

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ESTUDO DE MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO DE
BOCAIS DE MOTOR DE FOGUETE A PROPELENTE
HÍBRIDO**

FÁBIO SILVA DE OLIVEIRA

ORIENTADORA: PALLOMA VIEIRA MUTERLLE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM - 192A/2013

BRASÍLIA/DF: JUNHO – 2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DE MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO DE BOCAIS DE
MOTOR DE FOGUETE A PROPELENTE HÍBRIDO**

FÁBIO SILVA DE OLIVEIRA

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA
DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

APROVADA POR:

Prof^a Palloma Vieira Mutterle, PhD (ENM-UnB)
(Orientadora)

Prof. Cosme Roberto Moreira da Silva, PhD (ENM-UnB)
(Examinador Interno)

Prof., Manuel Nascimento Dias Barcelos Júnior, PhD (UnB-Gama)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 19 DE JUNHO DE 2013

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, FÁBIO SILVA DE

Estudo de materiais para fabricação de bocais de motor de foguete a propelente híbrido [Distrito Federal] 2013.

xvii, 122p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2013).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Motor de foguete híbrido

2. Tubeira

3. Barreira térmica

4. Revestimento Cerâmico

5. Zircônia estabilizada com ítria

6. Pulverização térmica

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, F. S. (2013). Estudo de materiais para fabricação de bocais de motor de foguete a propelente híbrido. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Publicação ENM.DM-192A/2013, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 122p.

1.1 CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Fábio Silva de Oliveira.

TÍTULO: Estudo de materiais para fabricação de bocais de motor de foguete a propelente híbrido.

GRAU: Mestre

ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Fábio Silva de Oliveira

Rua Newton de Souza n° 7, Centro.

757.80-000 Ipameri – Go – Brasil.

RESUMO

ESTUDO DE MATERIAIS PARA FABRICAÇÃO DE BOCAIS DE MOTOR DE FOGUETE A PROPELENTE HÍBRIDO.

O bocal do motor de foguete a propelente híbrido, responsável pela aceleração dos gases da combustão, está sujeito a elevadas temperaturas (cerca de 2000 °C) requisitando o emprego de materiais ou técnicas que permitam o trabalho em tais condições, sem resultar na falha do motor durante o seu funcionamento. A solução proposta neste trabalho é o emprego de ligas de CuCr na fabricação de bocais. A escolha deste material se deve ao fato do mesmo apresentar elevada condutividade térmica, resistência à corrosão e boa resistência mecânica, além de baixo custo e facilidade de fabricação de bocais comparada com tubeiras de carbono-carbono. Porém, o seu ponto de fusão, entorno de 1080°C, é inferior à temperatura dos gases quentes. Para solucionar este problema, foram estudados revestimentos cerâmicos para atuar como barreira térmica. Neste estudo bocais de CuCr foram fabricados e posteriormente revestidos com zircônia estabilizada com ítria pelo processo de pulverização térmica. Testes em bancada foram realizados nos bocais, com e sem revestimento, para avaliar o desempenho em exercício. Testes com bocais de carbono-carbono e grafite também foram realizados para comparação, uma vez que estes são o estado-da-arte na aplicação em foguetes sólidos. Os bocais de CuCr com revestimento cerâmico apresentaram desempenho satisfatório, tornando-se candidatos para futuras aplicações associado ao processo de refrigeração regenerativa com óxido nitroso.

Palavras chaves: motor de foguete híbrido, tubeira, barreira térmica, revestimento cerâmico, zircônia estabilizada com ítria, pulverização térmica.

ABSTRACT

STUDY OF MATERIALS FOR THE MANUFACTURE OF HYBRID PROPELLANT ROCKET NOZZLE.

The nozzle of the hybrid propellant rocket motor, responsible for accelerating the combustion gases is subjected to high temperatures (around 2000 ° C) requesting the use of materials and techniques to work under such conditions without resulting in failure of the motor during operation. The solution proposed in this work is the use of CuCr alloys in manufacturing nozzles. The choice of this material is related to its high thermal conductivity, good corrosion resistance and mechanical strength, low cost and easy fabrication compared to carbon-carbon nozzles. However, its melting point around 1080 °C, is lower than the hot gases temperature. For solving this problem, ceramic coatings were studied to act as a thermal barrier. In this study, CuCr nozzles were manufactured and subsequently coated with yttria stabilized zirconia by the thermal spray process. The experiments in test bench were carried out in the nozzles, with and without coating, to evaluate their performance. Tests with carbon-carbon and graphite nozzles were also carried out for comparison, since they are the state-of-art in the application in solid rockets. The CuCr nozzles with ceramic coating exhibited satisfactory performance, becoming a future candidate for applications associated with regenerative cooling process with nitrous oxide

Keywords: hybrid rocket engine, nozzles, thermal barrier, ceramic coating, yttria stabilized zirconia, thermal spray

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	SISTEMAS DE PROPULSÃO DE FOGUETES	4
2.2	BOCAL CONVERGENTE-DIVERGENTE	6
2.3	PAR PROPELENTE DE MOTORES HÍBRIDOS	7
2.3.1	Reação de combustão no motor do foguete	7
2.4	TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM BOCAIS DE FOGUETE	9
2.4.1	Condução na parede do bocal	10
2.4.2	Transferência de calor convectiva na parede interna do bocal	14
2.4.3	Transferência de calor por radiação	15
2.5	REVESTIMENTOS DE BARREIRA TÉRMICA	16
2.5.1	Materiais para TBCs	18
2.5.1.1	Zirconia	19
2.5.1.2	Alumina	23
2.5.1.3	Mullite	25
2.5.1.4	Óxido de lantânio-titânio-alumínio (LaTi ₂ Al ₉ O ₁₉ . LTA)	26
2.5.1.5	Outros materiais	28
2.5.2	Processos para aplicação de TBCs – Pulverização térmica	30
2.5.2.1	Pulverização a plasma	32
2.5.3	Características do revestimento por pulverização térmica	34
2.6	SUBSTRATO METÁLICO PARA TBCs (LIGA DE Cu)	37
2.7	CARBONO-CARBONO	38
2.7.1	Fabricação de compósitos de carbono-carbono	39
2.7.1.1	Revestimento do compósito de carbono-carbono	41
2.7.1.2	Propriedades térmicas de compósitos de carbono-carbono	42
2.8	GRAFITE	42
2.9	TERMOPAR COMO UM SISTEMA DE PRIMEIRA ORDEM	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	BANCADA DE TESTES	46
3.2	GEOMETRIA DA TUBEIRA E MATERIAIS DE FABRICAÇÃO	51
3.3	FABRICAÇÃO DAS TUBEIRAS DE CARBONO-CARBONO	53

3.3.1	Tecido de fibra de carbono	53
3.3.2	Estrutura de reforço combinado	53
3.3.3	Impregnação com Pirocarbono.....	54
3.3.4	Processo de revestimento de SiC.....	56
3.4	BOCAIS DE COBRE-CROMO COM REVESTIMENTO	58
3.4.1	Medida de rugosidade.....	58
3.5	CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES	59
3.5.1	Tempo de resposta dos termopares.....	61
3.6	TESTES E AQUISIÇÃO DE DADOS	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
4.1	REVESTIMENTO DOS BOCAIS	66
4.2	LEITURA DOS TERMOPARES	68
4.3	ANÁLISE DOS BOCAIS TESTADOS.....	76
4.3.1	Bocal B1	76
4.3.2	Bocal B2	78
4.3.3	Bocal B2a	78
4.3.4	Bocal B3	79
4.3.5	Bocal B3a	81
4.3.6	Bocal B4 (CuCr sem revestimento).....	81
4.3.7	Bocal B4a (CuCr com revestimento).....	83
4.3.8	Comparação dos desgastes observados	85
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	91
ANEXOS		
	A - GRÁFICOS COM A CURVA DE TEMPERATURA REGISTRADA PELOS TERMOPARES 1 E 2 JUNTAMENTE COM A CURVA DE PRESSÃO NA CÂMARA.....	97
	B - MODELO 3D DO MOTOR MONTADO E DESENHOS TÉCNICOS.....	104

LISTA DE TABELAS

TABELA 2-1 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS AMOSTRAS DE LTA DETERMINADA PELA TÉCNICA DE ENDENTAÇÃO (MODIFICADO – XIE ET AL. 2011).....	28
TABELA 2-2 – MATERIAIS PARA TBC E SUAS CARACTERÍSTICAS (MODIFICADO – CAO ET AL. 2004)	29
TABELA 3-1 – NOMENCLATURA E DESCRIÇÃO DOS BOCAIS UTILIZADOS NOS TESTES EM BANCADA.....	52
TABELA 3-2 - PROPRIEDADES DA LIGA DE CuCr FORNECIDAS PELO FABRICANTE.....	58
TABELA 3-3 – RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES.....	60
TABELA 3-4 – LEITURAS E MÉDIA DOS TEMPOS DE RESPOSTAS DOS TERMOPARES 1 E 2.....	62
TABELA 4-1 – VALORES DA RUGOSIDADE RA DOS BOCAIS TESTADOS.	68
TABELA 4-2 – VALORES DAS TEMPERATURAS MÁXIMAS E MÍNIMAS DE ACORDO COM O GRÃO COMBUSTÍVEL UTILIZADO E O TEMPO DE QUEIMA.	70
TABELA 4-3 - MÉDIA DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA REGISTRADAS PELOS TERMOPARES 1 E 2 PARA CADA ENSAIO.	73
TABELA 4-4 – DADOS DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO NA PLACA DE ORIFÍCIO, CÂMARA DE COMBUSTÃO, VALORES DE EMPUXO E RAZÃO O/F DURANTES OS TESTES REALIZADOS.	75
TABELA 4-5 – DESCRIÇÃO DO DESGASTE EM FUNÇÃO DO TIPO DE BOCAL E TEMPO DE QUEIMA.	86

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2-1- DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM SISTEMA DE PROPULSÃO LÍQUIDA. (MODIFICADO - CANTWELL, 2007)	5
FIGURA 2-2 – DESENHO ESQUEMÁTICO DE UM MOTOR DE FOGUETE A PROPULSÃO SÓLIDA. . (MODIFICADO - CANTWELL, 2007).....	5
FIGURA 2-3 – ESQUEMA DE UM MOTOR DE FOGUETE A PROPULSÃO HÍBRIDA. (MODIFICADO - CANTWELL, 2007)	5
FIGURA 2-4 – CONFIGURAÇÃO DE UM BOCAL CONVERGENTE-DIVERGENTE. (MODIFICADO - O’LEARY & BECK, 1992)	6
FIGURA 2-5 - PROCESSO DE COMBUSTÃO DE MOTOR HÍBRIDO ILUSTRANDO A ZONA DE COMBUSTÃO. (MODIFICADO - SUTTON & BIBLARZ 2001).	8
FIGURA 2-6 - DINÂMICA DA QUEIMA DA PARAFINA NA INTERFACE OXIDANTE-COMBUSTÍVEL. (MODIFICADO - KARABEYOGLU ET AL. 2003)	8
FIGURA 2-7- CONDUÇÃO DE CALOR UNIDIMENSIONAL ATRAVÉS DE UM ELEMENTO DE VOLUME EM UM CILINDRO LONGO. (CENGEL, 2002)	10
FIGURA 2-8 – SEÇÃO DE CORTE ESQUEMÁTICA DE UM SISTEMA DE BARREIRA TÉRMICA MOSTRANDO O TBC, A CAMADA DE LIGAÇÃO, O ÓXIDO TERMICAMENTE CRESCIDO E O SUBSTRATO (MODIFICADO- ALMEIDA 2005).....	12
FIGURA 2-9- COMPARAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA MASSA DE ZIRCÔNIA ESTABILIZADA COM ÍTRIA E DO TBC APLICADO PELOS PROCESSOS DE EB-PVD E PLASMA SPRAY (MODIFICADO - NICHOLLS ET AL. 2002).	18
FIGURA 2-10- DIAGRAMA DE FASE DO SISTEMA $ZrO_2 - Y_2O_3$: TODAS AS FASES DESCRITAS SÃO SOLUÇÕES SÓLIDAS. TZP = ZIRCÔNIA TETRAGONAL POLICRISTALINA, PSZ= ZIRCÔNIA PARCIALMENTE ESTABILIZADA, CSZ = ZIRCÔNIA CÚBICA ESTABILIZADA (SMALLMAN & NGAN, 2007).	21
FIGURA 2-11 – PARTE DO DIAGRAMA DE FASE DA ZIRCÔNIA/CÁLCIA; SS REPRESENTA SOLUÇÃO SÓLIDA (MODIFICADO - CALLISTER 2007)	23
FIGURA 2-12 – DIAGRAMA DE FASE DO ÓXIDO DE ALUMÍNIO/ÓXIDO DE CROMO (MODIFICADO – CALLISTER, 2007).....	24
FIGURA 2-13 – DIAGRAMA DE FASE SILICA/ALUMINA (MODIFICADO - CALLISTER 2007).....	25
FIGURA 2-14 – DIFUSIVIDADE TÉRMICA DO VOLUME DE LTA (PREPARADO POR PRENSAGEM A FRIO E SINTERIZAÇÃO À 1600°C POR 72 HORAS) E REVESTIMENTO PULVERIZADO (COMO REVESTIMENTO) (MODIFICADO – XIE ET AL. 2011)	26

