



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO – UFOP

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



ALBERTO DE ALMEIDA BOSSI GUIMARÃES

**REVESTIMENTO DO TIPO BARREIRA TÉRMICA EM
PALHETAS DE TURBINA A GÁS: ESTADO DA ARTE**

**OURO PRETO - MG
2019**

ALBERTO DE ALMEIDA BOSSI GUIMARÃES
alberto.almeida.guimaraes@outlook.com

REVESTIMENTO DO TIPO BARREIRA TÉRMICA EM PALHETAS DE TURBINA A GÁS: ESTADO DA ARTE

Monografia apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para aprovação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, de aprovação obrigatória para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico, sob a orientação do Professor Adilson Rodrigues da Costa.

Professor orientador: Adilson Rodrigues da Costa

OURO PRETO – MG
2019

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G963r Guimarães, Alberto De Almeida Bossi .
Revestimento do tipo barreira térmica em palhetas de turbina a gás
[manuscrito]: estado da arte. / Alberto De Almeida Bossi Guimarães. - 2019.
49 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Adilson Rodrigues da Costa.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas.

1. Turbina a gás. 2. Revestimentos - Barreira térmica. 3. Revestimentos -
Processos - Deposição Física por Vapores por Feixe de Elétrons (EB-PVD). 4.
Turbina a gás - Palheta. 5. Revestimentos - Processos - aspersão térmica por
plasma (APS) . I. Costa, Adilson Rodrigues da. II. Universidade Federal de Ouro
Preto. III. Título.

CDU 621



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA

Aos 05 dias do mês de Dezembro de 2019, às 15h 00min, no auditório da Fundação Gorceix, localizado na Escola de Minas – Campus - UFOP, foi realizada a defesa de Monografia do aluno Alberto de Almeida Bossi Guimarães, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof. PhD Adilson Rodrigues da Costa, Prof^ª. PhD. Ana Maura Araújo Rocha e Prof. DSc. Edson Alves Figueira Júnior. O candidato apresentou o trabalho intitulado: **“Revestimento do Tipo Barreira Térmica em Palhetas de Turbina a Gás: Estado da Arte”**, sob orientação do Prof. PhD Adilson Rodrigues da Costa. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o(a) aluno(a) APROVADO.

Ouro Preto, 05 de Dezembro de 2019

Prof. PhD Adilson Rodrigues da Costa
Professor Orientador

Prof. PhD. Ana Maura Araújo Rocha
Professor Avaliador

Prof. DSc. Edson Alves Figueira Júnior
Professor Avaliador

Alberto de Almeida Bossi Guimarães

Aluno(a)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao mundo: pessoas, lugares e o amor que nos une. À UFOP pelo ensino público e de qualidade. Aos meus professores pela arte de lecionar. Ao Adilson pelo incentivo neste trabalho e pelos ensinamentos. À minha família pela constante torcida nos estudos e amor sem igual. À Reframax Engenharia, por me receber e me acolher como estagiário.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é apresentar o estado da arte sobre os avanços tecnológicos dos revestimentos térmicos para palheta de turbina a gás. As turbinas são equipamentos extremamente importantes para nossa sociedade, principalmente, no que tange à sua utilização como meio de propulsão para locomoção ou para geração de energia elétrica. O presente estudo analisa uma forma para aumentar a eficiência das turbinas, através do aumento da temperatura dos gases que circulam dentro dela. Para isso, é necessário revestir as palhetas para proteger a metal base da alta temperatura e dos efeitos negativos dos gases da combustão. Os métodos de estudos apresentados são aspensão térmica por plasma (APS) e deposição física por vapores por feixe de elétrons (EB-PVD). O trabalho é baseado em estudo literário, a fim de verificar a eficiência dos revestimentos, comparando os resultados, necessários à esta análise. Assim, verificou-se que a qualidade do revestimento é de grande importância por otimizar o uso das palhetas de turbina a gás, de modo que os materiais utilizados e os métodos de aplicação, estão diretamente ligados a durabilidade da palheta.

Palavras-chave: Turbina a gás, Revestimento do tipo barreira térmica, Palheta, APS, EB-PVD.

ABSTRACT

The purpose of this work is to present the state of the art on the technological advances of gas turbine blades thermal coatings. Turbines are extremely important equipment for our society, especially regarding its use as a means of propulsion for locomotion or for electric power generation. The present study examines a way to increase the efficiency of turbines by increasing the temperature of the gases circulating within it. This requires coating the blades to protect the base metal from high temperature and the negative effects of combustion gases. The study methods presented are air plasma spraying (APS) and electron beam physical vapor deposition (EB-PVD). The work is based on literary study, in order to verify the efficiency of the coatings, comparing the results, necessary for this analysis. Thus, it was found that the quality of the coating is of great importance as it optimizes the use of gas turbine vanes, so that the materials used and application methods are directly linked to the durability of the vane.

Key-words: Gas turbine, Thermal Barrier Coating, Turbine blades, APS, EB-PVD.

LISTA DE ABREVIACÕES

AMR – Laboratório de Divisão de Materiais

APS – Aspersão Térmica por Plasma (*Air Plasma Sprayed*)

CET – Coeficiente de expansão térmica

CTA – Centro Técnico Aeroespacial

EB-PVD – Deposição Física de Vapores por Feixe de Elétrons (*Electron Beam – Physical Vapour Deposition*)

EM – Escola de Minas

HVOF – High Velocity Oxygen/Fuel

IAE – Instituto de Aeronáutica e Espaço

IR – Infravermelho

ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MCrAlY – Ligas metálicas onde o M pode ser Ni, Co e/ou Fe

NiCrAlY – Liga Níquel, Cromo, Alumínio e Ítrio

PS – Aspersão Térmica por Plasma (*Plasma Sprayed*)

TBC – Revestimentos do tipo Barreira Térmica (*Thermal Barrier Coating*)

TGO – Camada de Óxido Crescida Termicamente (*Thermally Grown Oxide*)

TMF – Teste De Fadiga Termomecânica (*Thermomechanical Fatigue Testing*)

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

YSZ – Liga de óxido de zircônio estabilizada com óxido de ítrio

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{W} – Trabalho

\dot{Q}_e – Calor que entra

\dot{Q}_s – Calor que sai

P – Pressão

V – Volume

T – Temperatura

S – Entropia

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis e Indicadores.....	30
Tabela 2 – Parametrização do revestimento da camada ligante	39
Tabela 3 – Parametrização do revestimento da camada cerâmica.....	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de uma turbina a gás	13
Figura 2 - Funcionamento de uma turbina a gás	14
Figura 3 – Ciclo Brayton Ideal	15
Figura 4 - Compressor Centrífug	16
Figura 5 - Distribuição de Ar na Câmara de Combustão	17
Figura 6 - Evolução do material da palheta	19
Figura 7 - Palhetas do primeiro estágio da turbina	21
Figura 8 - Estrutura da multicamadas de um TBC	22
Figura 9 - Processo de APS	24
Figura 10 - Processo de EB-PVD	25
Figura 11 – Microscopia eletrônica das colunas na camada superior	26
Figura 12 - Diferenças da micrografia EB-PVD (a) e APS (b)	27
Figura 13 - Fluxograma dos métodos	29
Figura 14 – Palheta Usinada	33
Figura 15 - Peça com revestimento térmico	34
Figura 16 - Arranjo do fluxo de forno experimentad	34
Figura 17 - Palheta com o tubo de resfriamento e os termopares	35
Figura 18 - Temperatura da palheta para cada temperatura de entrada	36
Figura 19 - Processo de chama direta para o teste de gradiente térmico	41
Figura 20 - Resultado gráfico da amostra submetida a laser CO2 no teste de gradiente térmico	42
Figura 21 – Microscopia da amostra falha por fadiga termomecânica	43
Figura 22 – Arranjo do ensaio de detecção por luminescência (esquerda) e gráfico luminescência x pirômetro óptico (direita)	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Formulação do Problema.....	9
1.2	Justificativa.....	10
1.3	Objetivos.....	11
1.3.1	Objetivos Gerais	11
1.3.2	Objetivos Específicos	11
1.4	Estrutura do trabalho	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Turbina a gás	13
2.1.1	Funcionamento	13
2.1.2	Principais componentes: Compressor.....	15
2.1.3	Principais componentes: Câmara de combustão	16
2.1.4	Principais componentes: Turbina	17
2.2	Palhetas Rotativas da Turbina	18
2.3	Revestimentos para Palhetas	20
2.3.1	Estrutura das multicamadas em um TBC	21
2.3.2	APS – Air Plasma Spraying	23
2.3.3	EB-PVD - <i>Electron Beam Physical Vapor Deposition</i>	25
2.4	Comparação entre os métodos	27
3	METODOLOGIA.....	28
3.1	Tipo de pesquisa	28
3.2	Materiais e Métodos	29
3.3	Variáveis e Indicadores	30
3.4	Instrumento de coleta de dados	30
3.5	Tabulação dos dados.....	30
3.6	Considerações finais do capítulo	31
4	RESULTADOS	32
4.1	Dissertação: Efeito da barreira térmica em uma palheta AISI 316 utilizada para turbina a gás. Autor Leandro Augusto Souza.....	32
4.1.1	Construção da palheta.....	33
4.1.2	Aplicação do revestimento	33
4.1.3	Forno de fluxo	34

4.1.4	Resultados.....	35
4.1.5	Conclusão	36
4.2	Dissertação: Estudo de revestimentos cerâmicos sobre substrato metálico, obtidos por deposição física de vapores por feixe de elétrons para aplicação como barreira térmica. Autor Daniel Soares de Almeida	38
4.2.1	Equipamentos e materiais.....	38
4.2.2	Metodologia.....	39
4.2.3	Resultados.....	40
4.3	Artigo: Testes e avaliações em revestimentos por barreira térmica. Autores Robert Vaßen, Yutaka Kagawa, Ramesh Subramanyan, Paul Zombo e Dongming Zhu	41
4.3.1	Teste de gradiente térmico.....	41
4.3.2	Fadiga termomecânica (TMF).....	42
4.3.3	Avaliação sensorial e não destrutiva - Detecção de luminescência.....	43
4.3.4	Imagem infravermelha.....	44
4.3.5	Conclusões.....	45
4.4	Discussão geral	46
5	CONCLUSÃO.....	47
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

1 INTRODUÇÃO

As turbinas a gás são equipamentos responsáveis destinados à propulsão aeronáutica, marítima e à geração de energia elétrica. Atualmente, diversos estudos estão sendo desenvolvidos na busca do aumento de sua eficiência, que depende de vários fatores, como, materiais utilizados em sua construção, poder calorífico do combustível, aumento da temperatura e pressão dos gases, entre outros. No presente trabalho é dada ênfase ao revestimento térmico dos materiais das partes internas da turbina a gás, especificamente suas palhetas. Esse revestimento possibilita obter uma maior temperatura dos gases que circulam dentro da turbina, aumentando sua eficiência. Como forma de contribuir para esses estudos, este trabalho tem como proposta uma revisão bibliográfica dos desenvolvimentos implementados nesta área da engenharia de materiais.

A seguir tem-se uma descrição da formulação do problema, das justificativas, dos objetivos e da estrutura do trabalho.

1.1 Formulação do Problema

O termo turbina a gás é mais comumente empregado em referência a um conjunto de três equipamentos: compressor, câmara de combustão e turbina propriamente dita. A turbina propriamente dita é responsável pela produção de energia mecânica. Essa energia vem através da transformação da energia cinética dos gases, após a carburado o ar na câmara de combustão. O compressor consome parte dessa energia mecânica, e a energia restante é responsável pela geração de energia elétrica, para geradores, ou empuxo, no caso de aeronaves.

A turbina resulta da combinação de conhecimentos específicos. O ar é comprimido pelo compressor, queimado parcialmente na câmara de combustão e posteriormente projetado em uma série de palhetas para gerar energia mecânica. A limitação metalúrgica é um dos focos de estudos considerados principais. No caso da turbina, seu desempenho é maior quanto maior for sua temperatura. Porém, a temperatura é um fator limitante, pois o material utilizado no primeiro estágio da turbina, precisa suportar os altos níveis de temperatura (COHEN, ROGERS e SARAVANAMUTTOO, 1996).

O revestimento das palhetas da turbina é necessário pois a vida útil do material da palheta depende da resposta do material à corrosão, a alta temperatura, mesmo com o aumento da resistência mecânica das ligas metálicas utilizadas em sua construção (BOYCE, 2002).

