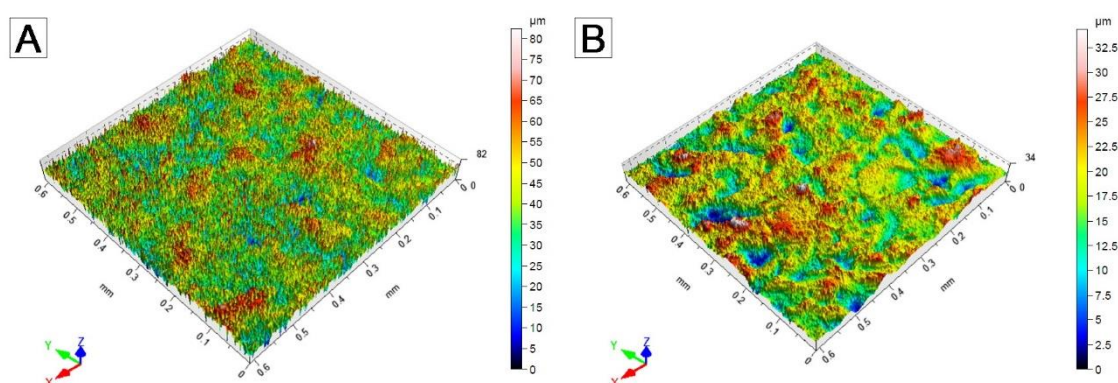


Figura 58 - Evolução da Rugosidade, com a ampliação de 50x, para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf, antes (a) e depois (b) do ensaio de erosão na temperatura de 700°C com ângulo de ataque de 90°.

Fonte: Autoria própria.

Com as imagens da Figura 58, observa-se que a erosão do revestimento YSZ 7Y1,7Hf diminui a rugosidade do revestimento. Para o revestimento YSZ 8Y observa-se o perfil de rugosidade, antes e após a erosão, nas imagens da Figura 59.

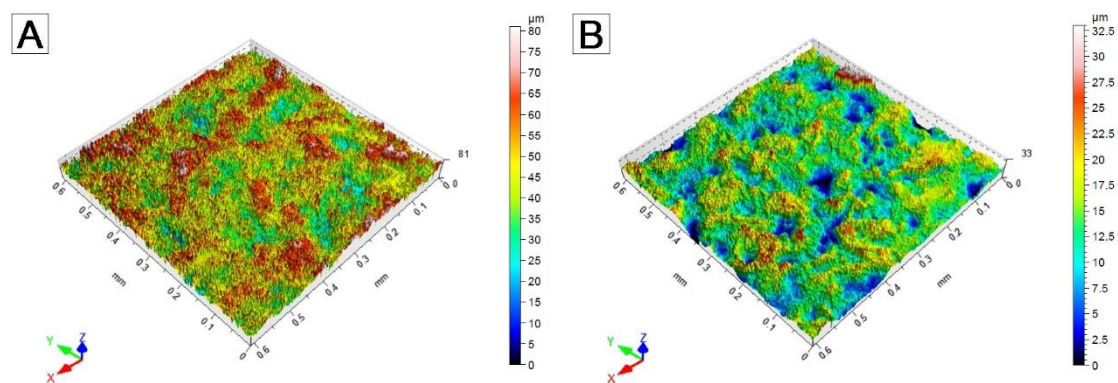


Figura 59 - Evolução da Rugosidade, com a ampliação de 50x, para o revestimento YSZ 8Y antes (a) e depois (b), do ensaio de erosão na temperatura de 700°C com ângulo de ataque de 90°.

Fonte: Autoria própria.

A partir das imagens da Figura 59 é possível, como na Figura 58, constatar que após o ensaio de erosão o revestimento tem uma diminuição da rugosidade, verificada pela queda dos valores da escala na guia lateral e as cores que estão presentes.

No que diz respeito aos valores de rugosidade, primeiramente os revestimentos foram analisados segundo o parâmetro de rugosidade da média quadrática S_q , e os resultados encontrados são expostos nas Figura 60 e Figura 61 para os revestimentos YSZ 7Y1,7Hf e YSZ 8Y, respectivamente.

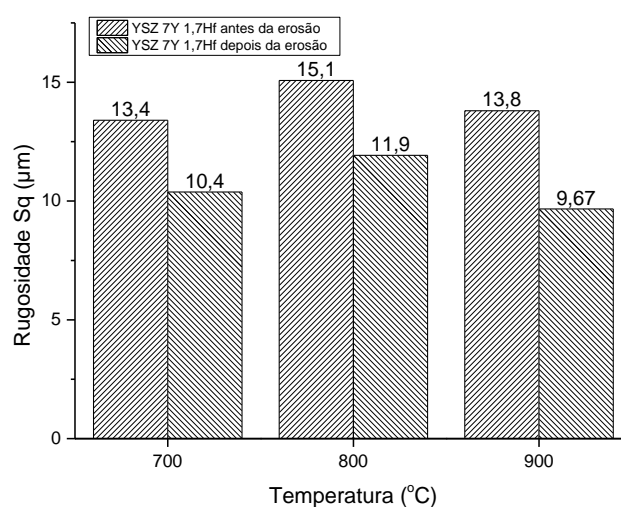


Figura 60 - Evolução da Rugosidade S_q no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de ataque de 90° para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf.

Fonte: Autoria própria.

Com base na Figura 60, observa-se que com o aumento de temperaturas para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf ocorre uma diminuição da rugosidade gradativamente, sendo este comportamento diretamente proporcional com a queda da perda de massa, dessa forma a rugosidade S_q é diretamente proporcional a perda de massa.

A variação do parâmetro de rugosidade S_q antes e após ensaio de erosão a quente para o revestimento YSZ 8Y, é mostrado na Figura 61.

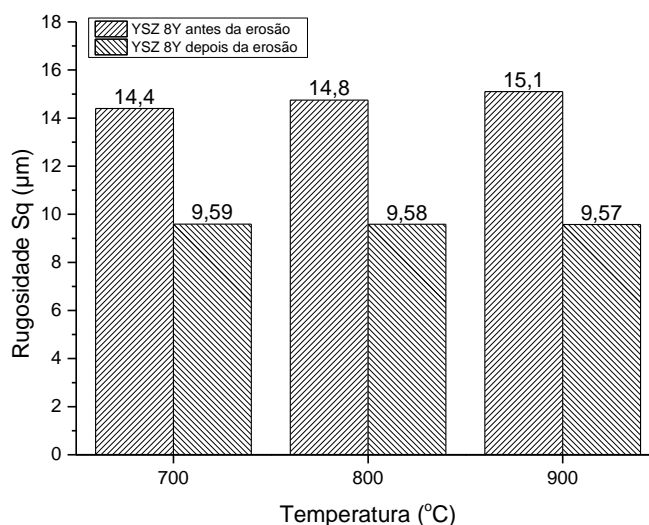


Figura 61 - Evolução da Rugosidade Sq no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de ataque de 90° para o revestimento YSZ 8Y.