FIGURA 2-15 –CAPACIDADE DE CALOR ESPECÍFICA DA LTA (MODIFICADO- XIE ET AL. 2011)	27
FIGURA 2-16 – GRÁFICO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA VERSOS COEFICIENTE DE EXPANSÃO TÉRMICA (MODIFICADO – HASS 2000)	30
FIGURA 2-17- FORMAÇÃO DE UM REVESTIMENTO POR PULVERIZAÇÃO TÉRMICA (MODIFICADO- BABIAK ET AL. 2006)	31
FIGURA 2-18 – CLASSIFICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE PULVERIZAÇÃO TÉRMICA DE ACORDO COM A FONTE DE ENERGIA (MODIFICADO- BABIAK ET AL. 2006)	32
FIGURA 2-19 – PRINCÍPIO DE PULVERIZAÇÃO A PLASMA (SMALLMAN & NGAN, 2007)	33
FIGURA 2-20 – ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DA MORFOLOGIA DOS POROS (A) YSZ DEPOSITADA POR PULVERIZAÇÃO A PLASMA MOSTRA-SE GROSSEIRA, POROS NA FORMA DE DISCOS PARALELAMENTE ALINHADOS A SUPERFÍCIE DO SUBSTRATO E (B) REVESTIMENTO DE YSZ POR EB-PVD COM POROS LONGADOS PERPENDICULARMENTE ALINHADOS A SUPERFÍCIE DO SUBSTRATO (MODIFICADO- HASS, 2000)	35
FIGURA 2-21 – CONDUTIVIDADE TÉRMICA DA CERÂMICA DE ZIRCÔNIA E TBCs DE ZIRCÔNIA EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE ÍTRIA (MODIFICADO- NICHOLLS ET AL. 2002).	36
FIGURA 2-22 – DIAGRAMA DE FASE DO SISTEMA CU-CR (MODIFICADO - CHAKRABARLI & LAUGHLIN, 1984).	38
FIGURA 2-23 – DIAGRAMA DE BLOCO DE UM SISTEMA DE PRIMEIRA ORDEM. (OGATA, 2002)	43
FIGURA 2-24 – CURVA DE RESPOSTA EXPONENCIAL. (MODIFICADO - OGATA, 2002)	45
FIGURA 3-1 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA BANCADA DE TESTES. 1- CENTRAL DE COMANDO, 2- ESTRUTURA DE APOIO MÓVEL, 3-BALANÇA DE EMPUXO, 4- MOTOR, 5- TANQUE DE AR COMPRIMIDO, 6- TANQUE DE OXIGÊNIO, 7- TANQUE DE GLP, 8- BATERIA E 9- PLACA DE ORIFÍCIO.	46
FIGURA 3-2 – FOTO DO MOTOR MONTADO NA BALANÇA DE EMPUXO.	47
FIGURA 3-3- DESENHO ESQUEMÁTICO DOS COMPONENTES UTILIZADOS NA MONTAGEM DO MOTOR. 1-PORCA M16, 2- GRÃO COMBUSTÍVEL, 3- PARAFUSO M16, 4- CÂMARA DE CELERON, 5- FLANGE Nº 1, 6- FLANGE Nº 2, 7- CASE DE NYLON®, 8- CÂMARA DE COBRE DO SISTEMA DE INJEÇÃO E 9- BOCAL CONVERGENTE-DIVERGENTE. ...	48
FIGURA 3-4 – SISTEMA DE INJEÇÃO DO MOTOR. 1- ENTRADA DE OXIGÊNIO, 2- ENTRADA DE ÁGUA, 3- ENTRADA DE GLP, 4- ENTRADA DE AR COMPRIMIDO, 5- TRANSDUTOR DE PRESSÃO E 6- VELA DE IGNIÇÃO.	48

FIGURA 3-5 – VISTA TRASEIRA DA BANCADA DE TESTE COM O SISTEMA DE INJEÇÃO E PLACA DE ORIFÍCIO PARA QUEDA DE PRESSÃO. 1- TERMOPARES, 2- PLACA DE ORIFÍCIO, 3- TRANSDUTORES DE PRESSÃO E 4 – CONEXÃO EM T PARA A DIVISÃO DO FLUXO DE OXIGÊNIO NA ENTRADA DO SISTEMA DE INJEÇÃO.....	49
FIGURA 3-6 – FOTOS DA MONTAGEM DA CÂMARA DE FIXAÇÃO DA TUBEIRA COM OS TERMOPARES.	50
FIGURA 3-7 - DIMENSÕES DOS BOCAIS TESTADOS.....	51
FIGURA 3-8 – ESTRUTURA DA PRÉ-FORMA DE TECIDO DE FIBRA DE CARBONO.....	53
FIGURA 3-9 - APARÊNCIA ORIGINAL DA UNIDADE AGATE-1.6.....	55
FIGURA 3-10 – APARÊNCIA ORIGINAL DA PRÉ-FORMA DENTRO DA CÂMARA DA AGATE-1.6.	55
FIGURA 3-11 - PRÉ-FORMA DE CCCM COM TECIDO DE FIBRA DE CARBONO.....	56
FIGURA 3-12 – APARÊNCIA E ESQUEMA DO EQUIPAMENTO INDUSTRIAL PARA A EXECUÇÃO DOS PROCESSOS DE ALTA TEMPERATURA DAS AMOSTRAS COM BASE NA INSTALAÇÃO DA AGATE	57
FIGURA 3-13- RUGOSÍMETRO PARA A MEDIDA DA RUGOSIDADE MÉDIA DAS TUBEIRAS.	59
FIGURA 3-14 – FOTO DO TERMOPAR UTILIZADO NO MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DO BOCAL.....	60
FIGURA 3-15 – SISTEMA MONTADO PARA A CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES.....	60
FIGURA 3-16 – EQUIPAMENTO PARA BANHO LÍQUIDO MODELO F25 DA JULABO.....	61
FIGURA 3-17 – FOTOS DO FLANGE DE INOX ANTES E APÓS O TESTE, PODENDO OBSERVAR O DESGASTE DEVIDO A AGRESSIVIDADE DA QUEIMA.	63
FIGURA 3-18 – FOTOS DA TUBEIRA NO INTERIOR DA CÂMARA DE REFRIGERAÇÃO ANTES E APÓS O TESTE.....	63
FIGURA 3-19 – TAMPA DE CELERON ENCAIXADA NO FINAL DO GRÃO PARA PROTEÇÃO DO FLANGE.....	64
FIGURA 3-20 – TAMPA DE CELERON E O FLANGE DE AÇO INOX SUBSTITUÍDOS APÓS O 12° TESTE.....	64
FIGURA 3-21 – SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DA LYNX UTILIZADO DURANTES OS TESTES NA BANCADA.	65
FIGURA 4-1 – REVESTIMENTO DE SiC APLICADO NAS TUBEIRAS DE GRAFITE.	66
FIGURA 4-2 – REVESTIMENTO NOS BOCAIS B2A (ESQUERDA) E B3A (DIREITA).	66
FIGURA 4-3- REVESTIMENTO DO BOCAL B4A1.	67
FIGURA 4-4- FOTOS DO REVESTIMENTO DO BOCAL B4A2.	67

FIGURA 4-5 - POSIÇÕES DAS LEITURAS DE TEMPERATURAS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE TESTE NOS GRÁFICOS DOS RESULTADOS.	69
FIGURA 4-6 – CARACTERIZAÇÃO DA CURVA DE PRESSÃO NA CÂMARA EM FUNÇÃO DO TEMPO.	69
FIGURA 4-7- TESTE COM O BOCAL B3-2 COM 5,2 SEGUNDOS DE DURAÇÃO, AONDE SÃO OBSERVADOS UMA GRANDE QUANTIDADE DE PARTÍCULAS METÁLICAS SENDO EJETADAS DURANTE A QUEIMA DO GRÃO.	71
FIGURA 4-8 - FOTO DO MOMENTO EM QUE A CHAMA DO TESTE DE 13 SEGUNDOS COM O BOCAL B4 (CuCr SEM REVESTIMENTO) APRESENTA COLORAÇÃO ESVERDEADA, INDICANDO A FUSÃO DO MATERIAL DO BOCAL.....	72
FIGURA 4-9 - MÉDIA DAS TEMPERATURAS DOS TERMOPARES T1 E T2 EM ORDEM DECRESCENTE NO FINAL DO TESTE E TEMPO DE QUEIMA PARA CADA BOCAL ENSAIADO.	74
FIGURA 4-10 – FOTOS DO BOCAL B1-1 DA SEÇÃO CONVERGENTE (A), DIVERGENTE (B) E DE PERFIL (C).	76
FIGURA 4-11- FOTOS DO BOCAL B1-2 APÓS O TESTE AONDE É POSSÍVEL VISUALIZAR A TRINCA NA SEÇÃO LONGITUDINAL DO BOCAL.	77
FIGURA 4-12- FOTO DO BOCAL B1-2 AINDA INCANDESCENTE APÓS O TESTE, POSSIBILITANDO A VISUALIZAÇÃO DA TRINCA NA PARTE SUPERIOR DA FIGURA.	77
FIGURA 4-13 – FOTO DA SEÇÃO CONVERGENTE (A) E DIVERGENTE (B) DO BOCAL B2.....	78
FIGURA 4-14 – FOTOS DO CONVERGENTE (ESQUERDA) E DIVERGENTE (DIREITA) DA TUBEIRA B2A-1.	79
FIGURA 4-15 – FOTOS DO CONVERGENTE (ESQUERDA) E DIVERGENTE (DIREITA) DA TUBEIRA B2A-2.	79
FIGURA 4-16 – TUBEIRAS B3-2(ESQUERDA) E B3-1(DIREITA), FOTO DO CONVERGENTE.	80
FIGURA 4-17 – CONVERGENTE (ESQUERDA) E DIVERGENTE (DIREITA) DA TUBEIRA B3-2.....	80
FIGURA 4-18 – VISTA LATERAL DA TUBEIRA B3-2.	80
FIGURA 4-19 – CONVERGENTE (ESQUERDA) E DIVERGENTE (DIREITA) DA TUBEIRA B3-1.....	81
FIGURA 4-20 – FOTO DO CONVERGENTE (ESQUERDA) E DIVERGENTE (DIREITA) DO BOCAL B3A.	81
FIGURA 4-21 – BOCAL B4 ANTES DA REALIZAÇÃO DOS TESTES.....	82
FIGURA 4-22- FOTOS DO CONVERGENTE (ESQUERDA) E DO DIVERGENTE (DIREITA) APÓS O PRIMEIRO TESTE COM O BOCAL B4.....	82

FIGURA 4-23 – BOCAL B4 APÓS O SEGUNDO TESTE DE 13 SEGUNDOS MOSTRANDO A REGIÃO DE FUSÃO DO MATERIAL NO CONVERGENTE (ESQUERDA) E DIVERGENTE (DIREITA).	83
FIGURA 4-24- FOTOS DO CONVERGENTE (ESQUERDA) E DIVERGENTE (DIREITA) DO BOCAL B4A-1 APÓS O PRIMEIRO TESTE.	83
FIGURA 4-25- FOTOS DO BOCAL B4A-1 MOSTRANDO O DESGASTE NA GARGANTA VISTA PELO CONVERGENTE (ESQUERDA) E O ACÚMULO DE MATERIAL NO DIVERGENTE (DIREITA).	84
FIGURA 4-26- FOTO DO DIVERGENTE (ESQUERDA) E DO PONTO DE DESGASTE NA REGIÃO GARGANTA (DIREITA).	84
FIGURA 4-27- FOTOS DO CONVERGENTE DO BOCAL DESTACANDO O PONTO DE PERDA DE MATERIAL DO REVESTIMENTO.	85
FIGURA 4-28- FOTO DA SEÇÃO CONVERGENTE (ESQUERDA) E DOS PONTOS DE DESGASTES DO REVESTIMENTO (DIREITA).	85
FIGURA 5-1 – DESENHO ESQUEMÁTICO DA NOVA CONFIGURAÇÃO DA BANCADA DE TESTES DE MOTOR FOGUETE HÍBRIDO DA FACULDADE DO GAMA.	90

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES.