O recobrimento das palhetas é o responsável por melhorar a eficiência e a vida útil das mesmas. O revestimento do tipo barreira térmica (TBC, em inglês *Thermal Barrier Coating*) foi introduzido no intuito de aumentar a vida útil das partes da câmara de combustão da turbina, e somente na década de 80, TBC foi usado nas palhetas rotativas pela primeira vez (CLARKE, OECHSNER e PADTURE, 2012).

Existem vários métodos de revestimentos diferentes, cada um deles com uma propriedade única. Os métodos de revestimento têm como finalidade diminuir a corrosão e evitar a fusão do metal substrato a partir do controle da porosidade do revestimento para proteção e redução da condutividade térmica (CLARKE, OECHSNER e PADTURE, 2012).

Os processos de deposição de revestimentos reúnem-se em diversos métodos, como por aspersão térmica, ramificando em: HVOF (em inglês *High Velocity Oxygen Fuel*) e APS, Aspersão Térmica por Plasma (em inglês, *Air Plasma Sprayed*); como no processo EB-PVD – Deposição Física de Vapores por Feixe de Elétrons (em inglês, *Electron Beam – Physical Vapour Deposition*) (MARTENA, 2006; apud SOUZA, 2017).

Atualmente, os principais métodos de deposição de TBC para revestimento das palhetas de turbinas a gás são Aspersão Térmica por Plasma (APS) e Deposição Física de Vapores por Feixe de Elétrons (EB-PVD). Segundo Clarke, o primeiro método é mais utilizado em partes de turbinas estacionárias (combustor, anel de consolidação, palhetas de estator), e o EB-PVD é usado nas partes submetidas a altas temperaturas e esforços mecânicos, como as palhetas. Neste trabalho, daremos ênfase na revisão dos conceitos e avanços proporcionados pelas duas tecnologias: APS e EB-PVD.

Portanto, podemos formular o seguinte questionamento:

Qual a eficiência, ganhos e desafios dos métodos APS e EB-PVD na produção de revestimentos de palhetas de turbina a gás?

1.2 Justificativa

Turbinas são equipamentos que envolvem alto investimento financeiro. Desse modo, o aumento da eficiência da turbina a gás está diretamente associado ao custo, pois de acordo com a durabilidade dos seus elementos é definido o custo de operação da mesma, principalmente os que estão submetidos a elevadas temperaturas (REYHANI, apud SOUZA 2017)

Atualmente, é notado uma considerável demanda nos métodos de proteção térmica da palheta da turbina. O revestimento que se destaca na utilização é o *Thermal Barrier Coating* (TBC), que é a pulverização de um material cerâmico sobre o substrato metálico permitindo aumentar a temperatura de trabalho do componente (CLARKE, OECHSNER e PADTURE, 2012).

O presente trabalho visa apresentar métodos de produção de barreiras térmicas para aplicação em palhetas de turbina a gás, com foco nos processos APS e EB-PVD.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Gerais

Resumir o estado da arte acerca de revestimentos de proteção de palhetas de turbinas a gás, a fim de aumentar sua eficiência por meio do aumento da temperatura dos gases que circulam na turbina, mantendo desempenho estrutural adequado às exigências relacionadas ao aumento de vida útil do equipamento.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Realizar um levantamento sobre as tecnologias disponíveis e em desenvolvimento de revestimentos para palhetas de turbina a gás;
- Destacar no levantamento os métodos APS e EB-PVD;
- Apresentar e analisar trabalhos existentes na literatura, incluindo a instituição sede deste trabalho, EM. UFOP;
- Fazer uma análise sobre o tema no cenário brasileiro;
- Analisar o estágio atual do tema pesquisado, obtendo as melhores alternativas e inovações tecnológicas para o caso.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. O primeiro capítulo contém a formulação do problema, a justificativa da realização do trabalho e os objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos de turbina a gás, revestimentos térmicos, métodos existentes para revestimento de superfícies de materiais, com destaque para os métodos APS e EB-PVD.

O terceiro capítulo detalha a metodologia empregada para a pesquisa bibliográfica e os métodos de pesquisa utilizados.

O quarto capítulo é constituído por uma síntese das pesquisas realizadas no tema e os seus respectivos resultados.

No quinto capítulo apresentamos uma conclusão destacando os avanços e os desafios a serem enfrentados com novas pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata sobre as turbinas a gás, analisando os seus principais componentes e o princípio de seu funcionamento. Aborda sobre os métodos de revestimentos aplicados em palhetas de turbina a gás, que é o objeto de estudo do trabalho, e os principais métodos de revestimentos APS e EB-PVD.

2.1 Turbina a gás

2.1.1 Funcionamento

A turbina a gás (Figura 1) é um conjunto de três equipamentos: compressor, câmara de combustão e turbina propriamente dita. A construção ocorre de forma que seja necessário um aumento de temperatura do ar, para que ele entre na turbina, propriamente dita, com mais energia. Caso contrário, a turbina forneceria energia somente para acionar o compressor, e vice-versa. Isso torna a inserção da câmara de combustão um fator importante, pois a mesma adiciona energia através da queima de combustível, para elevar a temperatura do fluido antes de se expandir na turbina (COHEN, ROGERS e SARAVANAMUTTOO, 1996).

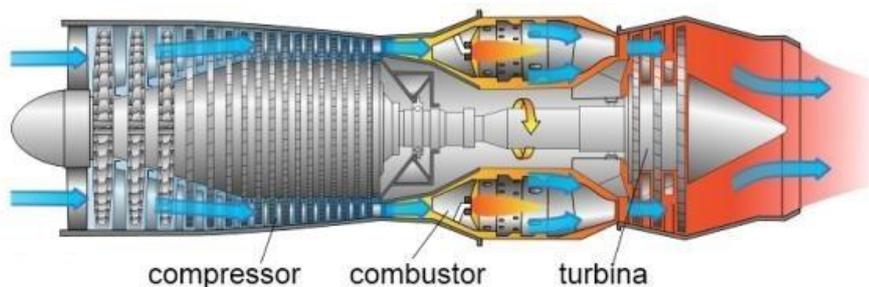


Figura 1 – Esquema de uma turbina a gás
Fonte: Site da Tecmundo

Na Figura 2, é possível ver o simples funcionamento de uma turbina a gás, onde \dot{W} é o trabalho gerado, \dot{Q}_e é a energia que entra na câmara de combustão e \dot{Q}_s energia liberada.

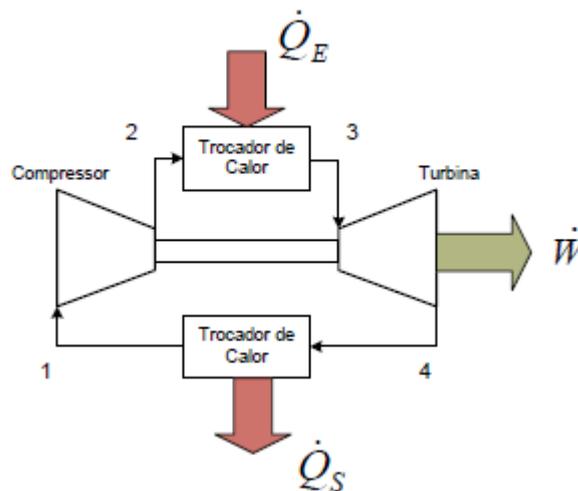


Figura 2 - Funcionamento de uma turbina a gás
 Fonte: Pesquisa direta 2019

Essa configuração forma um ciclo termodinâmico a gás, cujo modelo ideal denomina-se Ciclo Brayton, concebido por George Brayton em 1870. Ele é um ciclo ideal, uma aproximação dos processos térmicos que ocorrem nas turbinas a gás, descrevendo variações de estado (pressão e temperatura) dos gases. O conceito é utilizado como base didática e para análise dos ciclos reais, que se desviam do modelo ideal, devido a irreversibilidade.

A Figura 3 mostra o ciclo Brayton em dois diagramas, um digrama pressão-volume ($P \times V$) e outro temperatura-entropia ($T \times S$). Ele é composto por quatro etapas: uma compressão isentrópica dentro de um compressor, onde o ar é comprimido ao longo da linha 1-2; fornecimento de calor isobaricamente, em que é queimado o combustível na câmara de combustão gerando aumento de temperatura e volume do ponto 2-3; expansão isentrópica dentro de uma turbina, onde o fluido passa pelas diversas palhetas do processo no 3-4, e por fim a perda de calor isobaricamente. O ponto 3 é o ponto que determina a temperatura do fluido que entra na turbina, é a partir dessa temperatura, que se pode aumentar a eficiência através da maior energia absorvida pela turbina (BOYCE, 2002).

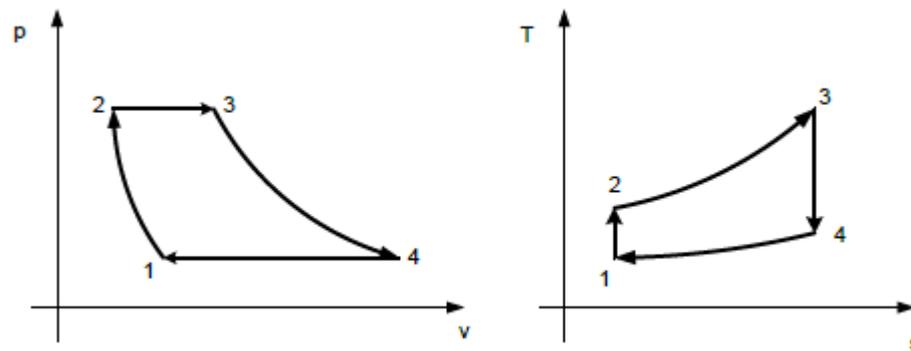


Figura 3 – Ciclo Brayton Ideal
 Fonte: Livro Boyce, 2002

O desempenho das turbinas é influenciado diretamente pela temperatura, pressão e outros parâmetros de trabalho. Com o aumento do desempenho da turbina aumenta a geração de potência de saída. Com o crescimento da potência gerada, é possível construir turbinas menores. Assim, confeccionam-se turbinas com alta razão potência/peso. (BOYCE, 2002)

2.1.2 Principais componentes: Compressor

O compressor é responsável por fornecer à turbina ar comprimido a altas pressões estáticas. Existem dois principais tipos de compressores: os axiais e os radiais, em que o fluxo se relaciona com os nomes.

Os compressores de fluxo axial são aqueles em que o escoamento acontece na direção do eixo do rotor. Eles são em sua maioria utilizados em turbinas a gás, particularmente, as de maior tamanho. Este tipo de compressores é construído normalmente com múltiplos estágios. Os compressores radiais se caracterizam pelo escoamento, que entra no rotor paralelo ao eixo e sai dele perpendicular ao mesmo. Eles são utilizados nos sistemas de turbocompressor em motores alternativos (de combustão interna a pistão). Não obstante, são também utilizados em certos tipos de turbinas a gás, particularmente aqueles de menor potência (COHEN, ROGERS e SARAVANAMUTTOO, 1996).

Em termos gerais, as pás do rotor do compressor transformam a energia cinética do fluido em pressão. O fluido passa por uma série de palhetas que com determinado ângulo de incidência vão comprimindo o ar para que este aumente a pressão e temperatura. O trabalho realizado pelo compressor aquece o ar entre 200 a 550°C, para, assim, entrar na câmara de combustão (ROLLS-ROYCE, 1996, apud SOUZA, 2017).

Na Figura 4, é mostrado um compressor centrífugo de uma turbina a gás.

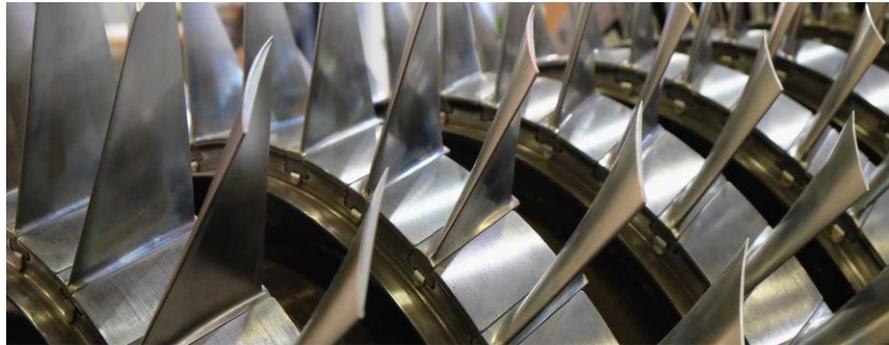


Figura 4 - Compressor Centrífugo
Fonte: Site da Swri

Os materiais dos compressores são importantes para garantir um bom funcionamento da turbina. Fibras de carbono são usadas para as pás iniciais como material base e para as palhetas internas, nos estágios em que possuem maior esforços, palhetas de liga que suportam elevadas temperaturas e tensões. Geralmente são elementos de liga que amenizam o efeito da corrosão e fratura por fadiga (ROLLS-ROYCE, 1996, apud SOUZA, 2017).