Fonte: Autoria própria.

Observa-se na Figura 61, o mesmo comportamento mostrado anteriormente de uma diminuição do perfil de rugosidades Sq com o aumento da temperatura, ocorrendo uma queda da rugosidade Sq em todos os revestimentos, com uma diferença que aumenta de forma linear ao longo do aumento das temperaturas de ensaio, característica melhor observada na Tabela 7 que mostra a variação dos valores de rugosidade antes e depois do ensaio de erosão para os diferentes revestimentos utilizados.

Tabela 7 – Variação Rugosidade Sq para os revestimentos YSZ 7Y1,7Hf e YSZ 8Y.

Fonte: Autoria própria.

Variação Sq	YSZ 7Y1,7Hf (µm)	YSZ 8Y (µm)
700°C	3,02	4,81
800°C	3,15	5,22
900°C	4,13	5,53

Com o auxílio da Tabela 7, é ressaltada a evolução do perfil de rugosidade Sq, observando-se primeiramente que em todas as temperaturas o revestimento YSZ 8Y teve uma maior queda da rugosidade Sq quando comparado ao revestimento YSZ 7Y1,7Hf, isso pode se conectado com a maior perda de massa e maior porosidade do

revestimento YSZ 8Y, dessa forma tem-se um maior arrancamento das lamelas e com isso uma maior queda das rugosidades.

Outra característica é a queda dos valores de Sq, antes e após ensaio, com o aumento da temperatura, sendo esta variação provavelmente decorrente da remoção dos salpicos e lamelas nos revestimento e essa remoção aumenta com a elevação das temperaturas de ensaio causando assim no revestimento maiores desvios significativos na superfície.

Com a análise do perfil de rugosidade Sq finalizada, tem-se a análise do perfil de rugosidade Sz, apresentada nos gráficos das Figura 62 e Figura 63 para os diferentes revestimentos e temperaturas de ensaio utilizadas.

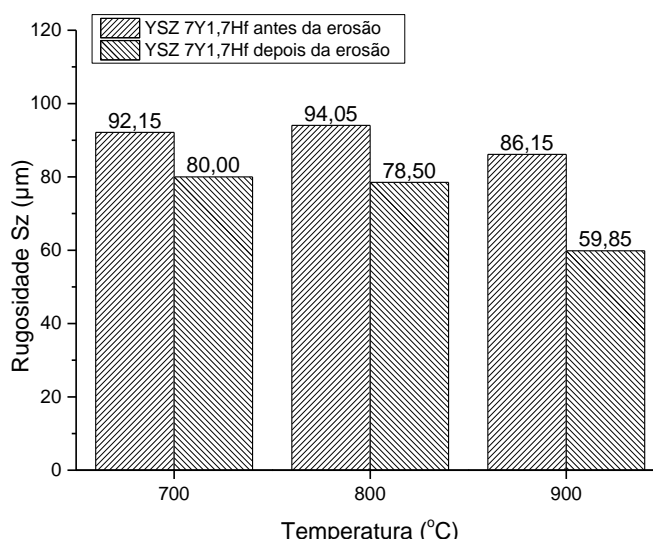


Figura 62 - Evolução da Rugosidade Sz no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de ataque de 90° para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf.

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 62, visualiza-se o comportamento da rugosidade Sz, para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf, onde em todas as faixas de temperaturas a rugosidade é menor depois do ensaio de erosão e com o aumento da temperatura de ensaio tem-se uma maior diferença entre os valores de rugosidade, antes e após o ensaio.

Para o revestimento YSZ 8Y, o perfil de rugosidades Sz, tem-se o gráfico da Figura 63.

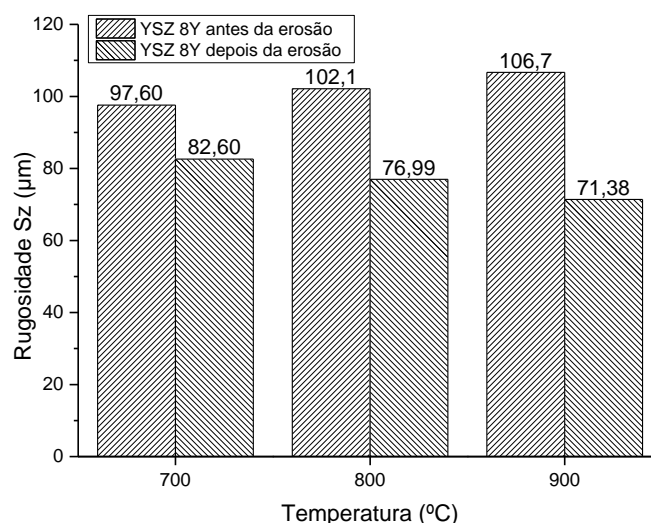


Figura 63 - Evolução da Rugosidade Sz no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de ataque de 90° para o revestimento YSZ 8Y.

Fonte: Autoria própria.

Os valores mostrados para a evolução da rugosidade Sz no gráfico da Figura 62 e Figura 63 corroboram para o que foi observado anteriormente na rugosidade Sq, onde se tem uma evolução da rugosidade de modo a sempre possuir um valor mais baixo de rugosidade após o ensaio de erosão e também com a elevação da temperatura a diferença entre a rugosidade Sz antes e depois do ensaio de erosão apresenta um aumento, como é exposto na Tabela 8.

Tabela 8 – Variação Rugosidade Sz para os revestimentos YSZ 7Y1,7Hf e YSZ 8Y.

Fonte: Autoria própria.

Variação Sz	YSZ 7Y1,7Hf (µm)	YSZ 8Y (µm)
700°C	12,15	15,00
800°C	15,55	25,14
900°C	26,30	35,28

Os dados da Tabela 8 mostram que com o aumento da temperatura ocorre uma queda gradual dos valores de Sz em todos os revestimentos, sendo isto devido que o perfil de rugosidades Sz acompanha a evolução dos picos e vales e estes acabam sendo influenciados pelas lamelas que são mais intensamente arrancadas do revestimento com o aumento da temperatura.

Observando os diferentes revestimentos, conforme foi constatado no perfil de rugosidade Sq, o revestimento YSZ 8Y apresenta maior diferença na rugosidade antes

e após o ensaio de erosão, para todas as temperaturas estudadas, quando comparada com o revestimento YSZ 7Y1,7Hf. Isso decorre da maior perda de massa do revestimento YSZ 8Y, assim como pode estar ligado com a maior presença de fraturas entre, e no interior das lamelas, verificado nas imagens da superfície e seção transversal desgastada, após o ensaio de erosão.