A	Área
k	Condutividade térmica
L	Comprimento
ρ	Densidade
ρ'	Densidade local
C	Calor específico
r	Raio
m	Massa
T	Temperatura
T_∞	Temperatura ambiente
T_w	Temperatura na parede
\dot{g}	Taxa de geração de calor por unidade de volume
α	Difusividade térmica do material
q_r	Taxa de transferência de calor por condução na direção radial
q_r''	Fluxo de transferência de calor radial
\ln	Logaritmo neperiano
μ	Viscosidade dinâmica
v	Velocidade do gás
Pr	Número de Prandtl
c_p	Calor específico a pressão constante
ε_e	Coefficiente de emissividade efetiva
ε_w	Coefficiente de emissividade do material da parede
$\varepsilon_r^{T_w}$	Coefficiente de emissividade dos produtos da reação na temperatura T_w
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
m	Fase monoclinica
t	Fase tetragonal
N	Newton
C_1 e C_2	Constantes de integração
$R_{t,cond}$	Resistência térmica para condução radial na parede cilíndrica
\dot{Q}_{conv}	Transferência de calor por convecção
h	Coefficiente de transferência de calor convectivo

0	Propriedades avaliadas na temperatura de estagnação
am	Propriedades na média aritmética
\dot{Q}_{cond}	Transferência de calor através da superfície de área
dT/dx	Gradiente de temperatura
\dot{Q}_r	Taxa de condução de calor em r
$\dot{Q}_{r+\Delta r}$	Taxa de condução de calor em $r + \Delta r$
$\dot{G}_{elemento}$	Taxa de geração de calor no elemento
$\Delta E_{elemento}$	Variação da quantidade de energia no elemento
Δt	Variação de tempo
$E_{t+\Delta t}$	Quantidade de energia do elemento no instante $t + \Delta t$
E_t	Quantidade de energia do elemento no instante t
$V_{elemento}$	Volume do elemento
GPA	Grupo de Pesquisas Aeroespaciais
UnB	Universidade de Brasília
ZrO ₂	Dióxido de Zircônio (Zircônia)
Y ₂ O ₃	Óxido de ítrio (íttria)
Cu	Cobre
Cr	Cromo
TBC	Thermal Barrier Coating (revestimento de barreira térmica)
O ₂	Oxigênio
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio
N ₂ O ₄	Tetróxido de nitrogênio
PMM	Polimetil-metacrilato
PE	Polietileno
HTPB	Polibutadieno terminado em hidroxila
N ₂ O	Óxido nitroso
C _n H _{2n+2}	Fórmula química da parafina
EB-PVD	Electron beam physical vapor depositio (Deposição física de vapores por feixe de elétrons)
APS	Air plasma sprayed (pulverizado por plasma a ar)
PS	Plasma spray (pulverização a plasma)
YSZ	Yttria Stabilized Zirconia (Zircônia estabilizada com ítria)
t -ZrO ₂	Fase tetragonal da zircônia

<i>TZP</i>	Zircônia tetragonal policristalina
<i>PSZ</i>	Zircônia parcialmente estabilizada
<i>CSZ</i>	Zircônia cúbica estabilizada
<i>LTA</i>	Latânio-Titânio-Alumínio
<i>YAG</i>	Granada de Ítrio-Alumínio
<i>MFPL</i>	Motor do foguete a propelente líquido
<i>SRMs</i>	Solid Rocket motors (Motor de foguete sólido)
<i>LEA</i>	Laboratório de Energia e Ambiente
<i>ENM</i>	Departamento de Engenharia Mecânica
<i>GLP</i>	Gás liquefeito de petróleo
<i>GOX</i>	Gás oxigênio
<i>RPA</i>	Rocket Propulsion Analysis (Análises de Propulsão de Foguetes)
<i>CCCM</i>	Carbon-Carbon Composite Material (Material compósito de carbono-carbono)
<i>HBR</i>	Dureza Brinell
<i>HBR</i>	Dureza Rockwell
<i>O/F</i>	Razão entre a massa de oxidante com a massa de combustível
<i>MFPH</i>	Motor de Foguete a Propelente Híbrido

1 INTRODUÇÃO

O Grupo de Pesquisas Aeroespaciais da Universidade de Brasília (GPA-UnB) vem desenvolvendo há alguns anos uma bancada de testes de um motor de foguete a propelente híbrido (MFPH). A escolha da propulsão híbrida para estudos acadêmicos se deve ao fato desta possuir algumas vantagens sobre a propulsão sólida e líquida, tais como, uso da metade da tubulação quando comparado com a propulsão líquida, maior segurança na operação do que o motor de foguete sólido além de possuir impulso específico próximo ao do motor foguete líquido (Chelaru & Mingireanu, 2011).

Apresentado primeiramente na Rússia, em 1930, os motores de foguete a propelente híbrido obtiveram a maior parte de seu desenvolvimento e pesquisa nos Estados Unidos, mas não lhe foram dadas sérias atenções até os anos sessenta. Os primeiros estudos para a aplicação dos MFPH foram: foguetes de sondagem, veículos lançadores de satélites, micro satélites e mísseis táticos. No entanto, atualmente, essa tecnologia pode ser aplicada para a substituição de motores de grande porte à propulsão sólida e em veículos civis sub-orbitais tripulados (Sutton & Biblarz, 2001). O mais recente emprego do foguete híbrido foi no veículo sub-orbital tripulado SpaceShipOne, que alcançou uma altitude de 120 km com um piloto humano. Este veículo foi inteiramente desenvolvido e lançado pela indústria privada. Novamente, a relativa segurança e confiabilidade do motor híbrido foi o fator chave na sua seleção (Turner, 2009).

A propulsão híbrida mescla características da propulsão líquida e sólida. Em geral utiliza-se um combustível sólido com oxidante líquido como propelentes (Sutton & Biblarz, 2001 e Cantwell, 2007). Uma reação de combustão entre os propelentes gera um gás com elevada temperatura e pressão numa câmara de combustão, sendo então acelerados através de um bocal convergente-divergente (Sutton & Biblarz, 2001 e Polyayev & Burkaltsev, 2002). Uma vez que, os gases de combustão possuem uma elevada temperatura, superior a temperatura de fusão do material de fabricação do bocal (1080°C), exige-se então, um sistema de refrigeração ou de materiais isolantes para absorver parte deste calor e evitar possíveis falhas dos bocais durante a operação (Schloesser et al. 2010).

Vários materiais são utilizados na fabricação de tubeiras para motores sólidos e líquidos, mas nenhum estudo para motores híbridos é encontrada na literatura, fazendo-se necessário a busca por alternativas que atendam os requisitos de um motor híbrido e tenha uma boa relação custo-benefício.

Em seu trabalho Bertoldo (2011), estuda a aplicação da zircônia (ZrO_2) parcialmente estabilizada com 8% de ítria (Y_2O_3) na liga UNS18200 na fabricação de câmara de empuxo de motor foguete a propelente líquido. Schloesser et al. (2010) aplica revestimento na forma de barreira térmica em ligas de CuCrZr (com 1% de Cr e 0,3% de Zr) pelo processo de pulverização térmica para aplicação em câmara de combustão de motor de foguete. O principal objetivo na construção de um bocal de foguete com materiais multicamadas é atenuar a vigorosa penetração de calor no substrato metálico. Pois a temperatura máxima que o substrato metálico suporta deve ser mantida abaixo do seu ponto de fusão (Alhama & Campo 2003). Com base nestes trabalhos, procura-se estender a ideia de aplicar revestimento na câmara de combustão de motor de foguete líquido e sólido, em bocais de motor de foguete híbrido.

A ideia é que o revestimento cerâmico crie uma barreira térmica artificial que retarda o fluxo de calor a partir dos gases da combustão turbulenta ao substrato metálico. Por esta razão, o conceito de revestimentos como barreira térmica (TBCs – Thermal Barrier Coatings) pode ser transferido para aplicações em foguetes fornecendo blindagens, térmica, contra oxidação, corrosão e resistência à erosão (Schloesser et al. 2010). Além disso, destaca-se a simplicidade da tecnologia utilizada na aplicação de TBCs.

Sistemas TBCs deve possuir uma combinação de propriedades para ser eficaz. Estes incluem uma baixa condutividade térmica, elevada resistência à fragmentação, boa resistência à erosão, a estabilidade de fase e estabilidade morfológica dos poros. Para aplicações de turbinas de aviões a resistência de fragmentação e a condutividade térmica do sistema de revestimento é o ponto mais crítico para o desempenho (Maricocchi et al. 1995).

Bocais fabricados com a liga UNS C18200 (CuCr) e revestidos com zircônia estabilizada com ítria são testados na bancada do GPA-UnB. Além dos bocais revestidos, são testados também bocais de CuCr sem revestimento, bocais de carbono-carbono e grafite. Estes dois últimos são analisados para comparação uma vez que são o estado-da-arte em foguetes a propelente sólido e normalmente utilizados em foguetes híbridos.

Nos ensaios é monitorada a temperatura na parede do bocal, pressão na câmara de combustão e empuxo. O desgaste durante a queima é avaliado, sendo possível ao final dos testes, construir uma tabela comparativa dos resultados determinando assim, quais dos bocais suportaram a carga térmica imposta pela combustão dos propelentes, possibilitando o funcionamento do motor.

Ao final do trabalho deseja-se determinar a eficiência dos bocais de CuCr com revestimento em comparação aos bocais de carbono-carbono e grafite, avaliando a possibilidade de utilizar essa configuração em trabalhos futuros com refrigeração regenerativa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS DE PROPULSÃO DE FOGUETES

Propulsão, no seu sentido mais amplo, é a ação de induzir uma massa a movimentar-se. No caso da propulsão a jato, a força imposta ao corpo é gerada pela ejeção de massa (valendo-se da terceira Lei de Newton – Ação e Reação). Restringindo o conceito ao âmbito da tecnologia de foguetes clássica, trata-se de qualquer veículo com propulsão a jato no qual a massa ejetada, que recebe o nome de propelente, está armazenada no próprio veículo (Humble *et al.*, 1995).

Existem diversos meios de conseguir a energia para a propulsão, dentre os mais utilizados estão: energia solar, elétrica, nuclear e química e outras menos usuais. O trabalho em questão é situado no campo da propulsão química (Humble *et al.*, 1995).

Em foguetes com propulsão química a energia é proveniente de uma reação química em uma câmara de combustão para produzir gás com alta pressão e elevada temperatura (2500 a 4100°C) na entrada do bocal convergente/divergente. Estes gases são expandidos no bocal, e este processo converte uma parte da energia térmica liberada na reação química em energia cinética associada a uma alta velocidade (1800 à 4300 m/s) do jato de exaustão dos gases (Sutton & Biblarz, 2001 e Polyakov & Burkal'tsev, 2002).

Foguetes com propulsão química podem ser classificados de acordo com o estado físico do propelente. Estes sistemas são: sólido, líquido e híbrido (Sutton & Biblarz, 2001).

Sistema de propulsão líquida (ver Figura 2-1) utiliza oxidante e combustível líquido, armazenados em tanques separados, os propelentes são bombeados para câmara de combustão, e um bocal de expansão que converte os gases quentes de alta pressão, produzidos pela combustão, numa corrente de gases em elevada velocidade. Em sistemas simples, o propelente alimenta a câmara de combustão através da pressão estática do tanque. A maioria dos grandes sistemas de propulsão líquida utiliza algum tipo de turbobomba para fornecer os propelentes à câmara de combustão (Turner, 2009 e Cantwell, 2007).

No caso da propulsão sólida, o combustível e o oxidante são misturados formando uma massa sólida chamada grão (ver Figura 2-2). Normalmente o grão possui um furo central e é fixado no interior da câmara de combustão. Após a ignição, o grão queima

radialmente e os gases quentes da combustão passam pelo furo central e são expelidos através do bocal (Mattingly, 2006).

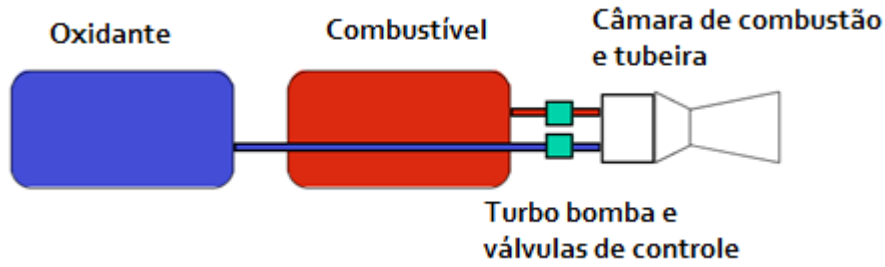


Figura 2-1- Desenho esquemático de um sistema de propulsão líquida. (modificado - Cantwell, 2007)

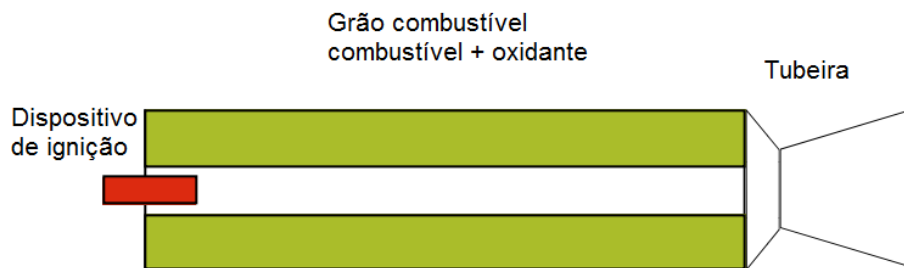


Figura 2-2 – Desenho esquemático de um motor de foguete a propulsão sólida. . (modificado - Cantwell, 2007)

Em propulsão híbrida um dos propelentes é armazenado na fase líquida e o outro na fase sólida (ver Figura 2-3). Geralmente é utilizado oxidante líquido e combustível sólido. Neste sistema, o oxidante é injetado em uma pré-câmara de combustão ou evaporação a montante do grão combustível. O grão possui várias portas de combustão axiais que geram vapores de combustível para reagir com o oxidante injetado (Sutton & Biblarz, 2001 e Cantwell, 2007).