2.1.3 Principais componentes: Câmara de combustão

Depois de comprimido, o fluido entra na seção de combustão, também chamada de combustor. A seção de combustão é responsável por controlar a queima de grandes quantidades de combustível e ar. Assim, deve liberar o calor de maneira que o ar seja expandido e acelerado para fornecer o fluxo suave e estável de gás uniformemente aquecido em todas as condições de partida e operação. Essa tarefa deve ser realizada com um mínimo de perda de pressão e liberação máxima de calor (BOYCE, 2002).

Os revestimentos dos materiais de combustão devem ser posicionados de modo a fornecer um maior controle do calor, e evitar que as chamas danifiquem as peças da câmara. A quantidade de combustível injetado para a mistura ar combustível é ligada a temperatura de saída do gás na câmara de combustão. Essa relação deve ser controlada para que a temperatura garanta um fluxo uniforme do fluido para adentrar à turbina propriamente dita. (BOYCE, 2002; COHEN, ROGERS e SARAVANAMUTTOO, 1996).

Devido ao alto volume de ar que é consumido no compressor, menos de 30% do ar é utilizado na combustão e logo após a queima, este fluido é misturado. Como pode ser visto na Figura 5, a combustão é dividida em zona primaria e zona de diluição (BOYCE, 2002):

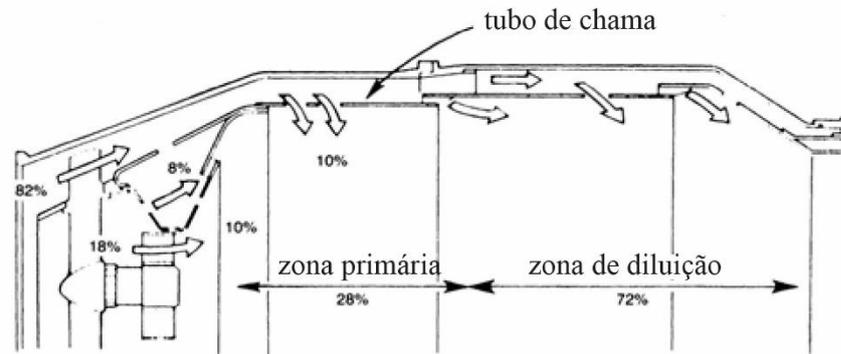


Figura 5 - Distribuição de Ar na Câmara de Combustão
 Fonte: Livro do BOYCE, 2002

Após a combustão, o ar comprimido do compressor é adicionado de forma gradual ao ar carburado. Isso porque, a diluição dos dois fluidos deve ser uniforme e constante para que o fluido saia da câmara de combustão na temperatura e vazão desejada.

2.1.4 Principais componentes: Turbina

A turbina tem o papel de extrair a energia cinética do gás, transformando-a em energia mecânica, através da expansão o fluido que sai da câmara de combustão, com alta pressão e temperatura, por meio das palhetas rotoras à temperatura e pressão mais baixas (BOYCE, 2002).

Cada estágio da turbina consiste em uma fileira de pás estacionárias seguidas por uma fileira de lâminas rotativas. Isso é o contrário da ordem no compressor. Na turbina, as pás do estator aumentam a velocidade do gás e, em seguida, as pás do rotor absorvem a energia cinética dos gases, gerando um momento, que através da rotação das mesmas, irá transformar esta energia em energia mecânica. As palhetas e lâminas são aerofólios que fornecem um fluxo suave nos gases.

A eficiência da turbina é determinada pela razão do trabalho líquido extraído do fluxo de gases. De acordo com a segunda lei da termodinâmica, há perdas pelo calor, limitando a eficiência da mesma. O posicionamento correto de aerofólios permite um fluxo suave e expansão de gases através das lâminas e palhetas da turbina (BOYCE, 2002).

O primeiro estágio da turbina resiste à combinação de alta temperatura, alta pressão e alta rotação, e usualmente é o componente limitante da turbina. Esse estágio opera em um

ambiente com grandes esforços centrífugos e uma alta temperatura do gás, o que implica uma maior atenção nos componentes desta área (SCHILKE, apud SOUZA, 2017). Essa é a região que mais sofre devido às condições que são apresentadas, e o revestimento tratado nesse trabalho trata exatamente das palhetas neste local.

2.2 Palhetas Rotativas da Turbina

As palhetas são componentes importantes para o funcionamento de uma turbina: São elas que, com as devidas propriedades mecânicas e químicas, vão garantir o funcionamento ideal com os gases nas temperaturas mais altas, de modo a aumentar a sua eficiência. Para a composição das palhetas, são utilizadas ligas com resistência à corrosão e aos esforços mecânicos, porém, elas possuem alto custo agregado (SIVAKUMAR e MORDIKE, 1989).

Para o desenvolvimento da palheta são utilizados metais de transição como ferro e níquel, bem como a adição de cromo, alumínio e silícios. Essa composição de materiais é denominada superliga, uma liga metálica que apresenta elevada resistência mecânica e resistência à fluência a altas temperaturas, boa estabilidade superficial, e resistência à corrosão e oxidação. Essas características são possíveis devido a uma matriz com uma estrutura cristalina austenítica cúbica centrada nas faces (PADTURE, GELL e JORDAN, 2002).

Mesmo com ligas resistentes mecanicamente e antioxidantes, é necessária a utilização de metais refratários (elevados pontos de fusão) como molibdênio, tungstênio e nióbio, para garantirem um aumento no ponto de fusão do material. Para o aumento da vida útil e uma maior proteção à superfície de contato, tornou-se necessária a criação de um revestimento para amenizar seu desgaste (SIVAKUMAR e MORDIKE, 1989).

A Figura 6, mostra o desenvolvimento ao longo do tempo do material utilizado na produção das palhetas e dos tipos de TBC's utilizados na construção das mesmas. É possível perceber que em 50 anos, houve um aumento de 450°C na temperatura suportável do componente. (CLARKE, OECHSNER e PADTURE, 2012).

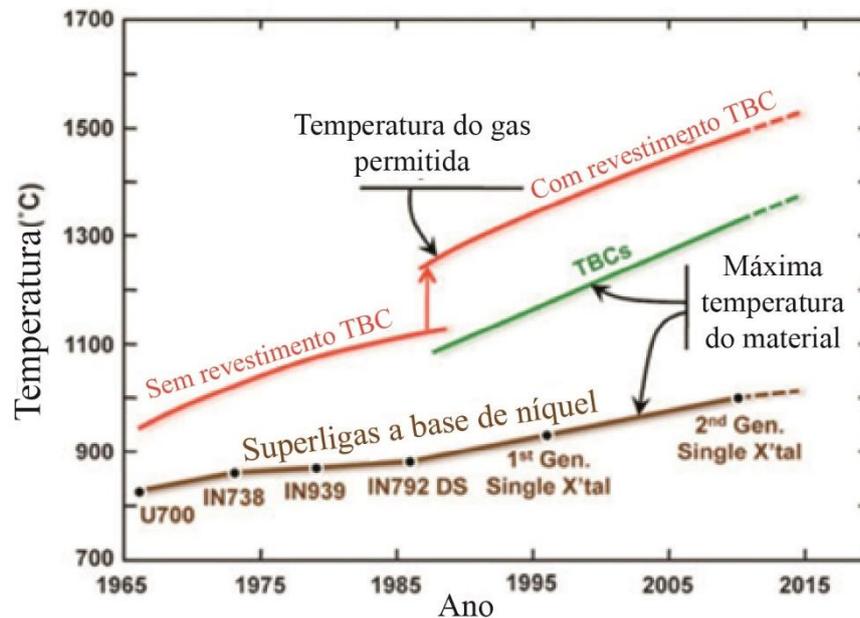


Figura 6 - Evolução do material da palheta
 Fonte: Artigo de Clarke, 2012

As palhetas hoje são produzidas em ambiente controlado para que sejam monocristalinas, sendo somente um grão beneficiado para o crescimento. As superligas são produzidas de níquel ou cobalto, metais de transição, e geralmente possuem outros elementos para melhorar alguma propriedade específica, como a resistência à alta temperatura, ductilidade, resistência à oxidação e resistência à corrosão à quente (PADTURE, apud SOUZA 2017).

2.3 Revestimentos para Palhetas

Revestimentos de Barreira Térmica (TBC) são cerâmicas de óxido refratário aplicados nas superfícies das partes metálicas criando uma barreira térmica física. Nas turbinas, o revestimento permite que os componentes operem a temperaturas significativamente mais elevadas. Muitos fatores de projeto de engenharia influenciam a eficiência dos motores de turbina a gás, mas um passo importante no aumento temperatura do motor e eficiência do motor, foi a introdução de TBC's.

Atualmente, tem-se usado como composição o dióxido de zircônio e óxido de ítrio. Normalmente feito com ~7% em peso de Y_2O_3 estabilizado com ZrO_2 (7YSZ) (CLARKE, OECHSNER e PADTURE, 2012).

O revestimento TBC, que possui de 100 μ m a 1mm, é usado junto a um sistema de resfriamento interno na palheta, promovendo uma redução de 100° a 300° C na temperatura de superficial do material. Isso permite que a palheta funcione acima da sua temperatura de fusão, promovendo um ganho na eficiência (PADTURE, apud SOUZA, 2017).

A aplicação desse revestimento ocorre em forma de filme em camada bem fina. Alguns cuidados devem ser tomados para que o revestimento seja corretamente aplicado. Primeiramente, o substrato metálico deve ter uma superfície que esteja apta a adesão do revestimento cerâmico. Ele deve ser aplicado a uma alta taxa de deposição, para que sua porosidade seja incorporada. Essa porosidade, geralmente na faixa de 15% é essencial para as altas tensões de conformidade sofridas e redução da condutividade térmica (CLARKE, OECHSNER e PADTURE, 2012).

Na Figura 7, é possível ver uma palheta de turbina a gás, em que, do lado esquerdo, foi aplicado o revestimento térmico e, no direito, não.

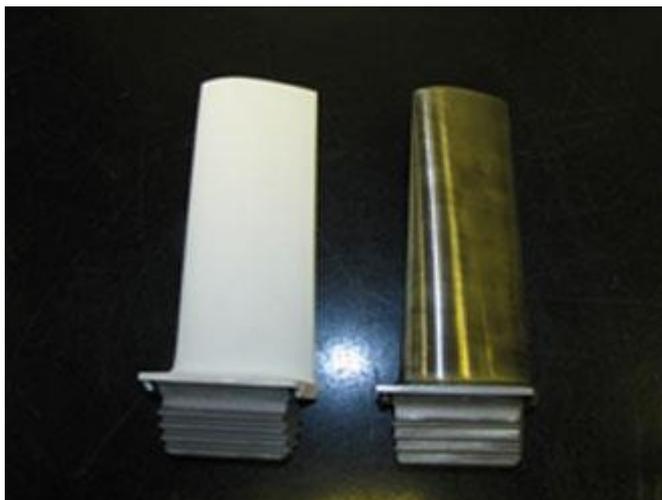


Figura 7 - Palhetas do primeiro estágio da turbina
Fonte: Site Mettech

Atualmente, os TBC's em palhetas são depositados Pulverização de Plasma de Ar (APS) ou por Vapor Físico de Feixe de Elétrons por Deposição (EB-PVD). Normalmente, o método APS de baixo custo é usado para depositar TBC's em peças de motor estacionárias (combustor, mortalha, palhetas), enquanto EB-PVD são utilizados em peças que estão em movimento à elevadas temperaturas como palhetas do primeiro estágio da turbina (CLARKE, OECHSNER e PADTURE, 2012).