Após o estudo do perfil de rugosidades Sq e Sz, analisou-se o perfil de rugosidade Sa, mostrada no gráfico das Figura 64 e Figura 65 para os diferentes revestimento e temperaturas utilizadas.

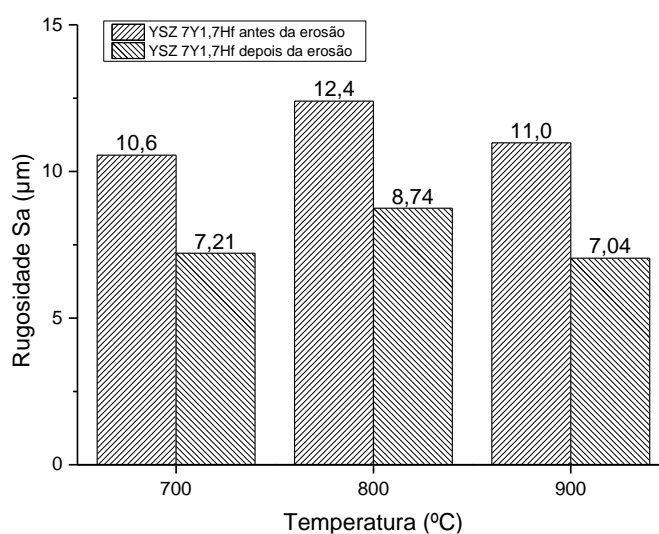


Figura 64 - Evolução da Rugosidade Sa no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de ataque de 90° para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf.

Fonte: Autoria própria.

Com a Figura 64, observa-se que o perfil de rugosidade Sa para o revestimento YSZ 7Y1,7Hf tem as mesmas características observadas para os parâmetros de rugosidade descritos anteriormente, destacando-se uma diminuição da rugosidade após o ensaio de erosão, além de possuir uma diminuição crescente do perfil de rugosidade ao longo do aumento das temperaturas.

O revestimento YSZ 8Y é apresentado na Figura 65, para o perfil de rugosidades Sa.

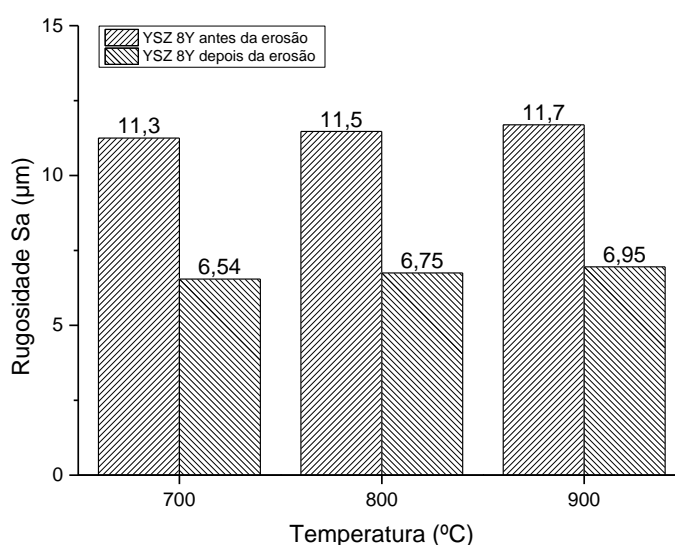


Figura 65 - Evolução da Rugosidade Sa no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de ataque de 90° para o revestimento YSZ 8Y.

Fonte: Autoria própria.

Conforme pode ser constatado nas Figura 64 e Figura 65 o perfil de rugosidade Sa tem o mesmo comportamento apresentado pelos perfis de rugosidade Sq e Sz. De maneira que a rugosidade Sa de cada revestimento, em cada temperatura, é menor após o ensaio de erosão quando comparada a rugosidade antes do ensaio e possui uma queda gradual dos valores ao longo do aumento de temperatura, mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 – Variação Rugosidade Sa para os revestimentos YSZ 7Y 1,7Hf e YSZ 8Y.

Fonte: Autoria própria.

Variação Sa	YSZ 7Y1,7Hf (µm)	YSZ 8Y (µm)
700°C	3,35	4,71
800°C	3,66	4,72
900°C	3,93	4,74

A Tabela 9 mostra os dados dos gráficos das Figura 64 e Figura 65 e corrobora com o que foi observado para os outros perfis de rugosidade estudados, que com o aumento da temperatura ocorre uma diminuição gradual da rugosidade. É constatado que no revestimento YSZ 8Y em todas as temperaturas ensaiadas apresenta uma maior queda da rugosidade Sa quando comparada com o revestimento YSZ 7Y1,7Hf, podendo estar correlacionada com a menor aderência existente entre as lamelas

deste revestimento que leva a maiores picos e vales devido ao arrancamento das lamelas em maior quantidade no revestimento YSZ 8Y.

4.3 AVALIAÇÃO DO ÂNGULO DE ENSAIO EM DIFERENTES TEMPERATURAS DE TESTE DE EROSÃO

Para a caracterização dos diferentes ângulos de impacto, no teste de erosão a quente, foi utilizada a evolução da perda de massa ao longo de diferentes ângulos de impacto, 30 e 90°, sob diferentes temperaturas de ensaio. Utilizou-se a microscopia eletrônica de varredura para a caracterização do mecanismo de perda de massa. As amostras ainda foram submetidas a um estudo da rugosidade com os diferentes ângulos de impacto para um mesmo revestimento. Foi utilizado apenas um revestimento devido a questões de aplicabilidade e interesse científico sendo este mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Revestimento cerâmico utilizado nos ensaios de variação do ângulo de impacto.

Fonte: Autoria própria.

Material	Fabricação
YSZ 7Y1,7Hf	Aglomerado e Sinterizado

4.3.1 Comportamento da perda de massa após o ensaio de erosão

A comparação na perda de massa ao longo das temperaturas do ensaio de erosão para os dois ângulos de incidência utilizados, é mostrado no gráfico da Figura 66.