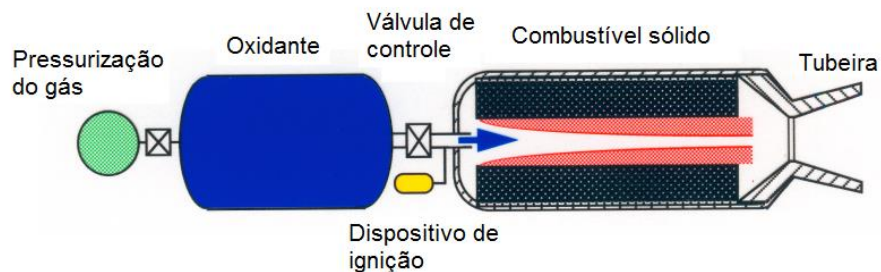


Figura 2-3 – Esquema de um motor de foguete a propulsão híbrida. (modificado - Cantwell, 2007)

2.2 BOCAL CONVERGENTE-DIVERGENTE

A função do bocal é converter a energia térmica em energia cinética, isto ocorre através da combustão dos propelentes na câmara de combustão, gerando os gases quentes que são então acelerados através do bocal divergente/convergente, atingindo alta velocidade (Haidn, 2008). A pressão e temperatura do gás caem drasticamente e sua velocidade aumenta e atinge valores elevados (Sutton & Biblarz (2001).

Em um bocal convergente, a velocidade do fluido é limitada à velocidade sônica, que pode ocorrer no plano de saída (garganta) do bocal. A aceleração de um fluido a velocidades supersônicas pode ser atingida apenas pela anexação de um trecho de duto divergente ao bocal subsônico na garganta. O duto combinado resultante é um bocal convergente-divergente (ver Figura 2-4), que é um equipamento padrão da propulsão de foguetes (Çengel & Boles, 2006).

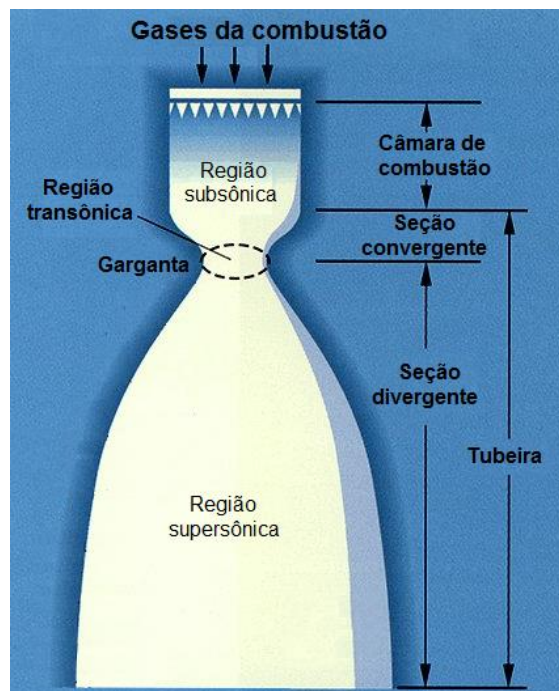


Figura 2-4 – Configuração de um bocal convergente-divergente. (modificado - O’Leary & Beck, 1992)

É desejável que a vazão mássica dos gases de combustão que escoam através da tubeira seja máxima, lembrando que o impulso específico e o empuxo dependem diretamente da vazão mássica. Esse valor é atingido em regime de escoamento bloqueado (choked flow), ou seja, dada uma pressão na câmara de combustão, a máxima vazão

mássica acontece quando a velocidade do escoamento na garganta da tubeira atinge a velocidade do som local, ou Mach 1 (Sutton & Biblarz, 2001).

2.3 PAR PROPELENTE DE MOTORES HÍBRIDOS

Em motores foguetes a propelente híbrido, em geral, utiliza-se o combustível em estado sólido, chamado de grão combustível, e o oxidante líquido. Os propelentes de foguetes híbridos, com poucas exceções, são polímeros à base de carbono em forma de plásticos ou borrachas. Exemplos de combustíveis típicos incluem acrílico (*plexiglass*), polimetil-metacrilato (PMM), polietileno (PE), polibutadieno terminado em hidroxila (HTPB) e parafinas. Esses polímeros, com exceção da parafina, têm nas terminações de suas cadeias hidroxilas e carboxilas (Sutton & Biblarz, 2001 e Turner, 2009).

Os oxidantes mais utilizados são: oxigênio (O_2) líquido ou gasoso, peróxido de hidrogênio (H_2O_2), tetróxido de nitrogênio (N_2O_4), óxido nitroso (N_2O) e flúor.

A seleção do par propelente depende de vários fatores, dentre os quais estão: a segurança, custo, estocagem, disponibilidade, toxicidade, poluição ambiental, e propriedades mecânicas (no caso do propelente sólido).

2.3.1 Reação de combustão no motor do foguete

O par propelente utilizado no projeto foi: oxigênio (O_2) e a parafina (C_nH_{2n+2}). O oxigênio em estado gasoso é injetado na câmara de combustão onde é iniciado o processo de combustão com a parafina.

A Figura 2-5 representa a dinâmica do processo. A parafina inicialmente em estado sólido recebe calor transferido da zona de chama e vaporiza, em seguida é convectada para a zona de chama enquanto parte do fluxo central de óxido nitroso é transportado para a zona de chama por difusão e turbulência. Segundo Sutton & Biblarz (2001), a chama é estabelecida na camada limite onde uma razão de mistura aproximadamente estequiométrica é alcançada, sua posição depende das condições de combustão e sua espessura depende da taxa de oxidação da reação que por sua vez depende da pressão.

Podemos citar várias vantagens da parafina sobre os outros tipos de combustíveis convencionais para motores híbridos como a disponibilidade, custo, inércia química, propriedades mecânicas, mas sem dúvida a maior delas é a elevada taxa de regressão.

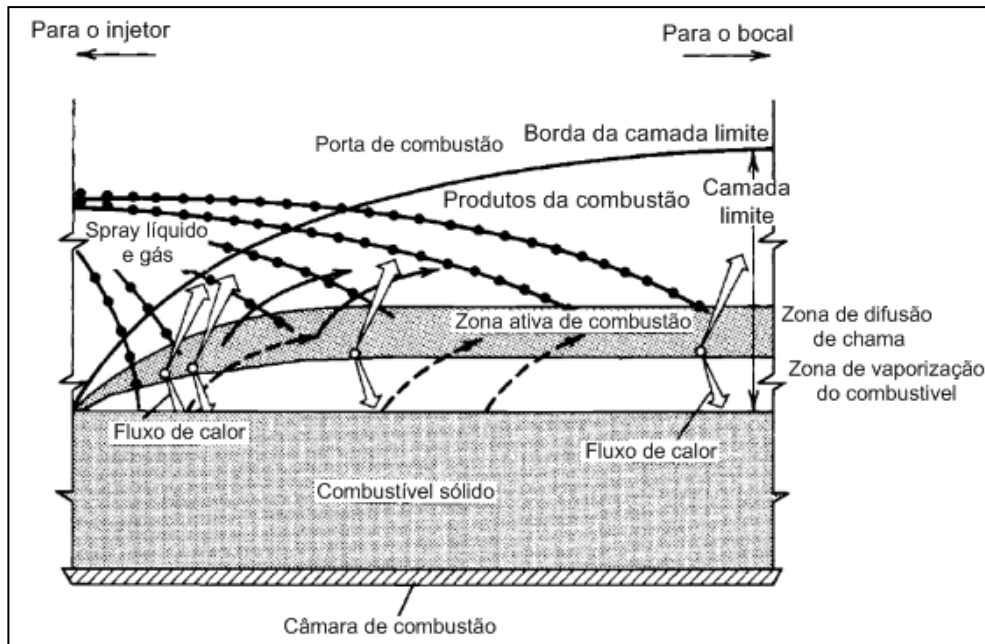


Figura 2-5 - Processo de combustão de motor híbrido ilustrando a zona de combustão.
(modificado - Sutton & Biblarz 2001).

Segundo Karabeyoglu et al. (2003), a alta taxa de regressão da parafina é devida a criação de uma fina camada líquida, com baixa tensão superficial e viscosidade, na superfície interna do grão (porta de combustão). A instabilidade desta camada é guiada pelo escoamento de oxidante que proporciona o descolamento e a entrada de gotículas de combustível na corrente gasosa, aumentando consideravelmente a taxa de transferência de massa de combustível (ver Figura 2-6).

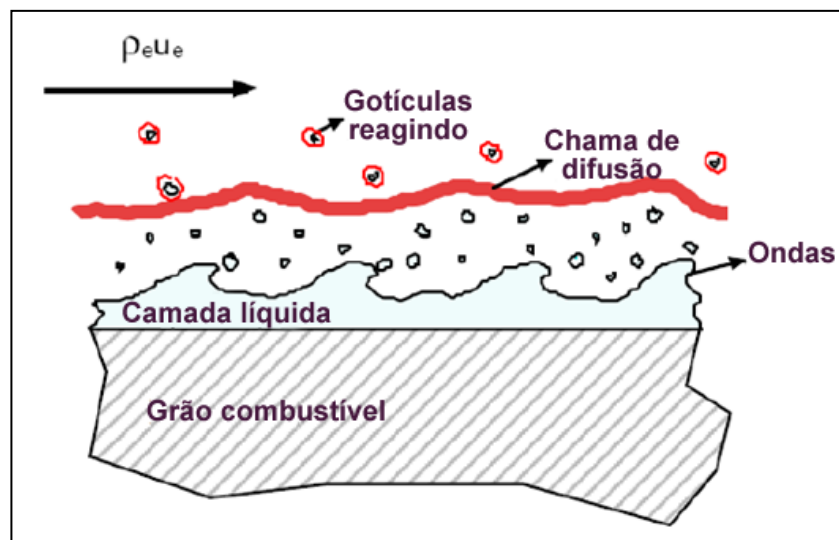


Figura 2-6 - Dinâmica da queima da parafina na interface oxidante-combustível.
(modificado - Karabeyoglu et al. 2003)

A transferência de gotículas não é limitada pela transferência de calor por difusão da zona de combustão para o combustível, conseqüentemente este mecanismo pode levar a uma taxa de regressão muito maior do que as apresentadas por combustíveis poliméricos convencionais que dependem somente da evaporação.

2.4 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM BOCAIS DE FOGUETE

No atual desenvolvimento de foguetes, não é analisada somente a transferência de calor, mas as unidades do foguete são quase sempre testadas para assegurar que o calor seja transferido satisfatoriamente em todas as condições operacionais e de emergência. Cálculos da transferência de calor são úteis para orientar o projeto, testes e a investigação de falhas (Sutton & Biblarz 2001).

Importantes áreas de pesquisas relacionadas à transferência de calor de bocais de foguete incluem: a previsão dos coeficientes de transferência de calor interna e externa, distribuição de temperatura do metal, métodos de arrefecimento da parede, e os revestimentos cerâmicos entre outros (Xiaoying 2011). A transferência de calor convectiva é afetada pela variação na entalpia do propelente, viscosidade, número de Prandtl, número de Mach, razão de calor específico, e peso molecular, cada um dos quais é por sua vez uma função das condições locais (Howell et al. 1965). Este é um fenômeno complexo e há considerável incerteza associada tanto com as provisões numéricas bem como com as medições experimentais (Xiaoying 2011).

Mironov (1966) obteve fórmulas para o cálculo da transferência de calor em bocais durante estudos experimentais. Nessas fórmulas os parâmetros básicos são a velocidade do fluxo de gás e as dimensões do bocal. O efeito de outros fatores é arbitrado, por exemplo, ao selecionar uma temperatura característica correspondente, introduzir fatores de correção e assim por diante.

Resultados mais eficazes podem ser obtidos pela combinação de dados experimentais com métodos teóricos, que leva em conta o desenvolvimento longitudinal da camada limite térmica. Bartz dá uma solução teórica aproximada do problema da transferência de calor em bocais. Nessa solução, a lei de atrito obtido por um gás incompressível, é estendida para incluir a compressibilidade pela introdução de uma média aritmética da temperatura característica (Mironov, 1966).

2.4.1 Condução na parede do bocal

Com a simetria axial do bocal, a condução na parede do bocal pode ser simplificada como uma condução unidimensional de estado estacionário em coordenadas cilíndricas para cada seção do bocal.

Para a transferência de calor por condução (lei de Fourier) a seguinte relação geral é aplicada:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (1)$$

onde \dot{Q} é a transferência de calor através da superfície de área A , dT/dx é o gradiente de temperatura em função da espessura x na superfície A , e k é a condutividade térmica expressa como a quantidade de calor transferida por unidade de tempo através da unidade de área da superfície para um grau (1°) de diferença de temperatura por unidade de espessura da parede. O sinal negativo indica que a temperatura decresce com o aumento da espessura (Sutton & Biblarz 2001).