Hoje, ambas as partes estacionárias e giratórias das partes quentes de turbinas para geração de energia, utilizam o método APS para aplicação de revestimento térmico (CLARKE, OECHSNER e PADTURE, 2012).

2.3.1 Estrutura das multicamadas em um TBC

A barreira térmica consiste em uma ligação metálica entre o substrato e o material aderente. É composta por três camadas distintas: camada de ligação (em inglês, *Bond Coat*), camada responsável pela adesão do revestimento, uma camada de óxido promovida pelo aumento da temperatura (*Thermally Grown Oxide* – TGO) e uma camada superior (em inglês, *top coat*) composta pelo material capaz de suportar altas temperaturas, geralmente uma liga de zircônia. O TGO alcança uma espessura de 0.1 – 10 μm , enquanto a camada de ligação e camada superior possuem aproximadamente 50 – 300 μm . (SUNG RYUL CHOI, JOHN W. HUTCHINSON, A.G. EVANS, 1999). O esquema das multicamadas pode ser visualizado na Figura 8.

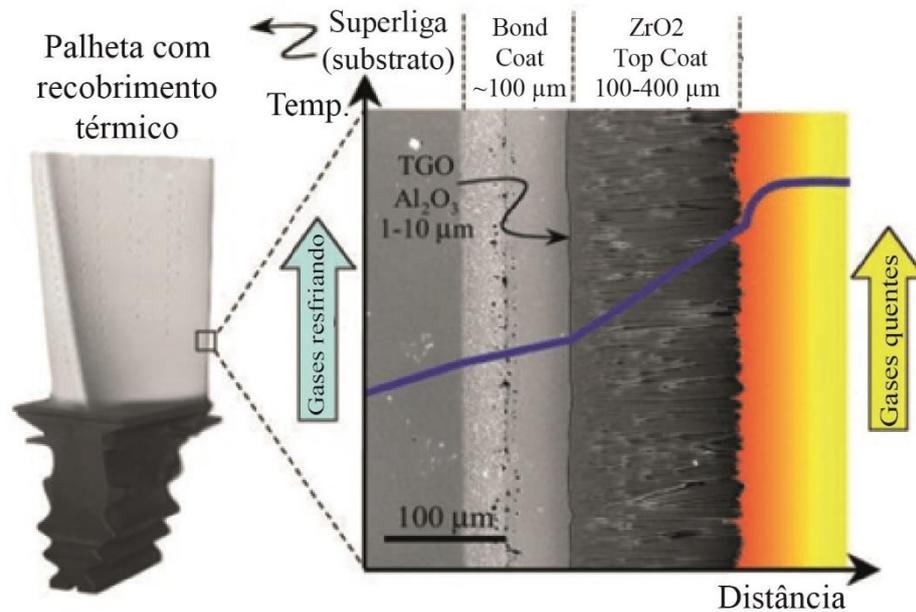


Figura 8 - Estrutura da multicamadas de um TBC
 Fonte: Site Researchgate

A *bond coat* possui a função promover resistência à oxidação e uma superfície adequada para a adesão da *top coat*. Atualmente, é utilizado como material para a *bond coat* o MCrAlY, uma liga rica em cromo, alumínio e ítrio, que promove adesão ao TGO. A espessura da TGO é um dos fatores decisivos em relação à vida útil dos componentes revestidos, pois sua espessura cresce com o aumento do tempo de operação, e esse crescimento pode acarretar falhas na TBC (MARTENA apud SOUZA, 2017).

Já a *top coat* é composta por materiais refratários que tem como característica o alto ponto de fusão. O óxido de zircônio (este denominado zircônia) dopado com óxido de ítrio (denominado ítria), conhecido como *Ytria-stabilized zirconia* (YSZ), é o material utilizado na *top coat* devido as suas propriedades como alto isolamento térmico, o seu coeficiente de expansão térmica baixo. Este material também tem elevada dureza, o que protege as palhetas no caso de impacto com objetos estranhos (CLARKE, apud SOUZA, 2017).

A *top coat* é projetada para ter uma resistência ao deslocamento e evitar a delaminação, pois permite que o material se incorpore a microtrincas ou alinhe-se à porosidade no material, a fim de eliminar a delaminação (BHATNAGAR apud SOUZA, 2017).

2.3.2 APS – Air Plasma Spraying

Aspersão térmica a plasma por arco não transferido é um dos métodos mais utilizados na produção das TBCs, pois é um procedimento de baixo custo e de boa eficiência no resultado. O plasma por arco elétrico é responsável pela elevada temperatura e velocidade atingida para fusão da cerâmica a ser depositada. O termo não transferido refere-se ao eletrodo de tungstênio alinhado com um bocal de cobre, ambos não consumíveis, que são responsáveis pelo controle e aumento da densidade de energia no fluxo do arco (MENEZES, apud SUCHARSKI, 2012).

Neste processo, o material para revestimento é aplicado a partir do pó e utiliza o calor de um arco plasma para provocar a fusão do mesmo. Após fundido, o revestimento é projetado para que, assim, por meio de um rápido impacto, ela possa solidificar no substrato. Existe uma maneira ideal para que as partículas entrem na zona aquecida da pistola de aspersão, o centro da chama, onde os parâmetros que influenciam isso são fluxo e pressão do gás de arraste (MENEZES, apud SUCHARSKI, 2012). Normalmente, esse processo é realizado em condições normais de atmosfera e pressão, mas dependendo do material, pode ser requerido uma pressão mais baixa (SAMPATH, SCHULZ, JARLIGO e KURODA, 2012).

Na Figura 9, pode-se ver uma descrição ilustrada do processo. Os grãos cinza representam o material cerâmico granulado que será aderido ao substrato. Já as imagens em microscópio mostram o material cerâmico a ser depositado (a), um único grão aderido ao substrato - *splat* (b) e a superfície polida depois de receber o revestimento (c).

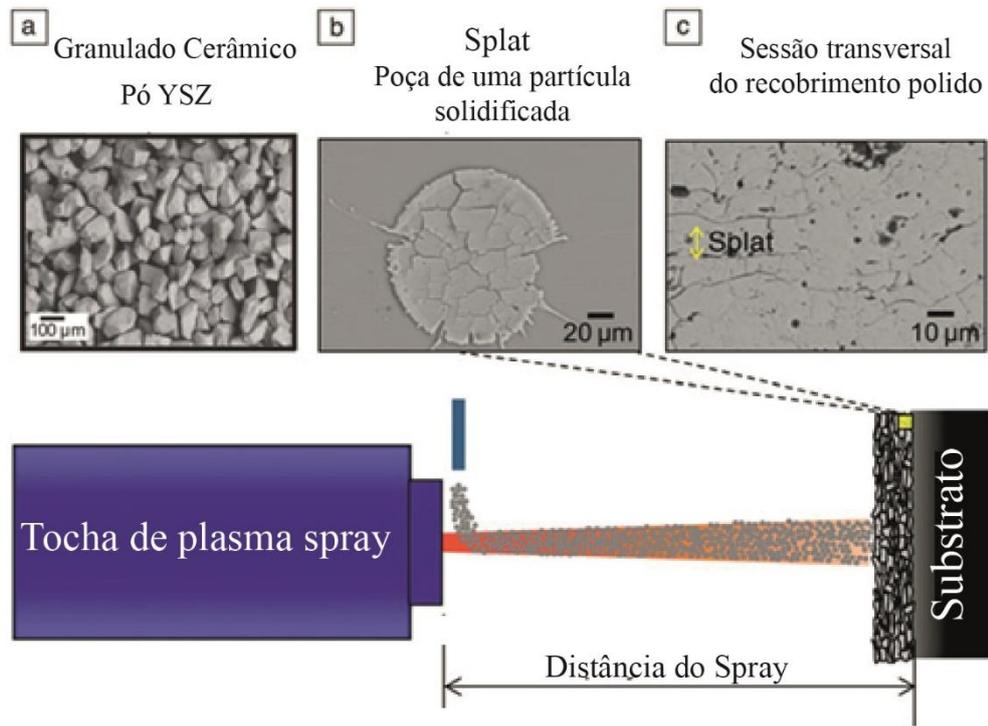


Figura 9 - Processo de APS
 Fonte: Artigo de SAMPATH, 2012.

Os materiais resultantes da pulverização são compostos por uma montagem de *splat* (*splat* é o resultado da solidificação por impacto do grão) que são rapidamente solidificados montados para formar uma superfície de grão solidificados. Os tamanhos de partículas de pó variam de 10 a 100 micrômetros com *splats* resultantes da ordem de alguns microns em espessura e para cima de 100–150 micrômetros de diâmetro. Essas partículas, sob condições atmosféricas normais, são depositadas aleatoriamente e por isso, as partes não preenchidas com o revestimento dão origem aos poros (SAMPATH, SCHULZ, JARLIGO e KURODA, 2012).

A porosidade do revestimento tem papel importante, pois permite que a condutividade térmica seja diminuída possibilitando a palheta trabalhar em temperaturas mais altas. Nesse método, a condutividade térmica pode ser até 20% dos valores iniciais. Isso se deve aos defeitos criados pela desordem na deposição do revestimento, gerando vários poros de tamanhos e morfologias diferentes (SAMPATH, SCHULZ, JARLIGO e KURODA, 2012).

Depois de realizado o revestimento, é feito um tratamento térmico que promove a interdifusão e homogeneização da estrutura do revestimento. É necessário um alto monitoramento com ênfase na alta densidade e controle de rotação, para se obter um revestimento uniforme sobre a peça, (BERNSTEIN apud SOUZA, 2017).

A interface cerâmica-metal produz tensões que são responsáveis pelas falhas no revestimento. Devido a essa falha, esse revestimento é mais utilizado partes que não são submetidas a altos esforços mecânicos, como nas câmaras de combustão, projetores de combustível e nos estatores. (PADTURE apud SOUZA,2017)

2.3.3 EB-PVD - *Electron Beam Physical Vapor Deposition*

Deposição física de vapor por feixe de elétrons (EB-PVD) é o processo onde ocorre evaporação do material a ser depositado, utilizando elevada pressurização à altíssima temperatura. Um feixe de elétron é aplicado sobre o material cerâmico, assim, evaporando-o em uma câmara a vácuo. Substratos pré-aquecidos são posicionados na nuvem de vapor do material a ser depositado numa taxa de micrômetro por minuto (SAMPATH, SCHULZ, JARLIGO e KURODA, 2012).

Na Figura 10, podemos ver o esquema do processo de EB-PVD.

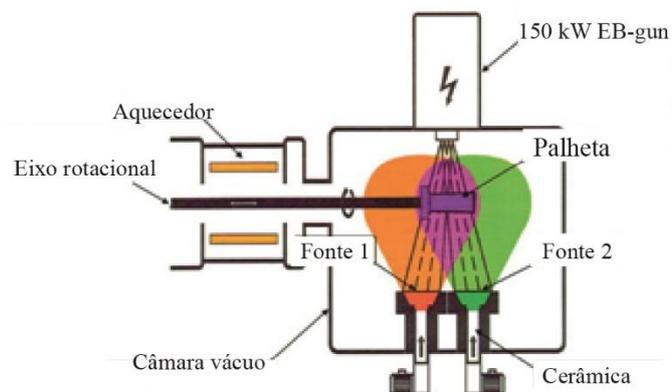


Figura 10 - Processo de EB-PVD
Fonte: Artigo de SAMPATH, 2012.

A peça a ser revestida precisa estar em rotação para que toda sua área seja revestida. Os fatores microestruturais relativos a sua porosidade podem ser manipulados via processamento, incluindo temperatura de deposição, velocidade de rotação, pressão da câmara, padrão de incidência de vapor e taxa de condensação (SAMPATH, SCHULZ, JARLIGO e KURODA, 2012).

A estrutura formada pelo revestimento é uma estrutura colunar, que favorece um alto nível de tolerância à deformação. Essas colunas vão até a superfície da *top coat*, e são

encontrados poros globulados e alongados que variam de 18 a 25 nm de tamanho, que garantem a baixa condutividade térmica. A Figura 11 mostra diferentes exemplos das colunas típicas geradas pelo método, demonstrando a variabilidade do processo em diferentes parâmetros como temperatura do substrato e velocidade de rotação (SAMPATH, SCHULZ, JARLIGO e KURODA, 2012).