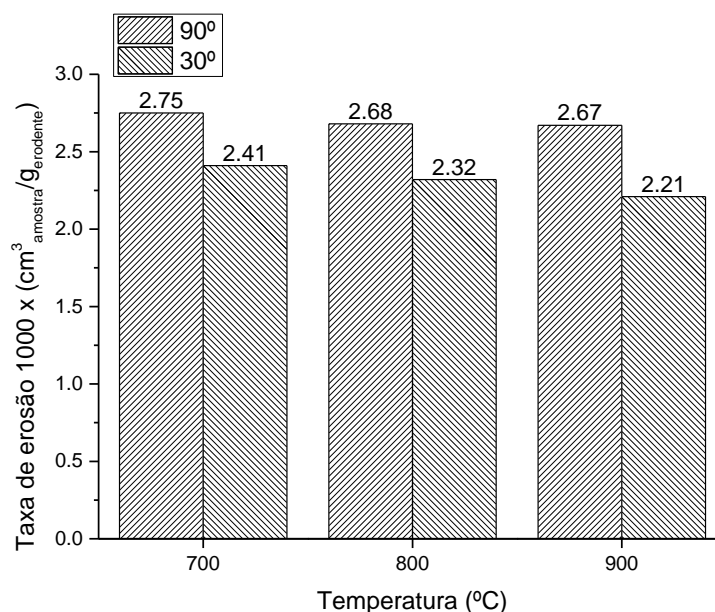


Figura 66 - Evolução da perda de massa no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com variação do ângulo de impacto.
Fonte: Autoria própria.

Com o auxílio da Figura 66 constata-se a influência do ângulo de impacto entre o erodente e o revestimento na perda de massa sob o ensaio de erosão a quente. Para um ângulo de incidência menor, 30°, a taxa de erosão é menor que para 90°, para todas as temperaturas estudadas. Sendo este resultado de acordo com o estudado por Finnie (1995), Cernuschi *et al.* (2011), Ramachandran *et al.* (2013) e Cernuschi *et al.* (2016). A diminuição da perda de massa com a redução no ângulo de incidência deve-se principalmente ao efeito da menor tenacidade do revestimento cerâmico, impedindo uma maior capacidade de absorção de energia com a elevação do ângulo de incidência (BERGMANN e VICENZI, 2011); (STACHOWIAK e BACHELOR, 2001).

Com o intuito de se observar as diferenças do mecanismo de perda de massa do revestimento, com o ângulo de incidência, foi avaliada a superfície com a microscopia eletrônica de varredura, Figura 67 e Figura 68, onde é comparada a morfologia superficial do revestimento após o ensaio de erosão em respectivamente duas temperaturas de ensaio, de 700°C e 800°C.

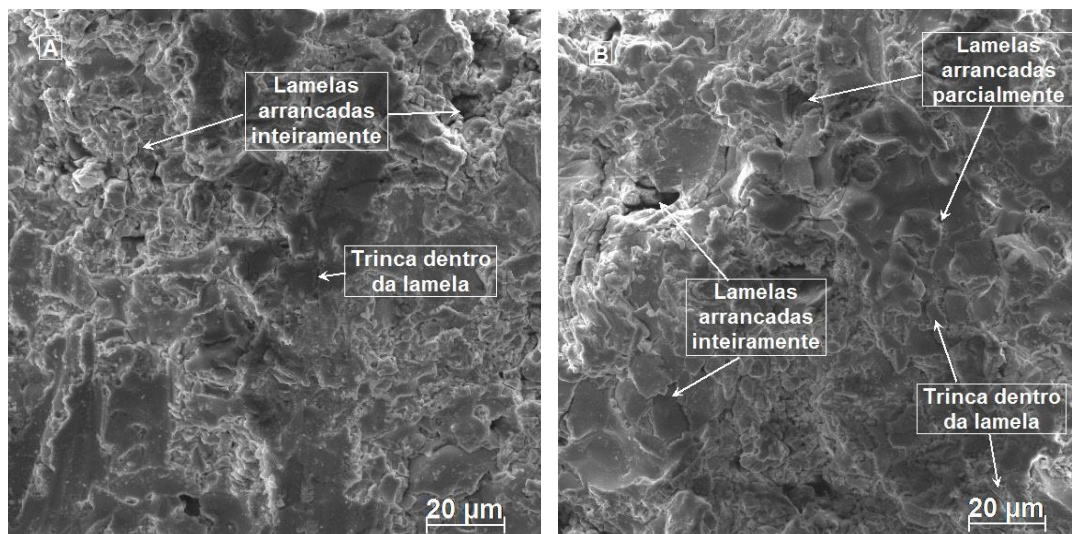


Figura 67 – Imagem da superfície do revestimento depois do ensaio de erosão, na temperatura de ensaio de 700°C com 30° e 90°, respectivamente (a) e (b).

Fonte: Autoria própria.

Pela análise das imagens superficiais dos revestimentos após o ensaio de erosão, mostrados na Figura 67, observa-se o fenômeno da erosão e a perda de massa para os dois ângulos de incidência utilizados. Conforme foi exposto no gráfico da Figura 66, o revestimento exposto a um ângulo maior de incidência apresenta um maior desgaste superficial, entretanto não se observa uma diferença significativa nos mecanismos de desgaste.

Para uma melhor visualização da morfologia de perda de massa do revestimento cerâmico, tem-se imagens com maior ampliação na Figura 68, mostrando a superfície depois do processo de erosão com ângulos de incidência de 30° e 90° e uma temperatura de ensaio de 800°C.

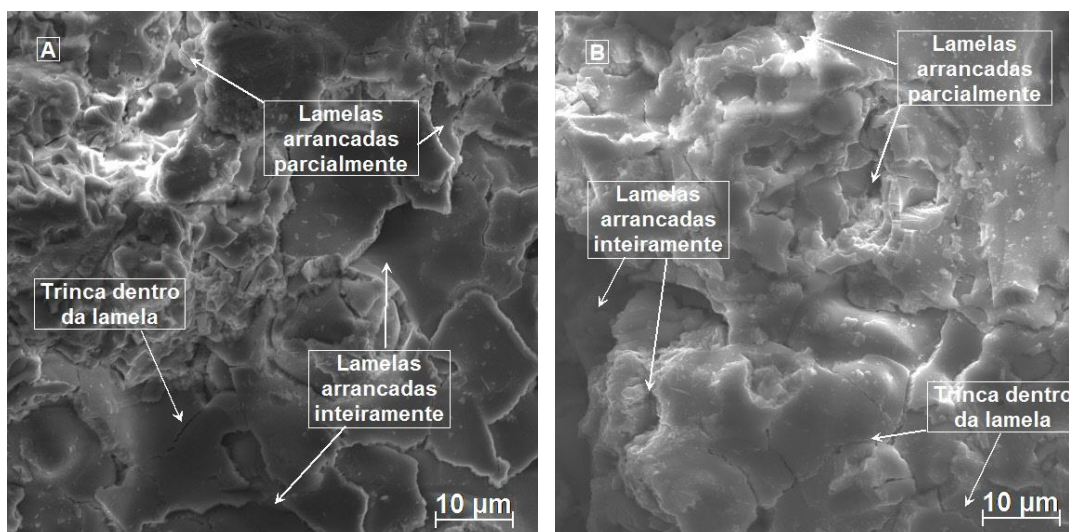


Figura 68 – Imagem da superfície do revestimento depois do ensaio de erosão, na temperatura de ensaio de 800°C com 30° e 90°, respectivamente (a) e (b).