Cengel (2002) considera um elemento cilíndrico de casca fina e espessura Δr ao longo do cilindro, como mostra a Figura 2-7. Assumindo a densidade do cilindro igual a ρ , o calor específico C , e o comprimento L . A área do cilindro na direção normal à transferência de calor em qualquer local é $A = 2\pi rL$, onde r é o valor do raio naquele local.

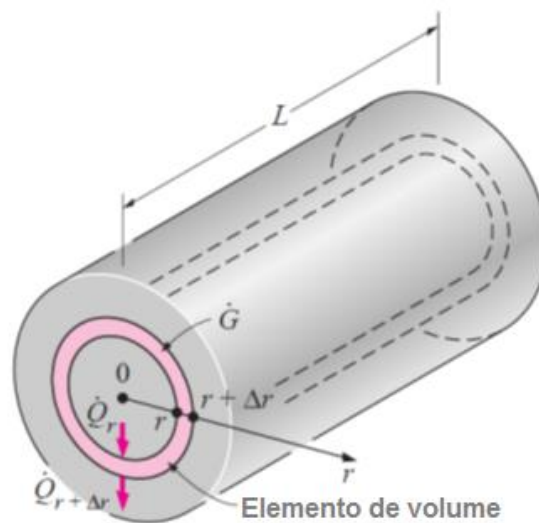


Figura 2-7- Condução de calor unidimensional através de um elemento de volume em um cilindro longo. (Cengel, 2002)

Note que a área da transferência de calor, neste caso, depende de r , variando com a posição. Um balanço de energia neste elemento cilíndrico de casca fina durante um pequeno intervalo de tempo Δt pode ser expresso como (Cengel, 2002):

$$\left(\begin{array}{l} \text{Taxa de} \\ \text{condução de} \\ \text{calor em } r \end{array} \right) - \left(\begin{array}{l} \text{Taxa de} \\ \text{condução de} \\ \text{calor em } r + \Delta r \end{array} \right) + \left(\begin{array}{l} \text{Taxa de} \\ \text{geração de calor} \\ \text{no elemento} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{l} \text{Taxa de} \\ \text{variação da} \\ \text{quantidade} \\ \text{de energia no} \\ \text{elemento} \end{array} \right)$$

ou

$$\dot{Q}_r - \dot{Q}_{r+\Delta r} + \dot{G}_{elemento} = \frac{\Delta E_{elemento}}{\Delta t} \quad (2)$$

A mudança na quantidade de energia do elemento e a taxa de geração de calor dentro do elemento pode ser expressa como:

$$\Delta E_{elemento} = E_{t+\Delta t} - E_t = mC(T_{t+\Delta t} - T_t) = \rho CA\Delta r(T_{t+\Delta t} - T_t), \quad (3)$$

$$\dot{G}_{elemento} = \dot{g}V_{elemento} = \dot{g}A\Delta r, \quad (4)$$

Substituindo na Equação (2), obtemos

$$\dot{Q}_r - \dot{Q}_{r+\Delta r} + \dot{g}A\Delta r = \frac{\rho CA\Delta r(T_{t+\Delta t} - T_t)}{\Delta t}, \quad (5)$$

onde $A = 2\pi rL$. Você pode ser tentado a expressar a área no meio do elemento usando o raio médio como $A = 2\pi(r + \Delta r/2)L$. Mas não ganharemos nada com essa complicação, já que na análise seguinte tomaremos o limite como $\Delta r \rightarrow 0$ e então o termo $\Delta r/2$ vai sair.

Agora dividindo a Equação(5) por $A\Delta r$ obtemos:

$$-\frac{1}{A} \frac{\dot{Q}_{r+\Delta r} - \dot{Q}_r}{\Delta r} + \dot{g} = \frac{\rho C(T_{t+\Delta t} - T_t)}{\Delta t}, \quad (6)$$

Tomando o limite quando $\Delta r \rightarrow 0$ e $\Delta t \rightarrow 0$ temos:

$$-\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial r} \left(kA \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{g} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (7)$$

Uma vez que, a partir da definição de derivada e lei de Fourier da condução de calor,

$$\lim_{\Delta r \rightarrow 0} \frac{\dot{Q}_{r+\Delta r} - \dot{Q}_r}{\Delta r} = \frac{\partial \dot{Q}}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(-kA \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (8)$$

Note que a área de transferência de calor neste caso é $A = 2\pi rL$, a equação da condução de calor transiente unidimensional com condutividade variável em um cilindro torna-se:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{g} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (9)$$

Para o caso da condutividade térmica constante, a Equação (9) é reduzida à:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\dot{g}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (10)$$

onde novamente a propriedade $\alpha = k/\rho C$ é a difusividade térmica do material. A Equação (10) é reduzida as seguintes formas nas condições especificadas:

(a) Regime permanente:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} = 0 \right) \quad \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{\dot{g}}{k} = 0, \quad (11)$$

(b) Transiente, sem geração de calor:

$$(\dot{g} = 0) \quad \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (12)$$

(c) Regime permanente, sem geração de calor:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} = 0 \text{ e } \dot{g} = 0 \right) \quad \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(rk \frac{dT}{dr} \right) = 0, \quad (13)$$

Note que substituímos novamente as derivadas parciais por derivadas ordinárias no caso da condução de calor estacionária unidimensional, uma vez que as derivadas parciais e ordinárias de uma função são idênticas quando a função depende somente de uma variável [$T=T(r)$ neste caso].

Para a condição de regime estacionário sem geração de calor, a forma apropriada para a equação de calor, Equação (13), é usada por Incropera et al. (2007), onde k é tratado como uma variável. O significado físico deste resultado torna-se evidente se também considerarmos a apropriada lei de Fourier. A taxa na qual a energia é conduzida através de qualquer superfície cilíndrica em um sólido pode ser expressa como:

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr}, \quad (14)$$

Da Equação (13) temos que a quantidade $kr(dT/dr)$ é independente de r , segue-se da Equação (14) que a taxa de transferência de calor por condução q_r (não é o fluxo de calor q_r'') é uma constante na direção radial.

Podemos determinar a distribuição de temperatura no cilindro pela Equação (13) e aplicando condições de contorno apropriadas. Assumindo que o valor de k é constante, a Equação (13) pode ser integrada duas vezes para obter a solução geral (Incropera et al., 2007).

$$T(r) = C_1 \ln r + C_2, \quad (15)$$

Para obter as constantes de integração C_1 e C_2 , introduzimos as seguintes condições de contorno:

$$T(r_1) = T_{s,1} \text{ e } T(r_2) = T_{s,2},$$

Aplicando as condições na solução geral, obtemos:

$$T_{s,1} = C_1 \ln r_1 + C_2 \text{ e } T_{s,2} = C_1 \ln r_2 + C_2,$$

Resolvendo para C_1 e C_2 e substituindo na solução geral, obtemos:

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln(r_1/r_2)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2}, \quad (16)$$

Note que a distribuição de temperatura associada com a condução radial através de uma parede cilíndrica é logarítmica, não linear, como para parede plana nas mesmas condições.

Se a distribuição de temperatura, Equação (16), é utilizada agora com a Lei de Fourier, Equação (14), obtemos a seguinte expressão para a taxa de transferência de calor:

$$q_r = 2\pi Lk \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln(r_2/r_1)}, \quad (17)$$

Deste resultado é evidente que, para condução radial na parede cilíndrica, a resistência térmica tem a forma:

$$R_{t,cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk}, \quad (18)$$

2.4.2 Transferência de calor convectiva na parede interna do bocal

Transferência de calor por convecção é expressa pela lei da refrigeração de Newton como demonstrado na Equação (19) a seguir:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty), \quad (19)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor convectivo, T_s é a temperatura do escoamento (Cengel 2002).

Para a transferência de calor convectiva no interior do bocal, o coeficiente de transferência de calor convectiva na face interna é calculado com a equação de Bartz (Equação (20)). Bartz avaliou a relação entre a teoria e a prática e desenvolveu fatores de correção semiempíricos (Sutton & Biblarz 2001).

$$h_g = \frac{0.026}{D^{0.2}} \left(\frac{c_p \mu^{0.2}}{Pr^{0.6}} \right) (\rho v)^{0.8} \left(\frac{\rho_{am}}{\rho'} \right) \left(\frac{\mu_{am}}{\mu_0} \right)^{0.2}, \quad (20)$$

O subscrito 0 refere-se as propriedades avaliadas na temperatura de estagnação ou combustão; o subscrito am refere-se as propriedades na média aritmética das temperaturas estática local do escoamento e da parede; ρ' é o valor da densidade local do gás no escoamento. A constante empírica 0.026 é adimensional quando as dimensões compatíveis são utilizadas para os outros termos. A velocidade v do gás é a velocidade local do escoamento correspondente a densidade ρ' . Uma vez que a densidade é elevada a potência 0.8 é aproximadamente proporcional à pressão, e o coeficiente de filme de gás é aproximadamente proporcional ao fluxo, seguindo que a taxa de transferência de calor aumenta linearmente proporcional com a pressão na câmara (Sutton & Biblarz 2001).

2.4.3 Transferência de calor por radiação

De acordo com Ponomarenko (2012), para uma dada temperatura T_∞ e a temperatura da parede T_w , a correlação básica da transferência de calor por radiação é dada por:

$$q_r = \varepsilon_e \sigma (\varepsilon_r^{T_\infty} T_\infty^4 - \varepsilon_r^{T_w} T_w^4), \quad (21)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann, ε_w é o coeficiente de emissividade do material da parede, $\varepsilon_r^{T_w}$ o coeficiente de emissividade dos produtos da reação na temperatura T_w . O coeficiente de emissividade efetiva da parede é:

$$\varepsilon_e = \varepsilon_w / [1 - (1 - \varepsilon_w)(1 - \varepsilon_r^{T_w})], \quad (22)$$

Onde o coeficiente de emissividade dos produtos da reação na temperatura específica T pode ser estimado como:

$$\varepsilon_r^T = \sum_j \sum_i \beta_j [1 - \exp(-\langle K_{i,j} \rangle p_j L)] \frac{R_{\Delta\omega i,j}^0}{\sigma T^4}, \quad (23)$$

onde

j- molécula, i- faixa de radiação

$$\langle K \rangle = \frac{\alpha_{3000}}{\Delta\omega} \frac{3000}{T}, \quad (24)$$

$$R_{\Delta\omega}^0 = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{3.742(\omega/1000)^3 \times 10^{-3}}{\exp\left(\frac{1.44\omega}{T}\right) - 1} d\omega, \quad (25)$$

$$\delta = 1 : \omega_1 = \omega_0 - \Delta\omega/2; \quad \omega_2 = \omega_0 + \Delta\omega/2, \quad (26)$$

$$\delta = 0 : \omega_1 = \omega_0 - (\Delta\omega - \Delta\omega_s); \quad \omega_2 = \omega_0 + \Delta\omega_s, \quad (27)$$

$$\Delta\omega = \Delta\omega_s(1 - \delta) + a(1 + \delta)(T/1000)^{0.5}, \quad (28)$$

$$L = 0.9 \frac{4V}{F} \quad (29)$$

Onde V e F – o volume e a área superficial da câmara de combustão

2.5 REVESTIMENTOS DE BARREIRA TÉRMICA

O desempenho da barreira térmica não depende somente do material de deposição usado, mas também da técnica de deposição. Por isso é necessário estudar as diferentes técnicas de deposição de revestimento, destacando os processos de Pulverização a plasma e Deposição física de vapores por feixe de elétrons (EB-PVD – Electron beam physical vapor deposition). Nesta seção são avaliados os fatores que influenciam a qualidade da barreira térmica e quais falhas podem ocorrer.

Revestimentos de barreira térmica são utilizados por mais de três décadas para aumentar a vida de combustores e componentes de turbinas estacionárias (Beele et al. 1999). Para realizar sistemas de transporte espaciais reutilizáveis, a vida útil do motor do foguete necessita ser incrementada. Por essa razão o conceito de TBC foi transferido para aplicações em foguetes. O bocal do foguete experimenta carga térmica extrema durante o acionamento e o material do bocal pode ser protegido, por um revestimento, das elevadas temperaturas e também da oxidação ambiente (Schloesser et al. 2010).

O TBC é usualmente composto por uma camada externa de revestimento para isolamento do calor e uma camada interna de ligação metálica (difusão), usado para promover uma boa adesão e uma camada de proteção da oxidação para o material do substrato (Amaya et al. 2009). O TBC deve prover boa proteção térmica e resistência à oxidação (Schloesser et al. 2010).

Wright & Evans (1999) descrevem em seu trabalho a existência de quatro elementos no sistema de proteção térmica. Compreendem: (i) o próprio TBC; (ii) a liga metálica (substrato); (iii) camada de ligação contendo alumínio entre o substrato e o TBC; e (iv) um óxido termicamente crescido, tipicamente alumina, que se forma entre a barreira térmica e a camada de ligação. A barreira térmica é isolante, a camada de ligação promove uma barreira de proteção a passagem de oxigênio e o substrato sustenta as cargas estruturais. A camada de óxido termicamente crescido é um produto da reação de deposição. Cada um desses elementos é dinâmico e todos interagem para o controle do desempenho e durabilidade do bocal (ver Figura 2-8).