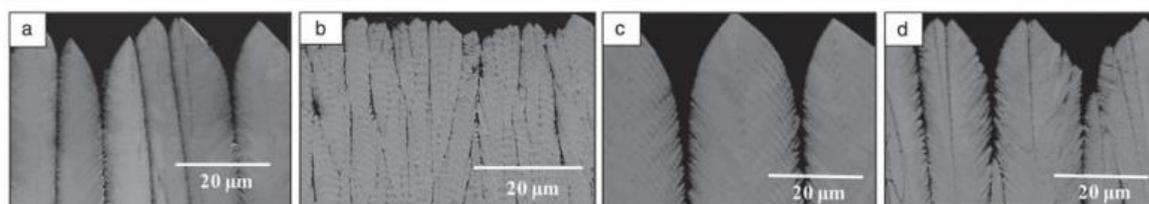


Figura 11 – Microscopia eletrônica das colunas na camada superior
Fonte: Artigo de SAMPATH, 2012.

Os contornos de grão promovem uma ligação fraca entre as colunas individuais monocristalinas, favorável à acomodação das tensões mecânicas geradas durante os ciclos térmicos. A tolerância à deformação lateral resulta da estrutura colunar e lacunas entre colunas produzida pela rotação do componente durante a deposição (BEELE, apud LIMAR, 2014).

Em resumo, a principal vantagem da EB-PVD é a estrutura colunar que fornece tolerância à tensão. Em comparação com o TBC pulverizados por plasma (APS), o EB-PVD possui uma maior resistência à erosão e um acabamento de superfície mais suave que oferece vantagens aerodinâmicas. Por outro lado, o processo tem um alto custo, limites na variabilidade química e maior condutividade térmica devido à direção dos canais ser paralela ao fluxo do calor (SAMPATH, SCHULZ, JARLIGO e KURODA, 2012).

As microestruturas dos métodos APS (a) e EB-PVD (b) são muito diferentes e podem ser visualizadas na Figura 12.

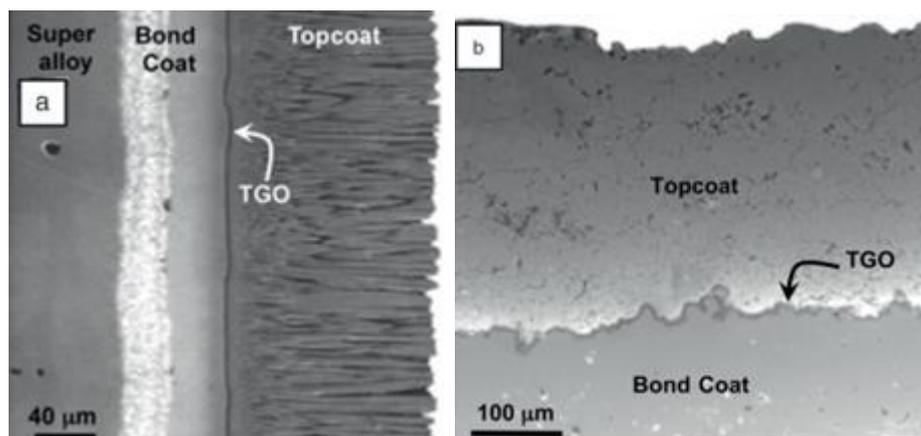


Figura 12 - Diferenças da micrografia EB-PVD (a) e APS (b)
 Fonte: Artigo de CLARKE, 2012.

2.4 Comparação entre os métodos

O processo EB-PVD é mais caro, comparado com o APS, mas apresenta, além de uma alta resistência à abrasão, outras vantagens, como: obtenção de camadas espessas, estrutural e quimicamente uniformes; estruturas colunares mais resistentes a fadiga termomecânica; vida útil cerca de 80% superior e maior tolerância a choques térmicos (ALMEIDA, 2005)

A delaminação ocorre devido ao impacto de partículas que são aspiradas pela turbina. O impacto dessas partículas contra a superfície das palhetas e o contato com os gases quentes resultam na erosão do revestimento cerâmico. O decréscimo de espessura causado pelo desgaste é responsável por um aumento da temperatura no substrato metálico (STÖVER apud ALMEIDA, 2005).

Nos revestimentos por APS o efeito do impacto de partículas (não desejáveis no fluxo) é o de arrancamento de lamelas inteiras. Já nos revestimentos por EB-PVD o impacto de partículas arranca apenas pequenas porções das colunas individuais. A taxa de erosão dos revestimentos por EB-PVD pode ser até 10 vezes menor quando comparada aos revestimentos por APS uma vez que a microestrutura colunar formada apresenta uma maior resistência às tensões mecânicas de trabalho (WELLMAN, 2000).

Mesmo com as vantagens EB-PVD, o processo APS ainda é vastamente utilizado devido aos revestimentos terem menor condutividade térmica, acarretando menores temperaturas no substrato, e principalmente devido ao seu baixo custo de aplicação.

3 METODOLOGIA

Este capítulo tem como objetivo caracterizar o tipo de pesquisa, apresentar os materiais, métodos, variáveis e indicadores utilizados para realização da pesquisa, bem como caracterizar os procedimentos adotados para a coleta e tabulação de dados.

3.1 Tipo de pesquisa

Pesquisa pode ser descrita como um processo sistemático e formal de desenvolvimento do método científico. Com objetivo fundamental de descobrir respostas para problemas, através do emprego de procedimentos científicos (GIL, 2008).

Do ponto de vista de abordagem do problema, as pesquisas podem apresentar duas grandes classificações: quantitativa e qualitativa.

- Pesquisa quantitativa: classifica e analisa as informações, após transformar as informações em números, fazendo-se necessário a aplicação de estatística. Ou seja, a pesquisa quantitativa considera tudo o que pode ser quantificado e traduzido em números e informações para análise e classificação (MORESI, 2003).
- Pesquisa qualitativa: trata da interpretação de fenômenos e processos que não são passíveis de serem expressos através de números ou por métodos estatísticos e matemáticos (SILVA & MENEZES, 2000).

Para Vergara (1997), uma pesquisa pode ser classificada quanto aos objetivos sendo:

- Exploratória: proporcionar maior familiaridade com a problemática, de modo a torna-lo mais explícito;
- Descritiva: tem como objetivo fundamental a descrição das características de determinadas amostras, populações ou fenômenos ou, então, o estabelecimento de relações entre variáveis;
- Explicativa: são pesquisas responsáveis pela identificação de fatores que acarretam ou colaboram para acontecimento dos fenômenos.

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, a pesquisa pode ser classificada como pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa experimental, estudo de caso, pesquisa-ação e pesquisa participante. Dentre eles, destaca-se a pesquisa bibliográfica.

A pesquisa bibliográfica, abordagem usada no presente trabalho, é o passo fundamental em qualquer pesquisa científica, visto que se elimina a possibilidade de trabalhar em vão e de se desperdiçar de tempo com o que já possui solução (MEDEIROS, 2009).

Desta forma, é possível concluir que o presente trabalho trata de uma pesquisa de caráter qualitativo, sendo classificada de acordo com seu objetivo uma pesquisa que descreve e explica os métodos de revestimentos na Engenharia de Superfícies, visando proporcionar uma maior familiaridade com as tecnologias afins.

3.2 Materiais e Métodos

O termo “materiais” é empregado como algo pertencente ou relativo à matéria, ou ainda, como o conjunto de objetos que constituem ou formam uma obra ou construção (AURÉLIO, 2010).

Segundo Vergara (2007), “método” é um caminho, uma forma lógica de pensamento. Método científico é o conjunto de processos ou operações que devem ser empregados, ou ainda, é a linha de raciocínio adotada no processo de pesquisa (GIL, 2002).

Os materiais e métodos utilizados nessa pesquisa estão apresentados na Figura 13. O fluxograma retrata a ordem nos procedimentos realizados para execução deste trabalho.



Figura 13 - Fluxograma dos métodos
Fonte: Pesquisa direta, 2019.

A metodologia parte de um estudo teórico e revisão bibliográfica. Depois, é feita uma análise dos métodos para determinar sua eficiência, e assim, discutir os resultados, apresentar os benefícios e contribuições, bem como, apresentar as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

3.3 Variáveis e Indicadores

Para melhor organização do estudo e das análises exploradas nessa pesquisa é necessário a compreensão do conceito de variáveis e indicadores.

Para o estudo e análise de cada variável existem indicadores que tornam possível a mensuração. Esses indicadores são escolhidos de acordo com os objetivos do estudo.

Tabela 1 – Variáveis e Indicadores

Variáveis	Indicadores
Natureza do revestimento	<ul style="list-style-type: none"> • Aderência • Porosidade • Ponto de fusão
Materiais	<ul style="list-style-type: none"> • Superligas metálicas • MCrAlY • YSZ
Processo	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • Tempo de exposição • Fluxo de calor

Fonte: Pesquisa direta (2018)

3.4 Instrumento de coleta de dados

Os dados necessários para este trabalho serão buscados através da leitura de artigos disponíveis nas bases convencionais, bibliotecas, artigos digitalizados e internet.

3.5 Tabulação dos dados

As informações obtidas serão documentadas e o documento final redigido com os recursos do *software Microsoft Word*.

3.6 Considerações finais do capítulo

Este capítulo teve o objetivo de apresentar a metodologia utilizada no presente trabalho, descrevendo o tipo de pesquisa, os materiais e métodos empregados, as variáveis e seus respectivos indicadores, as formas de coleta de dados e como estes são registrados e analisados.

A metodologia apresentada tem o objetivo de nortear a busca da solução sobre o problema proposto.

4 RESULTADOS

No presente capítulo, serão analisados três trabalhos, dentre artigo e dissertações, escolhidos de forma que seja mostrado experimentos realizados com seus respectivos resultados, acrescentando no estado da arte do presente trabalho. O critério utilizado para escolha dos artigos é a relevância da pesquisa realizada e os desafios decorrentes dos resultados alcançados, dentre os vários trabalhos lidos para desenvolvimento desta monografia.

As dissertações contemplam os principais métodos de revestimento: APS, o método de recobrimento EB-PVD e novas tecnologias na avaliação de revestimentos térmicos. A escolha de trabalhos nacionais, se deve ao fato da importância de destacar o cenário nacional no ramo de recobrimentos térmicos.

Ao final, apresenta-se uma revisão dos métodos e de seus desafios.

4.1 Dissertação: Efeito da barreira térmica em uma palheta AISI 316 utilizada para turbina a gás. Autor Leandro Augusto Souza

O trabalho intitulado “Efeito da barreira térmica em uma palheta AISI 316 utilizada para turbina a gás”, realizado por Leandro Augusto Souza foi desenvolvido na Universidade Federal de Ouro Preto e concluído em dezembro de 2017 na forma de uma dissertação de mestrado, utilizando os recursos dos laboratórios do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) da Escola de Minas, em particular o LESTA – Laboratório de Engenharia de Superfícies e Técnicas Afins. A orientação do trabalho esteve a cargo do Professor Adilson Rodrigues da Costa.

Foi feito um estudo para analisar a vida útil e a redução de temperatura do material base de uma palheta de turbina a gás constituída de aço inoxidável (AISI316), com sistema de resfriamento convencional e com uma camada de revestimento térmico composta por zircônia (óxido de zircônio) estabilizada com ítria (óxido de ítrio). Foram executados dois diferentes experimentos: um, numericamente, através da dinâmica dos fluidos computacional e método dos elementos finitos na análise estrutural e outro, experimentalmente, através da construção de uma palheta e investigação do comportamento da barreira térmica em um forno de fluxo.

Neste trabalho, o experimento prático será objeto de análise.

4.1.1 Construção da palheta

A palheta é constituída por aço inoxidável austenítico AISI 316 usinado por diferentes ferramentas para chegar na dimensão final, como pode ser vista na Figura 14. O aço utilizado possui em sua composição: ferro, 63,2%; cromo, 18,7%; níquel, 12,7%; molibdênio, 2,33%; manganês, 1,86%; carbono 0,04% e alguns resquícios de titânio, vanádio, tungstênio, nióbio, entre outros. Ela possui dimensões aproximadamente 120 mm de altura, 70 mm de comprimento e 35 mm de largura. Os canais de resfriamento são responsáveis pelo *film cooling*, que significa a criação de orifícios na palheta onde circula ar proveniente do compressor como fluido de arrefecimento. Este canal possui 1 mm de diâmetro.