Fonte: Autoria própria.

Com as imagens superficiais da Figura 68 são observadas as morfologias de perda de massa dos revestimentos nos dois ângulos de incidência, onde constata-se a intersecção de trincas e a retirada das lamelas, conforme foi apontado por Wellman e Nicholls (2007), Fang *et al.* (2015), Schmitt *et al.* (2016) e Cernuschi *et al.* (2016).

4.3.2 Comportamento da rugosidade sob diferentes ângulos de incidência antes e após o ensaio de erosão

No estudo do comportamento da rugosidade dos revestimentos após o ensaio de erosão foram abordados os perfis de rugosidade Sq, Sz e As. Primeiramente tem-se o perfil de rugosidade Sq para o ângulo de incidência de 30° com a Figura 69.

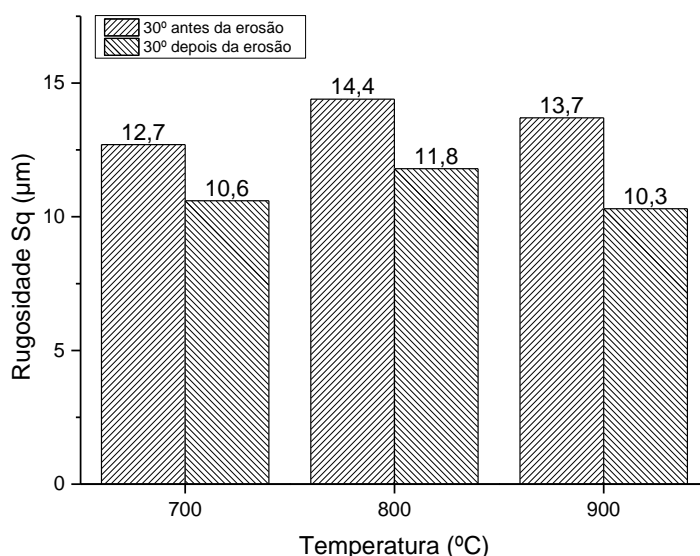


Figura 69 - Evolução da Rugosidade Sq no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de incidência de 30°.

Fonte: Autoria própria.

Os resultados do perfil de rugosidade Sq da Figura 69 ilustram que para o ângulo de incidência 30°, em todas as faixas de temperatura uma menor rugosidade depois do ensaio de erosão e um aumento gradual dessa diferença juntamente com o aumento da temperatura. Na Figura 70 tem-se o comportamento do perfil de rugosidade Sq para o ângulo de 90°.

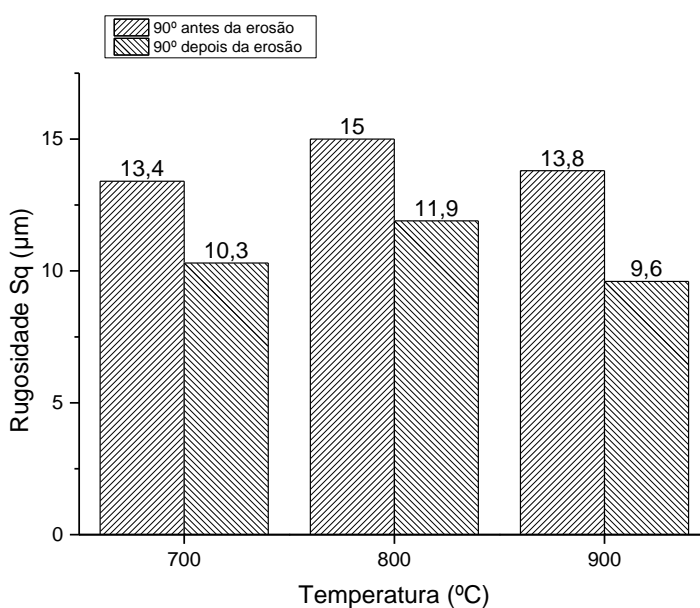


Figura 70 - Evolução da Rugosidade Sq no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de incidência de 90°.

Fonte: Autoria própria.

No perfil de rugosidades da Figura 70, observa-se o mesmo comportamento de queda da rugosidade S_q depois do ensaio de erosão e um aumento dessa queda ao longo do aumento das temperaturas, que fica exposta com o auxílio da Tabela 11, que mostra a diferença entre a rugosidade antes e depois do ensaio de erosão.

Tabela 11 – Variação Rugosidade S_q para os ângulos de ataque de 30° e 90°.

Fonte: Autoria própria.

Varição S_q	30° (μm)	90° (μm)
700°C	2,06	3,02
800°C	2,55	3,15
900°C	3,33	4,13

Com base na Tabela 11 o comportamento do perfil de rugosidades S_q é observado, com uma queda da rugosidade ao longo do aumento de temperatura, podendo ser associado ao arrancamento de lamelas devido ao ensaio erosivo, sendo que com o aumento da temperatura teve-se uma quantidade maior de trincas. Outro comportamento observado foi, que em todas as temperaturas utilizadas o ensaio com um maior ângulo de impacto ocasionou uma maior queda do perfil de rugosidades S_q que pode ser associado também com a característica de que com o maior ângulo de impacto obteve-se as maiores taxas de erosão ao longo do aumento das temperaturas.

Nas Figura 71 e Figura 72 observa-se a evolução do perfil de rugosidade S_z para os ângulos de impacto 30° e 90°, antes e após ensaio de erosão.

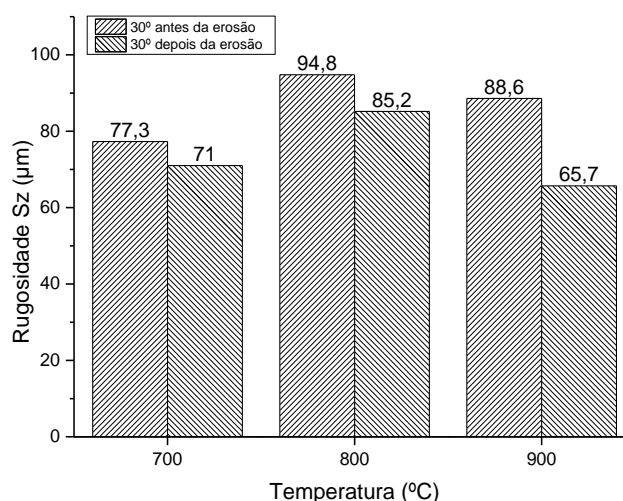


Figura 71 - Evolução da Rugosidade S_z no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de incidência de 30°.

Fonte: Autoria própria.