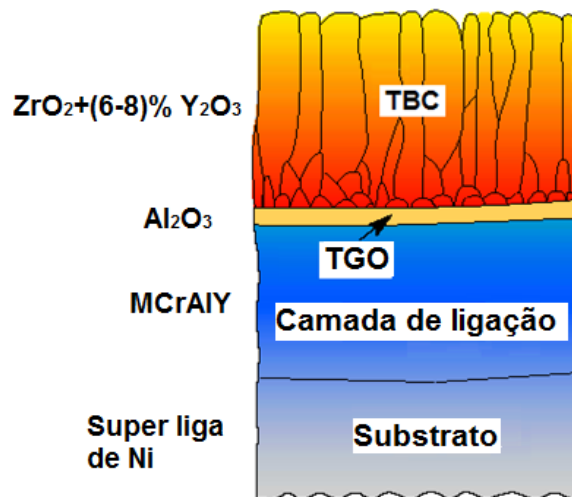


Figura 2-8 – Seção de corte esquemática de um sistema de barreira térmica mostrando o TBC, a camada de ligação, o óxido termicamente crescido e o substrato (modificado- Almeida, 2005).

O TBC pulverizado por plasma a ar (APS – Air plasma sprayed) com óxido de zircônia estabilizado com ítria, é muito utilizado em partes de motores de jatos comerciais. O revestimento cerâmico pelo processo de EB-PVD é mais durável, sendo recentemente desenvolvido para uma maior demanda de rotatividade em componentes de turbina (Beele et al. 1999).

De acordo com Nicholls et al. (2002), a tecnologia EB-PVD resulta em um excelente acabamento superficial e boa resistência a erosão, mas isso acaba prejudicando a condutividade térmica, podendo ser duas vezes maior que o revestimento por pulverização a plasma (PS) (ver Figura 2-9).

Requisitos para sistemas de TBCs para motores foguetes são bem diferentes daqueles em turbinas a gás. Câmaras de combustão de foguetes devem resistir a fluxos de calor que excedem 100MW/m^2 em atmosfera oxidante, a mudanças de temperatura de aproximadamente 300K no lado frio para 3500K no lado do gás quente, enquanto a câmara de combustão é adicionalmente exposta a gases quentes com pressão em torno de 115 bar (Schloesser et al. 2010).

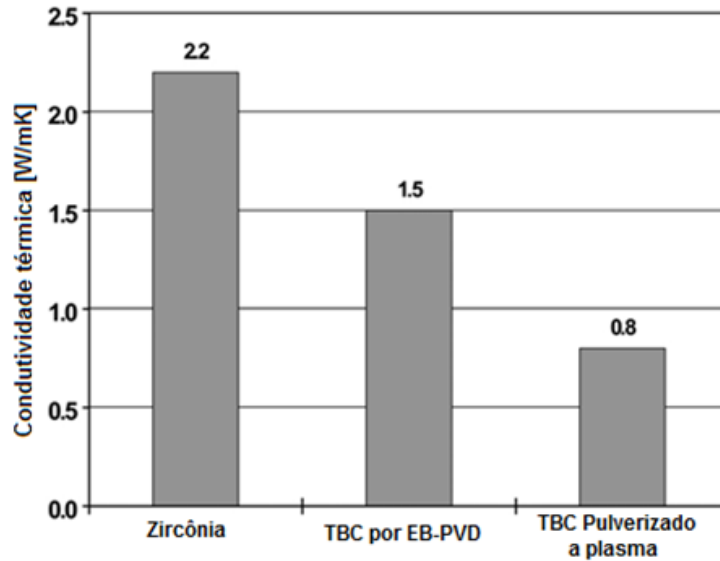


Figura 2-9- Comparação da condutividade térmica da massa de zircônia estabilizada com ítria e do TBC aplicado pelos processos de EB-PVD e Plasma Spray (modificado - Nicholls et al. 2002).

Os materiais usados em TBCs precisam ter as seguintes características: (1) elevado ponto de fusão, (2) sem transformação de fase entre a temperatura ambiente e a de operação, (3) baixa condutividade térmica, (4) quimicamente inerte, (5) expansão térmica próxima a do substrato metálico, (6) boa aderência ao substrato e (7) Baixa taxa de sinterização da microestrutura porosa (Cao et al. 2004).

Existem poucos materiais que satisfazem estas condições. Alguns revestimentos cerâmicos como Al_2O_3 , TiO_2 , mullite, CaO/MgO+ZrO_2 , Zircônia estabilizada com ítria (YSZ – Yttria Stabilized zirconia), CeO_2+YSZ , zircão e $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$, etc., foram classificados como materiais para TBCs (Cao et al. 2004).

Existem poucas, se algumas, limitações para o material do substrato. Tipicamente, TBCs são aplicados em substratos metálicos, entretanto, estruturas compósitas podem também ser revestidas. Onde a aplicação envolve elevadas temperaturas, revestimentos gradativos são aplicados para atenuar a diferença de expansão entre o substrato e a TBC (TST, 2011).

2.5.1 Materiais para TBCs

A seguir serão descritos algumas propriedades de cerâmicos que podem ser usados como TBCs.

2.5.1.1 Zirconia

Zirconia é o típico nome do óxido de zircônio (ZrO_2), é um pó branco e cristalino com dureza Mohs 6.5, e índice de refração 2.2. Quando puro, seu ponto de fusão é entorno de $2760^\circ C$, é uma das cerâmicas mais refratárias. É produzido pela reação da areia de zircão e dolomita à $1371^\circ C$ e lixiviação dos silicatos (Brady et al. 2004).

A zircônia possui outras propriedades físicas intrínsecas e químicas de grande interesse tecnológico incluindo dureza, resistência ao desgaste, baixo coeficiente de atrito, módulo de elasticidade, inércia química, condutividade iônica, propriedades elétricas, propriedades térmicas e elevado ponto de fusão, fazendo-se atrativa como material de engenharia. Houve um grande impulso na aplicação industrial da zircônia quando descobriram que a transformação entre a fase tetragonal para monoclinica pode ser controlada (Almeida, 2005).

Para aplicação em engenharia é necessário que a zircônia esteja estabilizada ou parcialmente estabilizada. O termo *estabilizada* originalmente referia-se à estabilização parcial da fase cúbica. Sendo assim, a zircônia parcialmente estabilizada contém outras fases. Adições de dopantes são feitas para estabilizar a fase cúbica mantendo precipitados dispersos na forma de partículas de fase tetragonal (Almeida, 2005).

A zircônia existe em três formas cristalinas, cúbica, tetragonal e monoclinica e é capaz de aproveitar a transição para produzir um material com sensibilidade ao entalhe reduzida, aumentando a resistência à fratura ($\sim 20 \text{ MN m}^{-3/2}$). O aumento da dureza depende da retenção da fase tetragonal (*t*) à temperatura ambiente em condição metaestável. Isto é conseguido pela adição de dopantes Y_2O_3 , MgO ou CaO (Beele et al. 1999). Na presença de propagação de trincas no interior ou próximo da região metaestável, o campo de tensão na ponta da trinca faz a transformação dos cristais (*t*) para a fase monoclinica (*m*), mais estável e menos densa. A transformação é martensítica em caráter, com uma expansão volumétrica de 3-5%, o que ajuda no fechamento da trinca e alivia as tensões na ponta (Smallman & Ngan, 2007).

A fase *t*- ZrO_2 pode ser usualmente estabilizada por dopantes que: induzem a criação de vagas de oxigênio e são usualmente trivalentes, exemplos Gd^{3+} , Y^{3+} e Fe^{3+} ; são mais altos ou mais baixos em relação aos cátions de zircônio, tais como Ti^{4+} , Ge^{4+} e Ce^{4+} ; ou resulta em combinações que equilibra a carga eletrônica, como $YNbO_4$ $YTaO_4$. Entretanto, os dopantes mais comuns são Y_2O_3 , CeO_2 , e alguns óxidos de terras raras (Almeida, 2005).

O efeito da co-dopagem da *t*-YSZ policristalina com Nb₂O₅ foi analisada por Vidyavathy e Kamaraj (2009). Policristais de zircônia tetragonal dopado com Y₂O₃ e Nb₂O₅ foram sinterizados a 1550°C pela sinterização convencional e por micro-ondas. A presença de Nb₂O₅ é benéfica na transformação tetragonal para monoclínica.

O efeito da dopagem com óxidos pentavalentes tais como nióbio, indica que os íons residem como defeitos substitucionais na rede de zircônio, aniquilando vagas de oxigênio geradas pela dopagem por ítria. A adição de oxigênios pentavalentes, tais como Nb₂O₅, aumenta a transformabilidade e assim a instabilidade da zircônia tetragonal, como evidenciado pelo aumento na temperatura de transformação de fase de *t* para *m* e *m* para *t*. A instabilidade provavelmente surgiu do aumento da pressão interna na estrutura tetragonal, que foi causada pela aniquilação de vacâncias de oxigênio na zircônia tetragonal, que resulta em uma tensa rede de cátions e superlotação de oxigênio na zircônia tetragonal. As vacâncias de oxigênio na zircônia tetragonal são formadas para manter neutralidade elétrica; íons substitutos Y³⁺ para íons Zr⁴⁺ após a reação. Dopagem de Nb₂O₅ em zircônia estabilizada por ítria está sujeito a diminuir o número de vagas de oxigênio por causa da substituição de Nb⁵⁺ por íons Zr⁴⁺ (Vidyavathy & Kamaraj, 2009).

Típico estado-da-arte de TBCs utiliza ZrO₂ parcialmente estabilizada com 6-8% em peso de Y₂O₃. Tipicamente, Cr e Al são adicionados na camada de ligação, e traços de Y são adicionados para formar camadas densas, bem aderidas e protetoras da oxidação na região intermediária do TBC. A suave transição do coeficiente de expansão térmica da camada de ligação entre o material base e a barreira térmica (Y₂O₃-ZrO₂) é feita para reduzir a tensão térmica interfacial produzida durante o revestimento e os ciclos térmicos durante o serviço (Beele et al. 1999). O diagrama de fase para a solução sólida rica em zircônia é apresentada na Figura 2-10 para o sistema ZrO₂ – Y₂O₃.

Três cerâmicas baseadas em zircônia (CSZ, TZP e PSZ) são superpostas no diagrama. A cerâmica CSZ é cúbica totalmente estável e não sofre transformações na tenacidade, mas tem outras utilizações como refratário de alta temperatura. A cerâmica TZP contém 2-4% de Y₂O₃ e é produzida em forma de finos grãos por sinterização no campo de fase tetragonal, a qual é mantida à temperatura ambiente. A cerâmica PSZ é parcialmente estabilizada, tendo 8-10% de Y₂O₃. Sinterização no intervalo de temperatura de 1650-1850°C produz uma solução sólida cúbica, que é então modificada por aquecimento a 1100-1450°C para precipitar cristais-*t* dentro dos grãos cúbicos. A morfologia dos cristais precipitados pode ser alterada de placas para cuboides ou lenticulares pela adição de CaO ou MgO. Na temperatura em torno de 900-1000°C, perto

da temperatura de transição $t-m$, o mecanismo de aumento da tenacidade torna-se menos eficaz. Ciclagem térmica implica no mesmo efeito da redução gradual da tenacidade à fratura. Felizmente, outras formas de estabilização, por exemplo, HfO_2 , foram desenvolvidos tendo melhores propriedades de resistência à fratura em elevadas temperaturas (Smallman & Ngan, 2007).

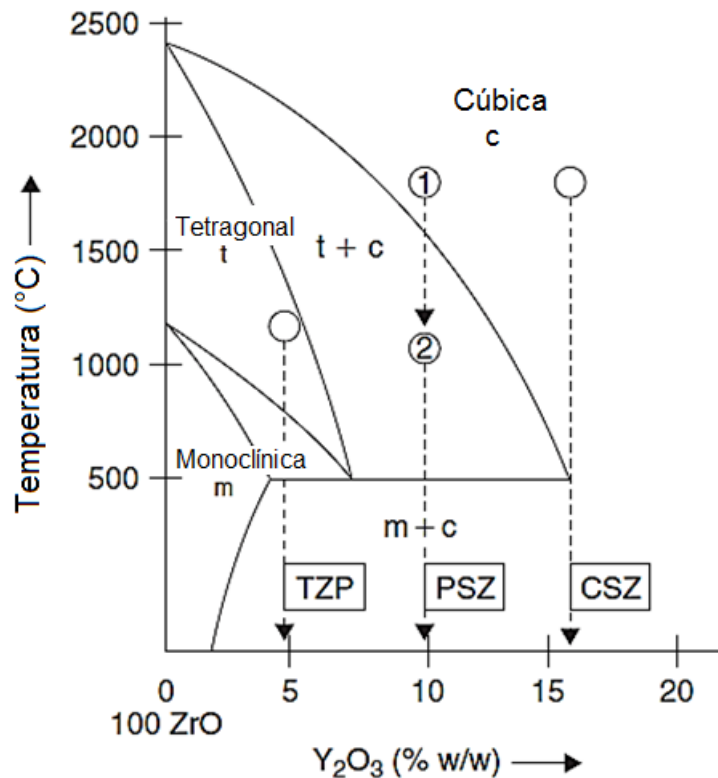


Figura 2-10- Diagrama de fase do sistema $\text{ZrO}_2 - \text{Y}_2\text{O}_3$: todas as fases descritas são soluções sólidas. TZP = zircônia tetragonal policristalina, PSZ= zircônia parcialmente estabilizada, CSZ = zircônia cúbica estabilizada (Smallman & Ngan, 2007).