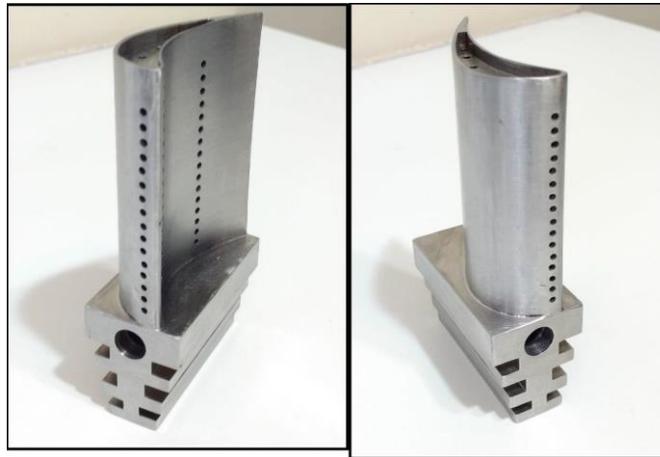


Figura 14 – Palheta Usinada
Fonte: Dissertação de SOUZA, 2017

4.1.2 Aplicação do revestimento

O revestimento utilizado foi realizado por aspersão térmica a combustão e os materiais depositados foram NiCrAlY sendo 57,35% de níquel, 31% de cromo, 11% de alumínio e 0,65% de ítrio, como camada ligante. e $ZrO_2-8\% Y_2O_3$ como camada cerâmica.

Para o recobrimento, foram realizadas determinadas etapas que serão descritas. Primeiro, ocorre uma limpeza química com detergentes específicos e logo após a peça foi jateada com abrasivos de alumina (Al_2O_3), para que o revestimento aderisse melhor no material. O revestimento em si, é feito inicialmente com a deposição da *bond coat* com NiCrAlY e posteriormente o *top coat* com zircônia e ítria ($ZrO_2-8\% Y_2O_3$), depositado em vários passes até atingir uma camada de 0,6 mm de espessura. A temperatura e a espessura foram medidas entre cada passe. Para que a adesão fosse satisfatória, a temperatura devia ser de 90°C.

A palheta após o revestimento pode ser visualizada na Figura 15.



Figura 15 - Peça com revestimento térmico
Fonte: Dissertação de SOUZA, 2017

4.1.3 Forno de fluxo

O forno de fluxo foi projetado para simular o ambiente em que a palheta trabalha dentro da turbina a gás. Ele foi confeccionado utilizando um material isolante (manta de vidro) em seu interior de forma que preservasse o calor. Já a sua fonte foi feita através de um maçarico que usa o gás liquefeito de petróleo (GLP) como combustível. Entre a chama e a peça, foram colocados tijolos refratários para preservar o calor e para que a chama seja direcionada ao bordo de ataque da palheta, como mostra a Figura 16.

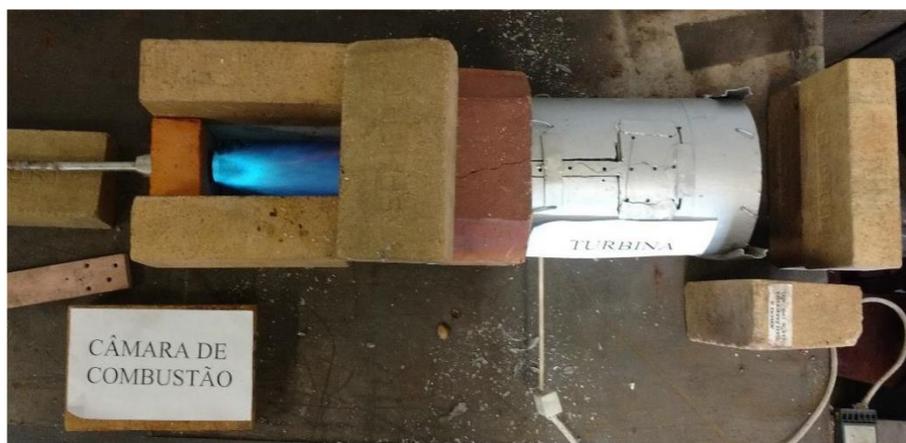


Figura 16 - Arranjo do fluxo de forno experimental
Fonte: Dissertação de SOUZA, 2017

Para o sistema de resfriamento da palheta, uma tubulação ligada a um compressor e um regulador de pressão para controlar a entrada do ar de resfriamento foram ligados à palheta.

Para a obtenção de dados, foram utilizados termopares em regiões específicas da peça. Em relativamente 80% da altura da palheta, foram colocados no bordo de ataque, no bordo de fuga e em um canal de resfriamento intermediário. A Figura 17 mostra o interior do forno com os dispositivos utilizados.

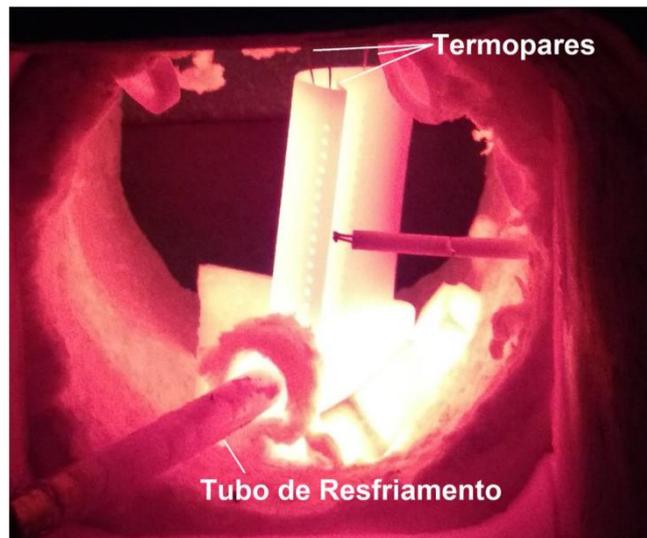


Figura 17 - Palheta com o tubo de resfriamento e os termopares
Fonte: Dissertação de SOUZA, 2017

Durante o experimento, tem duração total de 80 minutos, foram utilizadas quatro temperaturas de entradas na turbina (900°C , 1000°C , 1100°C e 1200°C) e realizados sete ensaios para se obter a média das temperaturas em cada ponto.

4.1.4 Resultados

A partir das temperaturas obtidas, ficou evidenciado que a parede interna próxima ao bordo de ataque teve uma diferença média com a temperatura de entrada de aproximadamente 365°C . Já para a parede interna da região intermediária tem-se uma diferença de aproximadamente 420°C . Por fim, para a parede interna do bordo de fuga tem-se uma diferença de aproximadamente 355°C . A Figura 18 mostra a temperatura média das regiões.

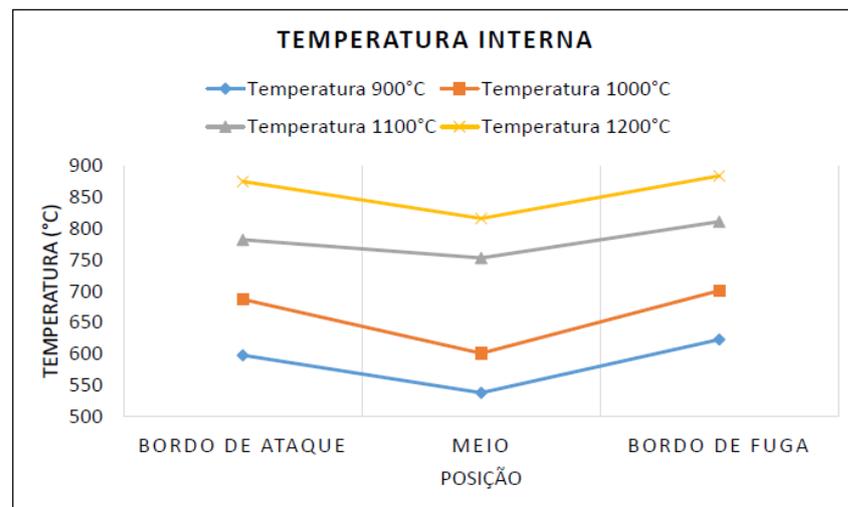


Figura 18 - Temperatura da palheta para cada temperatura de entrada
 Fonte: Artigo de SOUZA, 2017

A temperatura limite de operação do aço em estudo é de 925°C (1198,15K), para trabalho em temperatura constante, e de 870°C (1143,15K), para temperatura variável (SINGH, 1991; MATWEB, 2017; apud SOUZA, 2017)

Ainda, realizou-se uma análise do revestimento antes e após o experimento. Com o auxílio de microscópio óptico, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrômetro de energia dispersiva (EDS) foi possível verificar, antes de submeter a palheta ao fluxo de forno, que os componentes da TBC estavam presentes no substrato, porém, o revestimento gerado não possui uma uniformidade destas camadas.

Após a realização do experimento, os testes foram repetidos, e verificou-se que o revestimento aplicado foi completamente destruído pela oxidação dos elementos do revestimento e do substrato em algumas partes da peça, evidenciando que o revestimento não foi capaz de suportar a oxidação proporcionada pelos gases de escape e a elevada temperatura.

4.1.5 Conclusão

Pôde-se concluir que a temperatura do substrato não ultrapassou a sua temperatura limite de operação para uma situação de temperatura constante, no entanto, ultrapassou a temperatura limite de operação variável, o que descarta o revestimento neste caso, pois a turbina não trabalha em um fluxo constante de calor.

Nesse sentido, mesmo não atingindo valores críticos de temperatura, o revestimento falhou. As falhas podem ter sua origem a partir da oxidação do substrato, podendo se concluir

que a *bond coat* não protegeu o substrato contra a oxidação, possibilitando a delaminação do revestimento, que causou a remoção do mesmo.

4.2 Dissertação: Estudo de revestimentos cerâmicos sobre substrato metálico, obtidos por deposição física de vapores por feixe de elétrons para aplicação como barreira térmica. Autor Daniel Soares de Almeida

O trabalho de título “Estudo de revestimentos cerâmicos sobre substrato metálico, obtidos por deposição física de vapores por feixe de elétrons para aplicação como barreira térmica”, realizado por Daniel Soares de Almeida e desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em 2005 na forma de uma tese de doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores, sob a orientação dos Drs. Cosme Roberto Moreira da Silva e Maria do Carmo de Andrade Nono.

Foi realizado um trabalho para avaliar a adição de óxido nióbio como co-dopante nas cerâmicas de zircônia dopadas com ítria, utilizadas no revestimento térmico de palhetas de turbina a gás pelo método EB-PVD. Através dos testes, buscou-se otimizar o processo de revestimento térmico melhorando as propriedades mecânicas dos revestimentos e reduzindo sua condutividade térmica. A influência da adição da nióbia (óxido de nióbio) na microestrutura dos TBC foi analisada por meio de técnicas de difração de raios X, microscopias óptica e eletrônica de varredura (MEV), microdureza e perfilometria.

4.2.1 Equipamentos e materiais

Os revestimentos foram realizados nos laboratórios AMR/IAE/CTA, em um forno de fusão por feixe de elétrons modificado para produção de revestimentos metálicos e cerâmicos. As modificações incluíram proteção radiológica, implantação de um sistema de monitoramento, adaptação de termopares e sistema de aquecimento do substrato.

O metal substrato, geralmente feito de superligas a base de níquel, teve que ser substituído por um material mais acessível tanto no mercado quanto no seu custo. Para isso, foi escolhido chapa de aço inoxidável SAE 304 de 1,59 de espessura e 30x50 mm² de área, por ter características semelhantes à superliga de níquel como: coeficiente de dilatação térmica, afinidade química e ponto de fusão.

Para o material ligante, foi utilizado o pó NI-246-3, a base de MCrAlY, comumente utilizado nesses tipos de revestimento. Para o óxido cerâmico, utilizou-se o nióbio como co-dopante da mistura ítria e zircônia estabilizada, em diferentes proporções.

4.2.2 Metodologia

Os revestimentos de MCrAlY foram depositados sobre a superfície de chapas de aço inoxidável como camada ligante. Sobre a camada de MCrAlY foi depositada uma camada cerâmica de zircônia com 8% em peso de ítria, entre outras variações.

A parametrização dos valores para realização dos procedimentos pode ser vista nas Tabela 2 e Tabela 3. Nota-se a adição do óxido de nióbio na camada cerâmica variando de acordo com a quantidade de óxido de ítria.