Com o gráfico do perfil de rugosidades Sz para o ângulo de incidência de 30° da Figura 71 observa-se o mesmo comportamento exposto para a rugosidade Sq que com o ensaio de erosão tem-se uma diminuição do perfil de rugosidades e com o aumento da temperatura essa diferença aumenta gradualmente. Na Figura 72 mostra-se o comportamento do perfil de rugosidade Sz para o ângulo de incidência 90°.

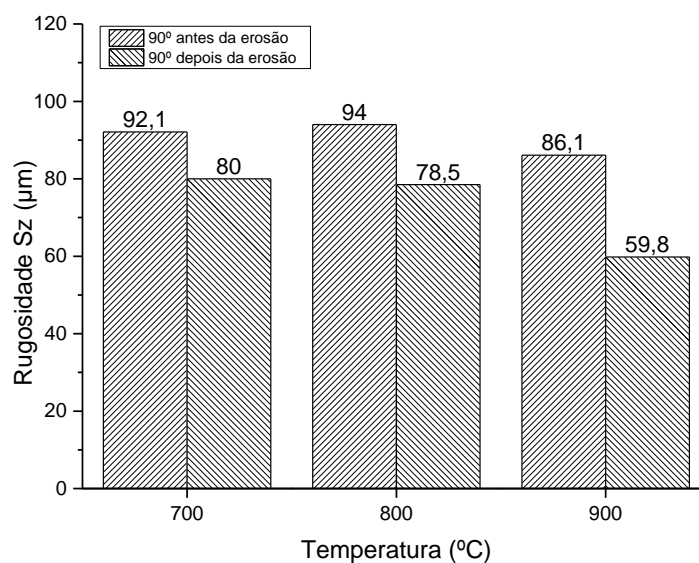


Figura 72 - Evolução da Rugosidade Sz no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de incidência de 90°.

Fonte: Autoria própria.

Com a Figura 72 o mesmo comportamento mostrado anteriormente é constatado para a rugosidade Sz com o ângulo de incidência de 90°, a comparação da evolução da rugosidade Sz para os dois ângulos de impacto é mostrado na Tabela 12.

Tabela 12 – Variação Rugosidade Sz para os ângulos de ataque de 30 e 90°.

Fonte: Autoria própria.

Varição Sz	30° (µm)	90° (µm)
700°C	6,30	12,15
800°C	9,65	15,55
900°C	22,88	26,30

Com o auxílio da Tabela 12 observa-se a diferença dos perfis de rugosidade depois do ensaio de erosão nos diferentes ângulos de impacto, sendo que conforme foi observado no perfil de rugosidade Sq, tem-se o aumento ao longo do aumento da temperatura da diferença da rugosidade Sz antes e depois da erosão e também em todas as temperaturas estudadas tem-se um aumento dessa diferença com o aumento do ângulo de impacto.

Para completar o estudo dos perfis de rugosidade, nas Figura 73 e Figura 74 tem-se os gráficos do perfil de rugosidade Sa para os ângulos de impacto de 30 e 90°, respectivamente.

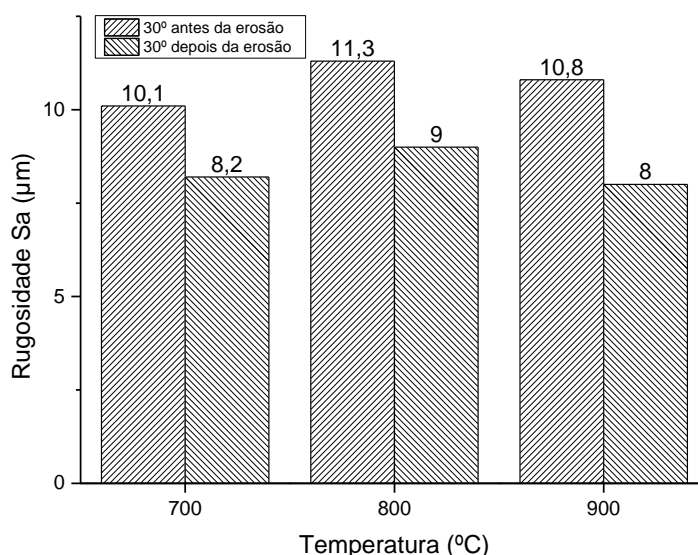


Figura 73 - Evolução da Rugosidade Sa no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de incidência de 30°.

Fonte: Autoria própria.

Para o ângulo de incidência de 30° o comportamento do perfil de rugosidade Sa, mostrado na Figura 73, tem a mesma característica exposta anteriormente de que depois do ensaio de erosão tem-se uma queda da rugosidade e com o aumento da temperatura essa queda aumenta gradativamente. Para o ângulo de incidência de 90° a evolução do perfil de rugosidades Sa é mostrada na Figura 74.

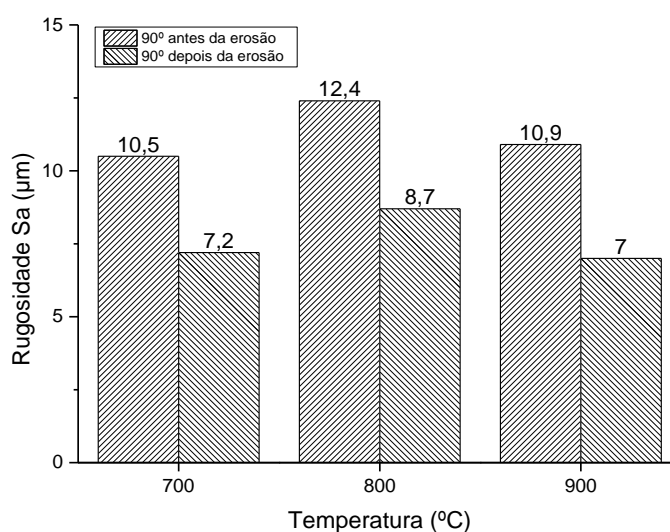


Figura 74 - Evolução da Rugosidade Sa no ensaio de erosão ao longo das temperaturas de ensaio com ângulo de incidência de 90°.

Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 74 observa-se que com o ângulo de incidência de 90° o comportamento permanece o mesmo de que com o ensaio de erosão tem-se uma diminuição do perfil de rugosidades Sa e com o aumento da temperatura ele diminui cada vez mais de forma gradual. Para uma melhor visualização dessa informação tem-se a Tabela 13.

Tabela 13 – Variação Rugosidade Sa para os ângulos de ataque de 30 e 90°.

Fonte: Autoria própria.