Uso de revestimentos de ZrO_2 estabilizado por CaO e MgO em turbinas a gás são reportadas por Cao et al. (2004). Estes revestimentos possuem uma elevada concentração de vacâncias de íons de oxigênio, que em elevadas temperaturas auxilia no transporte de oxigênio e a oxidação da camada de ligação na interface cerâmica/camada de ligação, levando a formação de óxido termicamente crescido na superfície da camada de ligação. Isto leva a fragmentação do material cerâmico de modo que a falha da barreira térmica é predominante quando o revestimento é fino como em turbina a gás. Este problema foi

resolvido em grande parte pelo fornecimento de revestimentos de ligação resistentes a oxidação, tais como alumina e mullite.

Uma TBC alternativa de composição ZrO_2 -25 peso% CeO_2 – 2.5 peso% Y_2O_3 (CeSZ) é descrita no trabalho de Schulz et al. (1996). Os benefícios de TBCs estabilizados com Ce incluem boa resistência a corrosão, embora a resistência contra o ataque de vanádio é julgado controverso até o momento. Estes revestimentos apresentam excelente estabilidade de fase a elevadas temperaturas. A condutividade térmica é extremamente baixa e alguns benefícios para a vida útil e resistência a ciclos térmicos são relatados. A barreira térmica de CeSZ produzido por jateamento a plasma apresentou uma resistência a erosão inferior a barreira térmica de YSZ.

De acordo com Callister (2007), a adição entre 3 a 7% em peso de CaO supera o problema de estabilidade da zircônia. Durante este intervalo de composição e na temperatura em torno de 1000°C , ambas as fases cúbica e tetragonal estarão presentes. Após o resfriamento até a temperatura ambiente, sob condições normais de refrigeração, as fases monoclinica e CaZr_4O_9 não são formadas (como previsto no diagrama de fase), conseqüentemente, as fases cubica e tetragonal são retidas e a formação de trincas é contornada. Uma parte do diagrama de fases é apresentada na Figura 2-11, o eixo horizontal chega somente em torno de 31% em peso de CaO, onde está presente o componente CaZrO_3 . É interessante notar que uma reação eutética (2250°C e 23% em peso de CaO) e duas reações eutetóides (1000°C e 2.5% em peso de CaO, 850°C e 7.5% em peso de CaO) são encontradas nesse sistema.

Leckie et al. (2005) relata que zircônia co-dopada com $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ e Gd são exemplos notáveis de matérias a serem considerados para a próxima geração de TBCs, em que compatibilidades termomecânicas e termoquímicas são críticas para a durabilidade do sistema. A compatibilidade termoquímica da composição $\text{GdO}_{1.5}\text{-ZrO}_2$ tem sido investigada usando pós compactos e pares de difusão.

Silicatos tem condutividade de oxigênio inferior ao YSZ, e uma fina camada de silicatos sobre a parte superior da camada de ligação como barreira para o oxigênio pode melhorar a resistência à oxidação do revestimento de ligação (Cao et al. 2004).

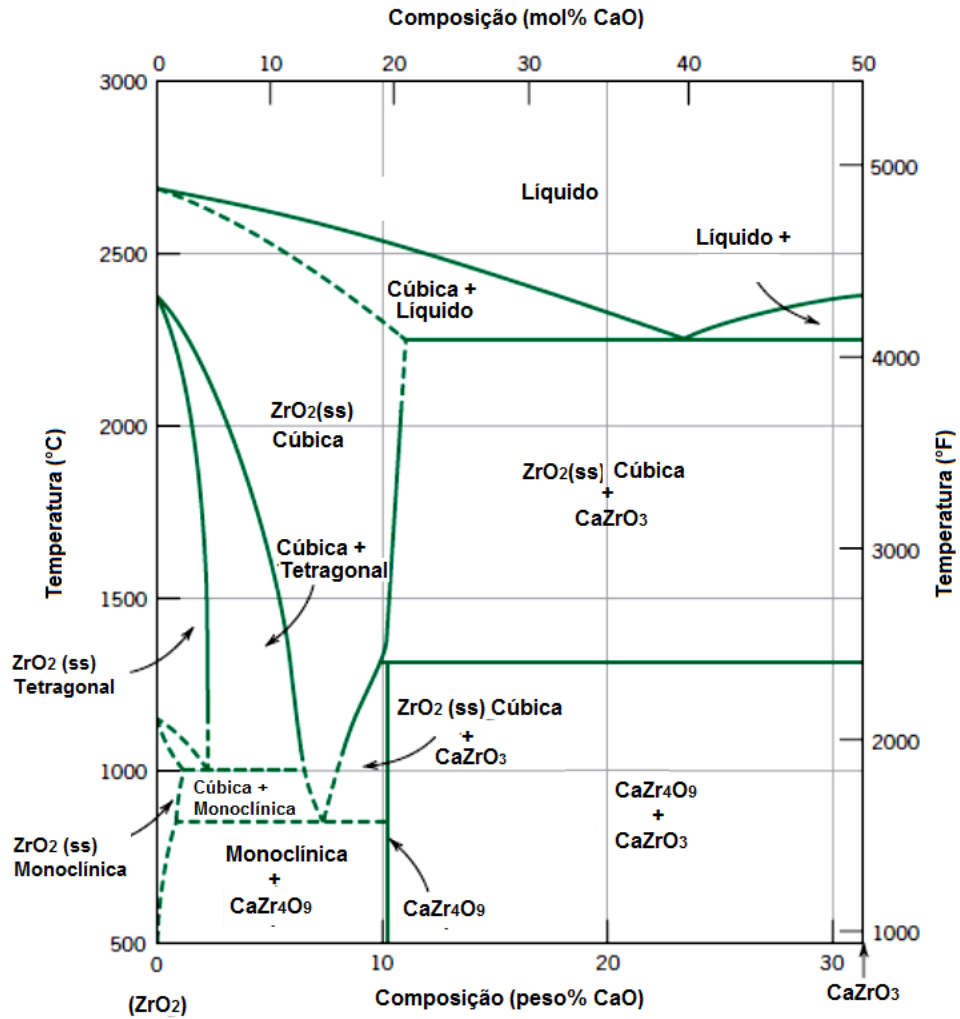


Figura 2-11 – Parte do diagrama de fase da zircônia/cálcia; ss representa solução sólida (modificado - Callister 2007)

2.5.1.2 Alumina

Alumina (Al_2O_3) existe em duas formas cristalina, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ e $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, mas α -alumina, ou coríndon, é a estrutura de importância para engenharia. A resistência mecânica, dureza e resistência ao desgaste, juntamente com a baixa densidade da alumina, são características importantes da liga e a colocam como opção para uma variedade de aplicações (Smallman & Ngan, 2007).

De acordo com Cao et al. (2004), $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ é a única fase estável entre todos os óxidos de alumínio. Ela tem uma dureza muito elevada e inércia química. A adição de certa quantidade de alumina em revestimentos YSZ pode aumentar a dureza e resistência da ligação sem modificações substanciais no módulo de Young e tenacidade.

A dopagem de óxidos de metais de transição tais como Cr_2O_3 , Fe_2O_3 e TiO_2 na alumina, pode estabilizar parcialmente apenas a fase α . Por outro lado, alumina tem condutividade térmica relativamente elevada e coeficiente de expansão baixo comparado com YSZ. As propriedades mecânicas do revestimento de alumina podem melhorar significativamente pela incorporação de fibras de carboneto de silício.

A solução sólida de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ é substitucional, onde íons de Al^{3+} substituem os íons Cr^{3+} e vice e versa. Ela existe para todas as composições abaixo do ponto de fusão da Al_2O_3 à medida que, os íons de Al^{3+} e os íons de Cr^{3+} têm a mesma carga, bem como, raios similares (0.053 e 0.062nm, respectivamente). Além disso, ambos Al_2O_3 e Cr_2O_3 tem a mesma estrutura cristalina. Figura 2-12 apresenta o diagrama de fase do Cr_2O_3 em Al_2O_3 (Callister, 2007).

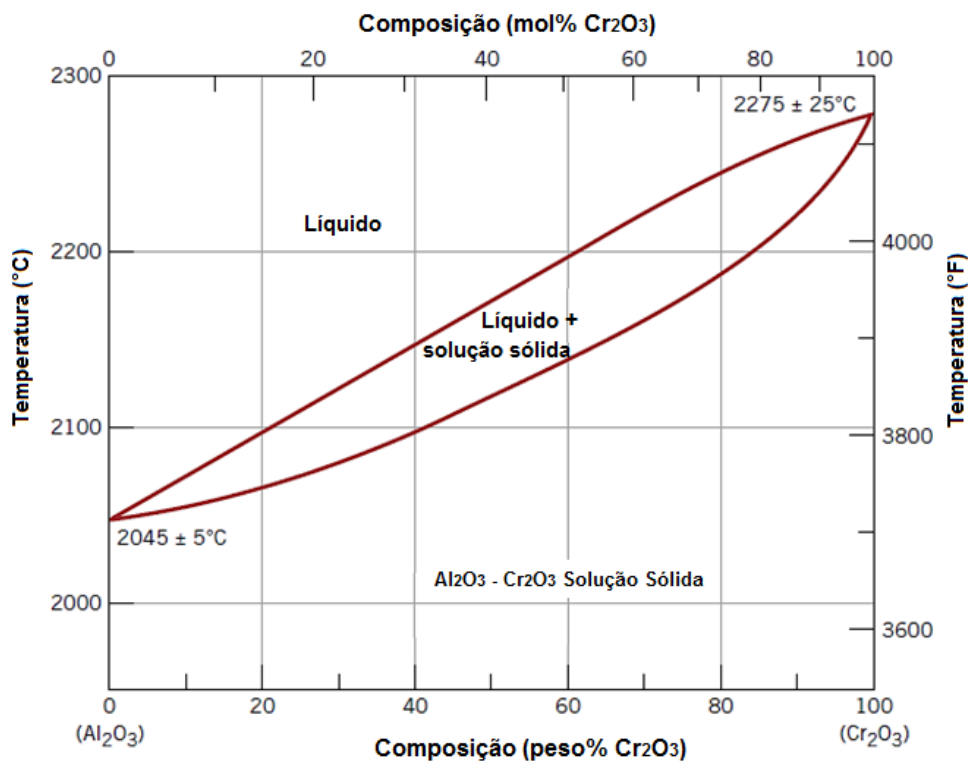


Figura 2-12 – Diagrama de fase do óxido de alumínio/óxido de cromo (modificado – Callister, 2007).

Apesar da alumina por si só não ser um bom candidato para TBC, sua adição na YSZ pode aumentar a dureza do revestimento e melhorar a resistência à oxidação do substrato. O revestimento gradiente de 8YSZ- Al_2O_3 (o número na frente do YSZ representa 8% deste material) tem uma vida muito mais longa em ciclos térmicos do que o revestimento de 8YSZ (Cao et al. 2004).

2.5.1.3 Mullite

Mullite alcançou extraordinária importância tanto como material de cerâmica avançada como tradicional, por causa de suas favoráveis propriedades térmicas e mecânicas (Schneider et al. 2007). Em seu trabalho, Cao et al. (2004) relata que a mullite é um importante material cerâmico por causa da sua baixa densidade, elevada estabilidade térmica, estabilidade em ambientes químicos severos, baixa condutividade térmica e favorável resistência e comportamento de fluência. É um composto de SiO_2 e Al_2O_3 com composição $3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$.

Sílica e alumina não são mutualmente solúveis um no outro, o que é evidenciado pela ausência de soluções sólidas terminais em ambas as extremidades do diagrama de fase na Figura 2-13. Pode-se observar também que a composição intermediária de mullite, $3\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{SiO}_2$, existe, sendo representada como um campo de fase estreito no diagrama. Além disso, a mullite funde incongruente a 1890°C . Existe um único eutético a 1587°C e 7,7% em peso de Al_2O_3 (Callister, 2007).