Tabela 2 – Parametrização do revestimento da camada ligante

Amostra	Tensão (kV)	Corrente (A)	Tempo (min)	T _s (°C)	T _H	Taxa* (µm/kW.h)	Espessura (µm)	ρ aparente (g/cm ³)
M-01	26,0	0,25	70	650	0,57	-	-	-
M-02	26,5	0,15	120	940	0,75	1,96	16	-
M-03	27,0	0,10	200	750	0,63	2,66	24	-
M-04	26,0	0,10	145	550	0,51	4,77	30	-
M-05	26,0	0,20	160	300	0,36	3,18	44	7,66
M-06	26,0	0,13	180	550	0,51	2,37	24	7,36
M-07	27,0	0,11	195	550	0,51	2,38	23	7,95
M-08	25,1	0,21	100	563	0,52	-	-	-
M-09	25,3	0,20	150	566	0,52	1,58	20	8,46
M-10	25,3	0,16	170	571	0,52	1,74	20	8,12

* Taxa de deposição por unidade de energia.

Fonte: Dissertação de ALMEIDA, 2005

Tabela 3 – Parametrização do revestimento da camada cerâmica

Amostra	% em peso		Tensão (kV)	Corrente (A)	Tempo (min)	T _s (°C)	T _H	Taxa* (µm/kW.h)	espessura (µm)
	Y ₂ O ₃	Nb ₂ O ₅							
cer-01	8,0	0	26,0	0,55	20	200	0,16	-	-
cer-02	8,0	0	26,0	0,15	45	400	0,22	14,02	41,0
cer-03	8,0	0	26,0	0,10	200	850	0,37	11,31	98,0
cer-04	8,0	0	27,0	0,16	199	930	0,40	3,90	53,3
cer-05	8,0	0	26,0	0,20	260	940	0,40	0,80	18,0
cer-06	8,0	0	25,2	0,20	130	996	0,42	7,78	85,0
cer-07	8,0	0	26,0	0,08	130	1000	0,42	10,29	46,4
cer-08	7,4	5,4	25,3	0,16	200	995	0,42	5,93	80,0
cer-09	8,0	10,0	26,0	0,13	210	980	0,42	8,03	95,0
cer-10	9,2	10,8	27,0	0,15	170	940	0,40	2,49	28,6
cer-11	8,0	15,0	25,1	0,17	80	991	0,42	9,67	60,0
cer-12	10,2	15,0	27,0	0,14	100	930	0,40	5,78	36,4
cer-13	8,3	19,5	26,5	0,13	130	920	0,40	1,93	14,4
cer-14	8,0	20,0	25,3	0,20	70	995	0,42	8,47	59,7

*Taxa de deposição por unidade de energia.

Fonte: Dissertação de ALMEIDA, 2005

A partir das técnicas apresentadas, foram obtidos os resultados para análise do experimento: microscopia óptica para observar condições gerais do filme; analisador de partículas; microscopia eletrônica de varredura, difração de raios X, perfilometria, microdureza Vickers e difusividade térmica em função da temperatura.

4.2.3 Resultados

As modificações realizadas no forno de fusão por feixe de elétrons foram bem sucedidas, tanto para a aplicação do material ligante, quanto para a cerâmica.

Devido ao diagrama binário nióbia-zircônia, foi selecionado previamente a quantidade máxima de 20% em peso de nióbio nos revestimentos, pois permitia a formação de uma solução sólida monofásica. Entretanto, durante a evolução do trabalho, identificou-se que as soluções sólidas monofásicas ricas em nióbio estavam se descolando do substrato. Portanto, levando em consideração a instabilidade das soluções sólidas de ZrO_2 , foi possível estimar a quantidade máxima de nióbio, 10,8% em peso, para ser adicionado no revestimento de zircônia-ítria-nióbio.

Em relação à condutividade térmica, a adição de nióbio no revestimento zircônia e ítria possibilitou uma redução de 50% quando comparado ao revestimento sem o co-dopante nióbio.

As análises do MEV evidenciaram a formação de colunas no revestimento cerâmico favorável a acomodação de tensões mecânicas, contribuindo para a resistência mecânica do revestimento.

A perfilometria permitiu indicar baixos valores de rugosidade nas superfícies. Esses baixos valores são positivos pois permitem uma melhor adesão entre os revestimentos. No caso do revestimento cerâmico, possibilita uma redução no arraste aerodinâmico nas palhetas revestidas por este TBC.

4.3 Artigo: Testes e avaliações em revestimentos por barreira térmica. Autores Robert Vaßen, Yutaka Kagawa, Ramesh Subramanyan, Paul Zombo e Dongming Zhu

O trabalho de Robert Vaßen foi publicado no boletim da MRS (Materials Research Society) no ano de 2012. MRS Bulletin é um material de pesquisadores produzido pela Cambridge University Press, uma editora fundada em 1534 para Universidade de Cambridge.

Materiais revestidos termicamente são sistemas complexos, que tem microestruturas específicas. Para a realização de testes, é necessário criar ambientes semelhantes aos que ocorrem dentro da turbina. No entanto, simular parcialmente as condições reais que ocorrem na realidade é uma tarefa difícil, sendo necessário que as configurações especiais ocorram nos laboratórios. O artigo trata sobre os métodos utilizados em testes laboratoriais para detecção e investigação dos revestimentos térmicos, assim como, as propriedades dos revestimentos.

4.3.1 Teste de gradiente térmico

Para o teste de gradiente térmico, é necessário criar um ambiente extremamente quente, com fluxo de calor semelhante ao interior de uma turbina. Um método utilizado, implementado pela NASA Glenn Research Center, consiste na utilização de um laser de alta potência de CO₂. Outro método consiste em aplicar uma chama com oxigênio/hidrocarboneto diretamente em um lado da amostra. Em ambos os métodos a amostra é resfriada com compressor de ar no lado em que não recebe calor. A Figura 19 ilustra o processo em chama.

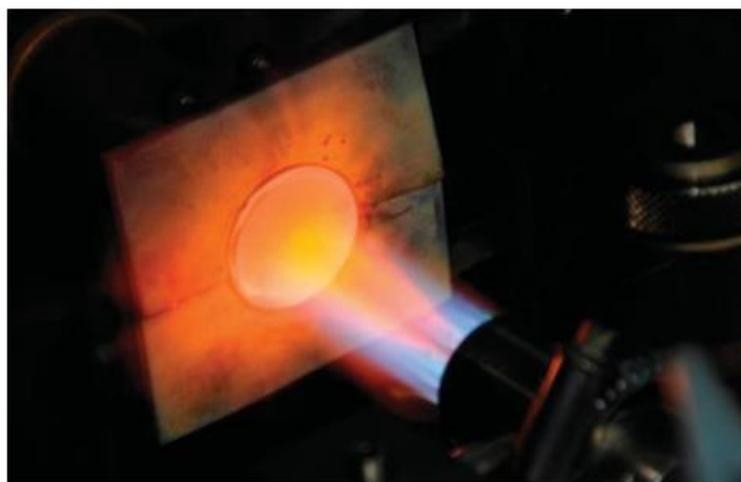


Figura 19 - Processo de chama direta para o teste de gradiente térmico
Fonte: Artigo de Robert Vaßen

Esses testes não conseguem testar palhetas e outras peças, devido a geometria, porém, permitem avaliar taxas de sinterização, vida útil do ciclo térmico, condutividade térmica,

monitorar evolução de danos em condições de alto fluxo de calor e testar a abrasividade de determinados particulados.

Tratando especificamente do método de laser CO₂, foi criado um sistema para analisar a propagação de trincas em ambientes com fluxo de calor extremamente quente em condições cíclicas, simulando o funcionamento de uma decolagem. A Figura 20 mostra melhor os resultados obtidos num teste com os parâmetros a seguir. O corpo de prova com uma trinca inicial já formada na barreira térmica, essa com 127 μm . Inicialmente a temperatura da superfície foi de aproximadamente 1287°C e os ciclos foram de 20 minutos aquecendo e 4 minutos resfriando, com fluxo de calor de 60–100 W cm².

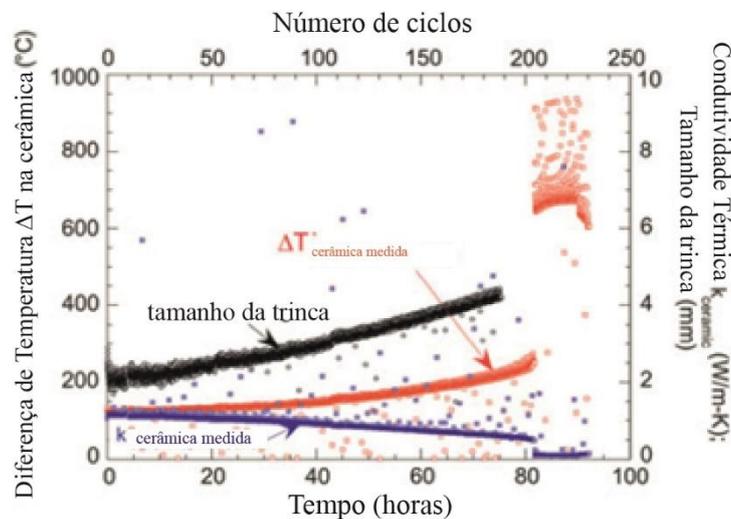


Figura 20 - Resultado gráfico da amostra submetida a laser CO₂ no teste de gradiente térmico
Fonte: Artigo de Robert Vaßen

A temperatura do revestimento aumentou com o aumento da propagação da trinca, enquanto o lado contrário teve temperatura relativamente constante. A condutividade térmica do revestimento diminuiu com o aumento da trinca, até que a mesma rompesse depois de 200 ciclos. O resultado mostra uma taxa de propagação de trinca por fadiga térmica mais lenta, comparado com outras cerâmicas.

4.3.2 Fadiga termomecânica (TMF)

Materiais que trabalham expostos a altas temperaturas estão sujeitos a sofrerem fadiga termomecânica (TMF), que decorre da fluência e da deformação plástica em cada camada do revestimento térmico direcionadas pelo coeficiente de expansão térmica (CET)

A Figura 21 ilustra a acumulação de danos característicos em uma aplicação por EB-PVD. A temperatura do substrato é mantida a 1000°C constante, enquanto o recobrimento

aquece até 1150°C e depois resfria, ao longo de 960 ciclos (aquecimento e resfriamento). Uma carga de tração uniaxial de 1,8 kN (60 MPa) é aplicada ao corpo de prova enquanto a superfície do TBC é aquecida.



Figura 21 – Microscopia da amostra falha por fadiga termomecânica
Fonte: Artigo de Robert Vaßen

A 1150 ° C, a camada pode deformar até cerca de 8% de tensão de tração sem evidência de rachadura visível. Com o aumento da tensão de fluência por tração, a trinca da camada de TBC inicia e, em última análise, ocorre fragmentação múltipla, como visto na Figura 21. Verifica-se que as fissuras na camada de TBC não se propagam por toda a espessura, e o espaçamento das fissuras da camada de TBC é muito menor do que o previsto usando a mecânica contínua.

Após a quebra do TBC, a vida útil do sistema é semelhante à da superliga sem revestimento.

4.3.3 Avaliação sensorial e não destrutiva - Detecção de luminescência

As temperaturas na superfície do TBC e também na TGO são parâmetros críticos. Tem-se então crescido o estudo de métodos para medir as temperaturas sem contato físico. Um dos métodos que tem se mostrado promissor é a detecção por luminescência, que utiliza a fotoluminescência da temperatura. A luminescência também é utilizada para detecção de delaminação.

Neste método, íons luminescentes de terras raras são incorporados na estrutura cristalina do YSZ durante a deposição do revestimento por EB-PVD. Durante o teste a elevadas temperaturas, os íons são estimulados através de um laser pulsado, e a queda da luminescência excitada é monitorada. Outra vantagem além de se medir sem contato é a menor profundidade atingida para medição, dando uma resolução superior comparada a pirômetros ópticos.

O teste foi demonstrado num revestimento por EB-PVD, com uso de 7YSZ utilizando európio como dopante terra rara. Utilizando um laser com frequência sólida com emissões a

532 nm para iluminar o centro do revestimento, enquanto o laser de CO₂ aquece o corpo de prova. Um tubo de safira é posicionado para coletar sinais de luminescência excitada. A Figura 22 mostra o esquema utilizado para execução do ensaio, assim como o gráfico da temperatura medida por pirômetro óptico e a temperatura medida pelo método da luminescência.