Varição Sa	30° (µm)	90° (µm)
700°C	1,89	3,35
800°C	2,35	3,66
900°C	2,84	3,93

A partir da Tabela 13 tem-se a comprovação de que o fenômeno mostrado para os perfis de rugosidade Sq e Sz mantém-se para o perfil de rugosidade Sa, de forma que com o aumento da temperatura tem-se um aumento da queda da rugosidade, ao longo dos dois ângulos utilizados e que o processo com um maior ângulo tem uma maior queda no perfil de rugosidades Sa quando comparado ao processo de erosão com um menor ângulo em todas as faixas de temperatura utilizadas, sendo isto devido ao processo de erosão produzir mais trincas e um maior arrancamento de lamelas no ângulo de incidência de 90°.

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos para diferentes revestimentos submetidos ao ensaio de erosão com diferentes temperaturas de ensaio e ângulos de incidência, pode-se concluir que:

- Os mecanismos de perda de massa, dos revestimentos YSZ 7Y 1,7Hf e YSZ 8Y, foram predominantemente pela intersecção de trincas advindas do impacto das partículas de erodente na superfície do material.

- A resistência a erosão do revestimentos YSZ 7Y 1,7Hf é maior que do revestimento YSZ 8Y. Sendo este comportamento decorrente, provavelmente, da maior porosidade e menor aderência da liga YSZ 8Y. Dessa forma, indica que os revestimentos que possuem uma menor porosidade e maior aderência entre as lamelas são mais resistentes ao processo de erosão.

- O aumento da temperatura de ensaio promoveu a um queda da taxa de erosão de ambos os revestimentos YSZ 7Y1,7Hf e YSZ 8Y.

- A taxa de erosão é diretamente proporcional aos perfis de rugosidade após ensaio de erosão para os revestimentos YSZ 7Y1,7Hf e YSZ 8Y, sendo assim, com a queda da taxa de erosão tem-se uma diminuição equivalente do perfil de rugosidades.

- O revestimento YSZ 7Y1,7Hf apresentou uma taxa de erosão crescente com o aumento do ângulo de incidência, sendo assim, o ângulo de 90° gerou uma maior taxa de erosão em relação ao ângulo de 30° em todas as condições que foram estudadas. Com o aumento da temperatura teve-se um aumento da queda da rugosidade ao longo dos dois ângulos utilizados e a erosão com um maior ângulo obteve uma maior queda do perfil de rugosidade.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, D. S. de. **Estudo de Revestimentos Cerâmicos Sobre Substrato Metálico, Obtidos por Deposição Física de Vapores por Feixe de Elétrons Para Aplicação Como Barreira Térmica**. Tese (Doutorado). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 177 p., 2005.

ALONSO, F.; FAGOAGA, I.; OREGUI, P. Erosion protection of carbon-epoxy composites by plasma-sprayed coatings. **Surface and Coatings Technology**, vol. 49, p. 482 - 488, 1991.

ANAND K.; HOVIS S.K.; CONRAD H.; SCATTERGOOD R.O. Flux effects in solid particle erosion. **Wear**, v. 118, p. 243 - 257, 1987.

AYGUN, A. **Novel Thermal Barrier Coatings (TBCs) that are Resistant to High Temperature Attack by CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ (CMAS) Glassy Deposits**. Tese (Doutorado), The Ohio State University, 176p., 2008.

BALL, A. The mechanisms of wear, and the performance of engineering materials. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy**, v. 86, p. 1 – 13, 1986.

BERGMANN, C. P.; VICENZI, J. Protection against erosive wear using thermal sprayed cermet. Berlin: **Springer**, 2011.

BIANCHI, L.; GRIMAUD, A.; BLEIN, F.; LUCCHESI, P.; FAUCHAIS, P. Comparison of plasma sprayed alumina and zirconia coatings by r.f. and d.c. plasma spraying, in C.C. Berndt and S. Sampath (eds.), **ASM International**, p. 575 – 579, 1994.

BOYCE, M. P. Gas Turbine Engineering Handbook. **Elsevier Inc.**, 4ª Edição, 2006.

CALLISTER JR., W. D., Materials science and engineering: an introduction , **John Wiley & Sons Inc**, 5ª Edição, 1999.

CERNUSCHI, F.; GUARDAMAGNA , C. ; CAPELLI , S.; LORENZONI , L.; MACK , D.E. ; MOSCATELLI, A. Solid particle erosion of standard and advanced thermal barrier coatings. **Wear**, vol. 348 – 349, p. 43 – 51, 2016.

CERNUSCHI, F.; GUARDAMAGNA, C.; LORENZONI, L.; CAPELLI, S.; KARGER, M.; VASSEN, R.; VON NIESSEN, K.; MARKOSCAN, N.; MENUHEY, J.; GIOLLI, C. Solid particle erosion of thermal spray and physical vapour deposition thermal barrier coatings. **Wear**, v. 271, p. 2909 – 2918, 2011.

CLARKE D.R.; OECHSNER M.; PADTURE N.P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines. **MRS bulletin** v. 37, 2012.

ĆURKOVIĆ, L.; KUMIĆ, I.; GRILEC, K. Solid particle erosion behavior of high purity alumina ceramics. **Ceramics International**, v. 37, p. 29 - 35, 2011.

ESTRADA, M; CARLOS, A. New technology used in gas turbine blade materials. **Scientia e Technica**, vol. XIII, p. 297-301, 2007.

ESKNER, M. **Mechanical Behavior of Gas Turbine Coatings**. Tese (Doutorado), Royal Institute of Technology, Stockholm, 64 p., 2004.

FANG, M.; LIU, F.; MIN, X.; HUANG, Z.; LIU, Y.; WU, X.; TANG, C.; ZHANG, L.; PENG, F. Effect of temperature on solid particle impact erosion wear mechanism of 5 mol% Yttria Stabilized Zirconia ceramics. **Ceramics International**, Vol 41, p. 6807 – 6811, 2015.

FIGUEIREDO, R. L. P. **Protótipo para ensaio de desgaste erosivo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - CEFET-PR, 2005.

FINNIE, I. Some reflections on the past and future of erosion. **Wear**, v. 186 - 187, p. 1-10, 1995.

HILL, M. D.; DOMINGUES, L. P. Creating an effective barrier. **Ceramic Industry**, v. 153, p. 17-19, 2003.

HUTCHINGS, I. M., Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials, **Editora Edward Arnold**, 1992.

HUTCHINGS, I. M., Wear by particles. **Chemical Engineering Science**, v. 42, p. 869 - 878, 1987.

IBÉGAZENE, H.; ALPERINE, S; DIOT, C. Yttria-stabilized hafnia-zirconia thermal barrier coatings: the influence of hafnia addition on TBC structure and high temperature behavior. **Journal of Materials Science**, v. 30, p. 938 – 951, 1995.

KATO, K. Tribology of ceramics. **Wear**, v. 136, p.117 - 133, 1990.

KLEIS, I.; KULU, P. Solid particle erosion. London: **Springer**, 2008.

KRISHNAMURTHY, N.; MURALI, M.S.; VENKATARAMAN, B.; MUKUNDA, P.G. Characterization and solid particle erosion behavior of plasma sprayed alumina and calcia-stabilized zirconia coatings on Al-6061 substrate. **Wear**, v. 274-275, p. 15-27, 2012.

LEVY, A.V.; WANG, B. Erosion of hard material coating systems. **Wear**, v. 121, p. 325-346, 1988.

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

LINDSLEY, B.A.; MARDER, A.R. The effect of velocity on the solid particle erosion rate of alloys. **Wear**, p. 510-516, 1999.

LIU, X. **A study on the erosion and erosion-oxidation of metal matrix composites**. Tese de doutorado, Helsinki University of Technology, 2003.

MARINESCU, I. D.; DOI, T. K.; UHLMANN, E. Handbook of ceramics grinding and polishing. **Elsevier, Inc.**, 485 p., 2015.

MASTERS, G. M. Renewable and Efficient Electric Power Systems. **John Wiley & Sons, Inc.**, 680 p., 2004.

MISRA, A.; FINNIE, I. On the size effect in abrasive and erosive wear. **Wear**, v. 65, p. 359 - 373, 1981.

NORMA ASTM C 633-13. Standard Test Method for Adhesion or Cohesion Strength of Thermal Spray Coatings, West Conshohocken, PA, 2013.

NORMA ASTM E 2109. Standard Test Method for Determining Area Percentage Porosity of Thermal Spray Coatings. West Conshohocken, PA, 2014.

NORMA ASTM E 384. Standard Test Method for Micro indentation Hardness of Materials, West Conshohocken, PA, 2011.

NORMA ASTM G 40-13. Standard Terminology Relating to Wear and Erosion, Annual Book of ASTM Standards, 2013.

NORMA ASTM G 76-05. Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets, Annual Book of ASTM Standards, 2005.

NORMA ISO 25178. Geometrical product specifications (GPS), surface texture, profile method, terms, definitions and surface texture parameters, ISO, 2012.

OERLIKON. [On-line]. Disponível em < <http://www.oerlikon.com>>. Acesso em Novembro de 2016.

OKA, Y.I.; MIHARA, S.; YOSHIDA, T. Impact-angle dependence and estimation of erosion damage to ceramic materials caused by solid particle impact. **Wear**, v. 267, p. 129–135, 2009.

PAWLOWSKI L.: The science and engineering of thermal spray coatings. Hoboken, **John Wiley and Sons Ltd.** 2008.

PRAXAIR SURFACE TECHNOLOGIES. [On-line]. Disponível em <<http://www.praxairsurfacetechologies.com/>>. Acesso em Novembro de 2016.

QU, Z.; CHENG, X.; WU, J.; HE, R.; PEI, Y.; FANG, D. An investigation on erosion behavior of nanostructured 7YSZ coatings at elevated temperature. **Surface & Coatings Technology**, v. 299, 2016.

RAMACHANDRAN, C.S.; BALASUBRAMANIAN, V.; ANANTHAPADMANABHAN, P.V. Erosion of atmospheric plasma sprayed rare earth oxide coatings under air suspended corundum particles. **Ceramics International**, v. 39, p. 649 – 672, 2013.

REVESTEEL. [On-line]. Disponível em < <http://www.revesteel.com.br/> >. Acesso em Novembro de 2016.

ROLLS-ROYCE. The Jet Engine. The Technical Publications Department, **Rolls-Royce plc**, Inglaterra, 5a Edição, 292 p., 1986.

ROY, M. Elevated temperature erosive wear of metallic materials. **Journal of physics: Applied Physics**: p. 101-124, 2006.

SCHMITT, M. P.; HARDER, B. J.; WOLFE D. E. Process-structure-property relations for the erosion durability of plasma spray-physical vapor deposition (PS-PVD) thermal barrier coatings. **Surface & Coatings Technology**, v. 297, p. 11–18, 2016.

SCHULZ, U.; SCHMÜCKER, M. Microstructure of ZrO₂ thermal barrier coatings applied by EB-PVD. **Materials Science and Engineering**, v. 276, p. 1-8, 2000.

SIMS, C. T.; STOLOFF, N. S.; HAGEL, W. C. Superalloys II. **John Wiley & Sons, Inc.**, 640 p., 1987.

SOBHANVERDI, R.; AKBARIN, A. Porosity and microstructural features of plasma sprayed Yttria stabilized Zirconia thermal barrier coatings. **Ceramics International**, v. 41, p. 14517 – 14528, 2015.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. Engineering Tribology. **Elsevier**, 2001.

STACK, M.M.; STOTT, F.H. The significance of velocity exponents in identifying erosion-corrosion mechanisms. **Journal de Physique**, v. 111, p. 687-694, 1993.

SULZER METCO. [On-line]. Disponível em < <http://www.sulzermetco.com> >. Acesso em Novembro de 2016.

SUNDARARAJAN, G.; ROY, M. Solid particle erosion behavior of metallic materials at room and elevated temperatures. **Tribology International**, p. 339-359, 1997.

TSIPAS, S.A. Effect of dopants on the phase stability of zirconia-based plasma sprayed thermal barrier coatings. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 30, p. 61–72, 2010.

VANAT, K.J. **Influência da temperatura de pré-aquecimento sobre a morfologia e ciclos térmicos de revestimentos YSZ**. Dissertação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 111 p., 2015.

VICENZI, J. **Relação entre microestrutura e erosão (a frio e a quente) de revestimentos do sistema NiCr-Cr₃C₂ obtidos por aspersão térmica**. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

WANG, B. Q.; GENG, G.Q.; LEVY, A.V. Erosion-Corrosion of Thermal Spray Coatings, **Surface and Coatings Technology**, v. 43-44, p. 859-874, 1990.

WANG, B. Q. Erosion-corrosion of thermal sprayed coatings in FBC boilers. **Wear**, v. 199, p. 24-32, 1996.

WELLMAN, R.G.; NICHOLLS, J.R. A review of the erosion of thermal barrier coatings. **Journal of Physics: Applied Physics**, p. 293 - 305, 2007.

WENSINK, H.; ELWENSPOEK, M.C. A closer look at ductile-brittle transition in solid particle erosion. **Wear**, p. 1035-1043, 2002.

ZHAVI, J.; SCHMITT JR, G.F. Solid particle erosion of reinforced composite materials. **Wear**, v. 71, p. 179-190, 1981.

ZHOU, J.; BAHADUR, B. SEM studies of material damage in alumina ceramics by angular single and multiple particle impacts. **Wear**, v. 162 – 164, p. 285 – 295, 1993.