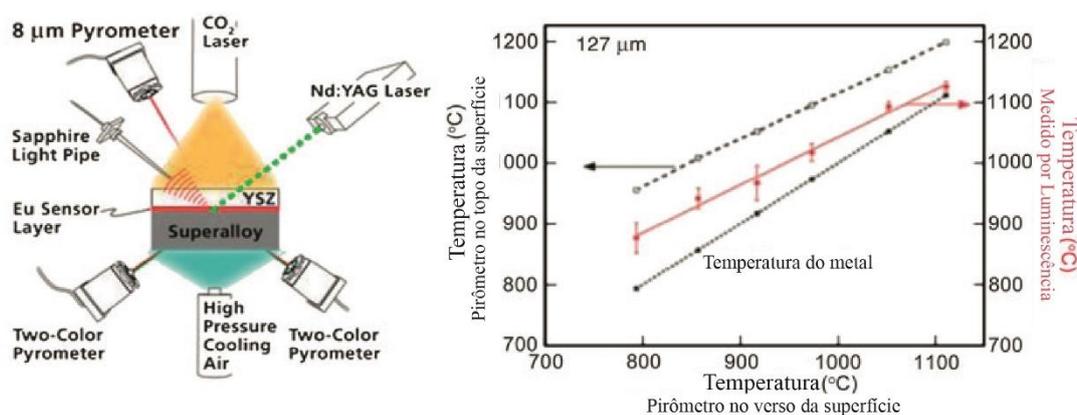


Figura 22 – Arranjo do ensaio de detecção por luminescência (esquerda) e gráfico luminescência x pirômetro óptico (direita)

Fonte: Artigo de Robert Vaßen

4.3.4 Imagem infravermelha

O segredo para estender o uso de TBCs é avaliar os danos antes da falha do revestimento. A detecção precoce de dano TBC também permite que uma peça seja substituída e, possivelmente, consertada. A maioria dos métodos não destrutivos para este tipo de monitoramento utiliza variações espectrais nas propriedades ópticas do YSZ.

Recentemente, foi demonstrado que, com os avanços nas câmeras de matriz de plano focal de infravermelho (IV), agora é possível realizar monitoramento on-line em tempo real do infravermelho de palhetas rotativas durante a operação do motor. Isso oferece a perspectiva de aumentar a confiabilidade operacional da turbina a gás.

À medida em que a tecnologia de imagens de plano focal se torna mais sofisticada, o número, os tipos e os pixels dos detectores de matriz aumentaram bastante. Em uma implementação recente da Siemens, um sistema de lentes telescópicas, usado para criar uma imagem de parte das lâminas em um arranjo de plano focal na faixa espectral de 0,9 μm a 1,6 μm, maximiza a sensibilidade da matriz ao pico da radiação do corpo negro das lâminas.

A radiação que chega ao detector inclui três fontes:

- Radiação emitida a partir da superfície do componente da turbina sendo fotografada;
- Radiação refletida de partículas no fluxo de gás;
- Radiação emitida a partir de gases quentes e partículas no campo de visão.

Outro desenvolvimento nos métodos de pesquisa é combinar imagens térmicas com ultrassons. O conceito é induzir vibrações em um componente ou uma matriz de palhetas, por exemplo, com uma fonte ultrassônica e usar um arranjo de plano focal altamente sensível para visualizar os locais de aquecimento por atrito.

4.3.5 Conclusões

É evidente que os testes e os ensaios realizados para avaliar os revestimentos térmicos são de grande complexidade e importância para a sua utilização. A qualidade dos TBCs depende desses testes para que seja possível descobrir e avaliar melhor o comportamento do revestimento nas condições em que trabalham.

Testes que simulam o ambiente de trabalho com precisão, como o apresentado, são de grande importância no estudo da Engenharia dos Materiais. Porém, a realização dos testes ainda requer a disponibilidade de alta tecnologia, bem como de pesquisadores especializados e equipamentos de difícil acesso, devido à sua alta complexidade e ao seu alto custo. Com isso, novos métodos, além dos existentes, precisam ser desenvolvidos para que se compreenda melhor as falhas do material e os seus motivos.

4.4 Discussão geral

É indiscutível que os TBC's são capazes de isolar termicamente o material base. Porém, as propriedades mecânicas e a sua durabilidade são destaques em estudos, pois dependem de vários fatores. Geralmente, a falha de um TBC é por delaminação, que ocorre devido à formação de trincas na camada cerâmica e na interface metal-cerâmica com a camada de ligação, através dos defeitos microestruturais. Essas trincas são devido às tensões residuais provocadas pela oxidação da camada de ligação metálica em altas temperaturas, onde ocorre a formação e crescimento da TGO. Esta formação, por sua vez, ocorre devido à permeabilidade da camada cerâmica porosa, e às diferenças de expansão térmica cíclica

Para os materiais utilizados nos testes, percebeu-se o frequente uso de uma superliga de níquel monocristalina para o material base da palheta, material capaz de suportar a corrosão e possuir boa resistência mecânica. Na *bond coat*, a camada metálica aplicada no material para melhorar a aderência da *top coat*, é de comum acordo entre dissertações e leituras, que o MCrAlY é o melhor material a ser utilizado. Porém, na *top coat*, busca-se um novo material atrelado a zircônia estabilizada com ítria (YSZ) para melhorar o desempenho do TBC.

No cenário nacional, enfrenta-se questões que dificultam os estudos dessas tecnologias aplicadas a turbinas a gás. A falta de uma indústria especializada em turbinas a gás dificulta investimentos em pesquisas relacionadas a revestimentos térmicos em palhetas. Entretanto, segundo o ITA (Instituto Tecnológico de Aeronáutica), existem projetos em andamento em turbinas a gás na instituição, afirmando que o Brasil possui recursos humanos capacitados para projetar turbinas inteiramente brasileiras para atender as necessidades nacionais.

Considerando os métodos de aplicação, existem diversas empresas que prestam esse serviço, por exemplo a empresa Cascadura, presente em vários lugares do país. Eles realizam processos de aspersão térmica; a arco elétrico, a plasma e hipersônica.

É importante ressaltar que os revestimentos térmicos estão presentes em vários outros setores, como indústria siderúrgica e automobilística. Essa busca por métodos que permitem proteger e aumentar a temperatura de trabalho de materiais está cada vez mais presente nas Universidades, assim como a engenharia de superfícies.

5 CONCLUSÃO

Os TBC's são tecnologias relativamente novas aplicadas em turbinas a gás, a partir da década de 80. Desde sua aplicação nas palhetas e outras peças da turbina a gás ele tem se mostrado muito eficiente. Não há dúvidas de que essa tecnologia acrescenta muito para a engenharia de superfícies.

Os métodos de revestimento APS e EB-PVD são os mais promissores no revestimento térmico para turbinas. Com suas particularidades, o APS tem se destacado pelo baixo custo e porosidade aleatória, diminuindo consideravelmente a temperatura do substrato metálico. Já a deposição física por feixe de elétrons, por ser mais sofisticada, apresenta uma estrutura de revestimento colunar, permitindo uma maior confiabilidade ao corpo de trabalho contra delaminação.

O aumento da capacidade de isolamento térmico surge, claramente, como um desafio técnico e econômico para os engenheiros de superfícies. A redução da condutividade térmica dos TBC permitirá o aumento do desempenho das turbinas, reduzindo o consumo específico de combustível, além de contribuir para a redução da refrigeração interna e da temperatura das partes metálicas.

As técnicas de testes e ensaios em laboratórios são de muita importância, pois, estudam a fundo os revestimentos e como eles se comportam. Assim, é possível prever quando o revestimento irá falhar, melhorando sua durabilidade e outros fatores.

Os estudos realizados são de uma elevada magnitude, pois eles afetam diretamente o modo de funcionamento de máquinas; elementos da indústria de base. Quando se fala de eficiência, se fala em energia, e esse impacto pelo aumento da eficiência, pode ser visto não apenas economicamente, como uma evolução ambientalmente sustentável, por exemplo na redução de combustíveis.

Para trabalhos futuros, sugere-se uma análise apurada sobre o cenário dos recobrimentos térmicos no Brasil, não apenas atrelado à construção de palhetas de turbina a gás.

Cabe ressaltar que os resultados obtidos não são permanentes, considerando a singularidade dos métodos utilizados no trabalho. Com o avanço tecnológico, e as crescentes demandas na área, que requer novas condições de serviço em altas temperaturas, as pesquisas devem evoluir, na tentativa de se buscar melhorias em relação ao desempenho em serviço ou aumento do ciclo de vida de TBC's.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D. S., Tese de doutorado. INPE. **Estudo de revestimentos cerâmicos sobre substrato metálico, obtidos por deposição física de vapores por feixe de elétrons para aplicação como barreira térmica**, São José dos Campos, 2005.

BOYCE, M. P. **Gas Turbine Engineering Handbook**. 2ª. ed. Houston: Butterworth-Heinemann, 2002.

CLARKE, D. R.; OECHSNER, M.; PADTURE, N. P. **MRS Bulletin**, v. 37, p. 891 - 923, Outubro 2012.

COHEN, H.; ROGERS, G. F. C.; SARAVANAMUTTOO, H. I. H. **Gas Turbine Theory**. 4ª. ed. Harlow: Harlow: Longman Group, 1996.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. **Dicionário Aurélio da língua portuguesa**. 5ª Edição. Curitiba: Positivo, 2004.

FUNCIONAMENTO DE UMA TURBINA A GÁS. Tecmundo, 2012. Disponível em: < <https://www.tecmundo.com.br/aviao/33110-como-funciona-um-motor-com-turbina-a-gas-de-um-aviao-infografico-.htm>>.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA. ITA, 2019. Disponível em: < http://www.ita.br/noticias/turbinas_a_gas >. Acesso em: 20, outubro de 2019>.

LIMAR, Carlos Roberto Camello. **Revestimentos para barreira térmica: evolução e perspectivas**. Soldag. insp. [online]. 2014, vol.19, n.4, pp.353-363. Out/Dez 2014.

MARTENA, M. et al. Modelling of TBC system failure: Stress distribution as a function of TGO thickness and thermal expansion mismatch. **Engineering Failure Analysis**, Abril 2006.

METTECH. Coating Technology, c2019. Página inicial. Disponível em: <<https://www.mettech.com/coating-technology/axial-III-plasma-spray.php>>. Acesso em: 15 de maio. de 2019.

MORESI, Eduardo. Metodologia da Pesquisa, 2003 (Programa de Pós- Graduação stricto Sensu em Gestão do Conhecimento e Tecnologia da Informação).

PADTURE, N. P.; GELL, M.; JORDAN, E. H. Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications. **Science**, 12 Abril 2002.

RESEARCHGATE. Cross-sectional-view-of-a-TBC, c2001.. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Cross-sectional-view-of-a-TBC-over-turbine-blade-the-blue-diagram-shows-the-temperature_fig3_267426416>. Acesso em: 15 de maio. de 2019.

REYHANI, M. R. et al. Turbine blade temperature calculation and life estimation - a sensitivity analysis. **Propulsion and Power Research**, Junho 2013. p. 148-161.

S. Sampath, U. Schulz, M. O. Jarligo, S. Kuroda. **MRS Bulletin**, v. 37, 10, Outubro 2012.

SILVA, E. L., MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000, 118p.

SOUZA, L. A., Dissertação de mestrado. UFOP. **Efeito Da Barreira Térmica Em Uma Palheta Aisi 316 Utilizada Para Turbina A Gás**, 2017.

SUCHARSKI, G. B., Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Paraná. **Deposição de revestimentos tipo barreira térmica por aspersion térmica**, p. 27 – 40, Defesa: Curitiba, 10/07/2012.

SUNG Ryul CHOI, John W. HUTCHINSON, A.G. EVANS, Artigo: **Delamination of multilayer thermal barrier coatings**, 1999.

SUNG SUNG RYUL CHOI, JOHN W. HUTCHINSON , A.G. EVANS, 1999

SWRI. **Centrifugal Compressors Gas Turbine Services**, c2019. Disponível em: <<https://www.swri.org/industries/centrifugal-compressors-gas-turbine-services>>. Acesso em: 20 de maio. de 2019.

Wellman, R. G.; Nicholls, J. R. **Some observations on erosion mechanisms** of EB-PVD TBCs. *Wear*, v. 242, n. 1-2, p. 89-96, 2000.