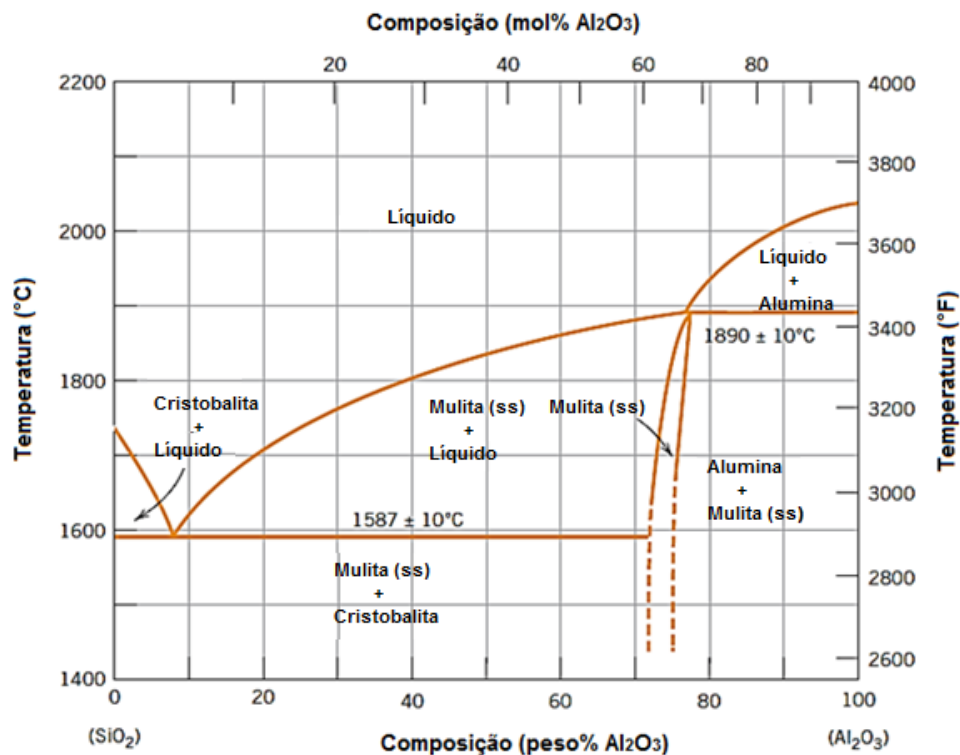


Figura 2-13 – Diagrama de fase silca/alumina (modificado - Callister 2007)

Comparado com YSZ, mullite tem um baixo coeficiente de expansão térmica, elevada condutividade térmica, e é mais resistente ao oxigênio do que YSZ.

2.5.1.4 Óxido de lantânio-titânio-alumínio ($\text{LaTi}_2\text{Al}_9\text{O}_{19}$, LTA)

Este é um novo material para TBC, óxido de lantânio-titânio-alumínio (LTA) funciona em aplicações a 1300°C . Materiais LTA são sintetizados pela reação do estado sólido do La_2O_3 , TiO_2 e Al_2O_3 . Os três pós são diretamente moídos, após secagem, calcinado a 1500°C . Este processo é repetido três vezes para obter um produto puro.

Para determinar a eficiência do material, necessitamos analisar as propriedades termo físicas e mecânicas como a difusividade térmica e condutividade térmica. De acordo com Xie et al. (2011), após a sinterização à 1600°C por 72 horas, a densidade do volume de LTA prensada a frio foi determinada, tendo o valor de 4.1 g/cm^3 e a densidade relativa alcançando 95%. A difusividade térmica do volume de LTA diminuiu de $1.2 \text{ mm}^2/\text{s}$ para $0.5 \text{ mm}^2/\text{s}$ quando aquecido de 25°C até 1400°C , como mostra a Figura 2-14.

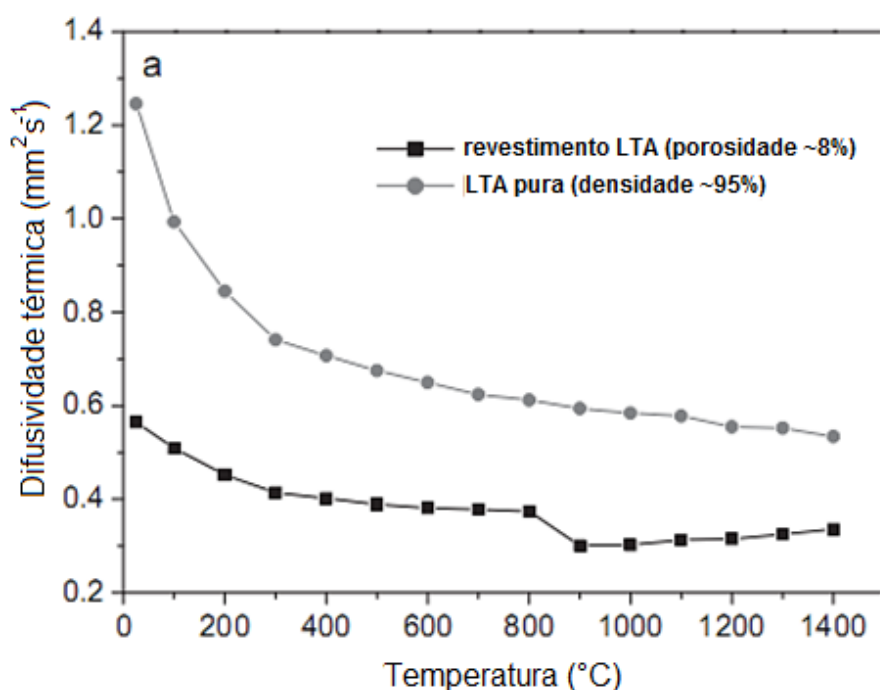


Figura 2-14 – Difusividade térmica do volume de LTA (preparado por prensagem a frio e sinterização à 1600°C por 72 horas) e revestimento pulverizado (como revestimento) (modificado – Xie et al. 2011)

Para a amostra de revestimento com cerca de 8% de porosidade, o valor mais baixo de $0.3 \text{ mm}^2/\text{s}$ foi alcançado à 900°C , acima do qual a difusividade térmica revelou um pequeno aumento. O aumento da difusividade pode ser atribuído à recristalização da fase amorfa em temperaturas elevadas. A capacidade de calor específica da amostra LTA foi medida por um calorímetro diferencial de varredura, da temperatura ambiente até 1400°C e os valores coincidiram com os calculados pela regra de Neumann-Kopp, como mostra a Figura 2-15.

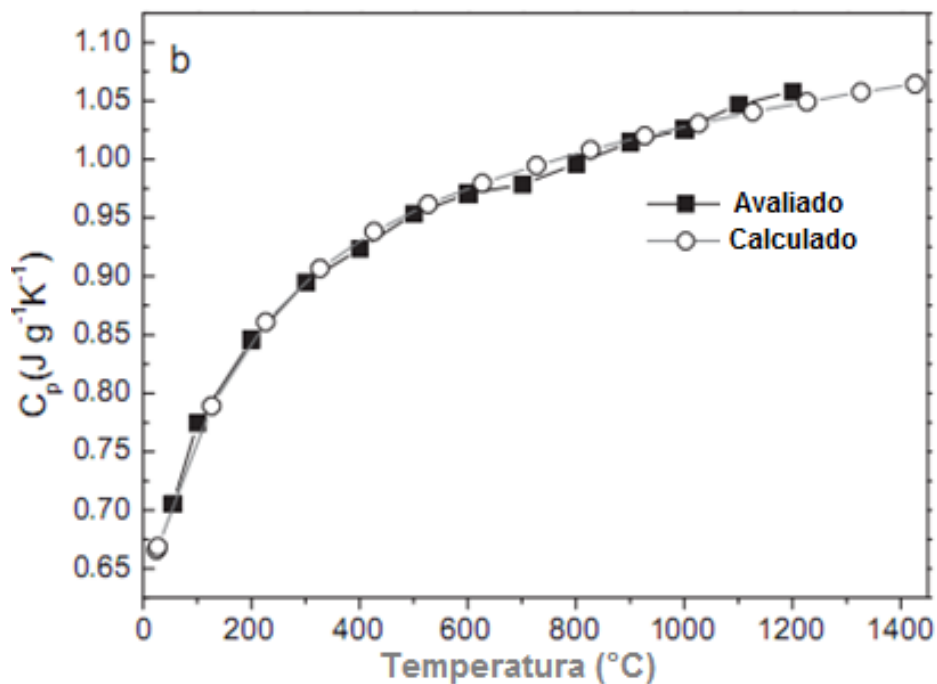


Figura 2-15 –Capacidade de calor específica da LTA (modificado- Xie et al. 2011)

A condutividade térmica foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\lambda = \kappa \rho C_p, \quad (30)$$

onde λ é a condutividade térmica, κ a difusividade térmica, ρ a densidade de massa e C_p o calor específico. Entre 300°C e 1500°C , as condutividades térmicas para o revestimento de LTA estão em um intervalo de $1.0\text{-}1.3 \text{ W/m.K}$, sendo comparáveis com 8YSZ. A baixa condutividade térmica da LTA é relevante para a estrutura cristalina complexa, tendo uma simetria baixa e incorpora várias cristalografias diferentes de átomos dentro da célula unitária. A enorme célula unitária e complexos arranjos de átomos resultam no aumento da

dispersão central e diminuição do percurso livre médio dos fônons, com a consequente redução da difusividade térmica. Devido a esse, o revestimento LTA apresenta um promissor desempenho na isolação térmica para aplicações como barreira térmica.

Além das propriedades térmicas, propriedades mecânicas das cerâmicas são também muito importantes para camada superior da barreira térmica. Os valores de dureza, assim como o módulo de Young e os valores de tenacidade à fratura para LTA e YSZ são dados na Tabela 2-1 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 2-1 – Propriedades Mecânicas das amostras de LTA determinada pela técnica de endentação (modificado – Xie et al. 2011)

Amostra	Dureza [GPa]	Módulo de Young [GPa]	Resistência a Fratura [MPa m ^{0.5}]
YSZ (totalmente densa)	13±1	210±10	6-9
YSZ-revestimento (porosidade: ~12%)	7.1±0.2	93.1±10.8	1.6-3.6
LTA (densidade: ~95%)	14.6±1.2	240±13	1.9-2.5
LTA- revestimento (porosidade: ~8%)	7.1±1.1	99.6±13.4	0.9-1.7

2.5.1.5 Outros materiais

Cao et al. (2004) introduz outros tipos de materiais com boas propriedades para TBC.

A mistura de óxidos de terras raras é facilmente disponível e muito barato. O revestimento dos óxidos terras raras (La₂O₃, CeO₂, Pr₂O₃ e Nb₂O₅ com fases principais) tem menor difusividade térmica e maior coeficiente de expansão térmica do que ZrO₂, tendo potencial como TBC (Cao et al., 2004).

Cerâmicas Garnet com composição de Y₃Al_xFe_{5-x}O₁₂ (x=0, 0.7, 1.4 e 5) foram propostas como materiais para TBC. YAG (Y₃Al₅O₁₂), em particular, tem propriedades mecânicas superiores a temperatura elevada, excelente estabilidade térmica de fase até o ponto de fusão (2243K) e baixa condutividade térmica. O coeficiente de expansão térmica é relativamente baixo (9.1 x 10⁻⁶ /K) e baixo ponto de fusão desse material parece ser o principal problema (Cao et al., 2004).

É relatado que (Ca_{1-x}Mgx)Zr₄(PO₄)₆ tem menor condutividade térmica do que a zircônia e o coeficiente de expansão térmica é próximo de zero. Por outro lado, este

material é menos denso que a zircônia, com densidade teórica de 3.2 g/cm³ contra 5.8 g/cm³ (Cao et al., 2004).

As vantagens e desvantagens do Mullite, Alumina, YSZ+CeO₂, La₂Zr₂O₇ e Silicatos são comparados com YSZ e listados na Tabela 2-2.

Tabela 2-2 – Materiais para TBC e suas características (modificado – Cao et al. 2004)

Materials	Vantagens	Desvantagens
(7-8)YSZ	Elevado coeficiente de expansão térmica; Baixa condutividade térmica; Elevada resistência a choques térmicos.	Sinterização acima de 1746 °C; Transformação de fase (1716 °C); Corrosão; Suscetível a passagem de oxigênio.
Mullite	Elevada resistência a corrosão; Baixa condutividade térmica; Boa resistência a choque térmico abaixo de 1546°C; Não suscetível a passagem de oxigênio.	Cristalização (1296 - 1546 °C); Coeficiente de expansão térmica muito baixa.
Alumina	Alta resistência a corrosão; Alta dureza; Não suscetível a passagem de oxigênio.	Transformação de fase (1546°C); Alta condutividade térmica; Coeficiente de expansão térmica muito baixa.
YSZ + CeO ₂	Elevado coeficiente de expansão térmica; Baixa condutividade térmica; Elevada resistência a corrosão; Transformação de fase inferior entre m e t do que YSZ; Elevada resistência a choque térmico.	Aumento na taxa de sinterização; Precipitação de CeO ₂ (> 1646°C); Perda de CeO ₂ durante a pulverização.
La ₂ Zr ₂ O ₇	Estabilidade térmica muito elevada; Baixa condutividade térmica; Baixa sinterização; Não suscetível a passagem de oxigênio.	Coeficiente de expansão térmica relativamente baixa.
Silicatos	Barato, prontamente disponível; Elevada resistência a corrosão.	Decomposição em ZrO ₂ e SiO ₂ durante a pulverização térmica; Coeficiente de expansão térmica realmente baixa.

YSZ tornou-se a barreira térmica preferida por causa da sua baixa condutividade térmica, κ , e seu relativamente elevado (comparado com muitas outras cerâmicas) coeficiente de expansão térmica, Figura 2-16.

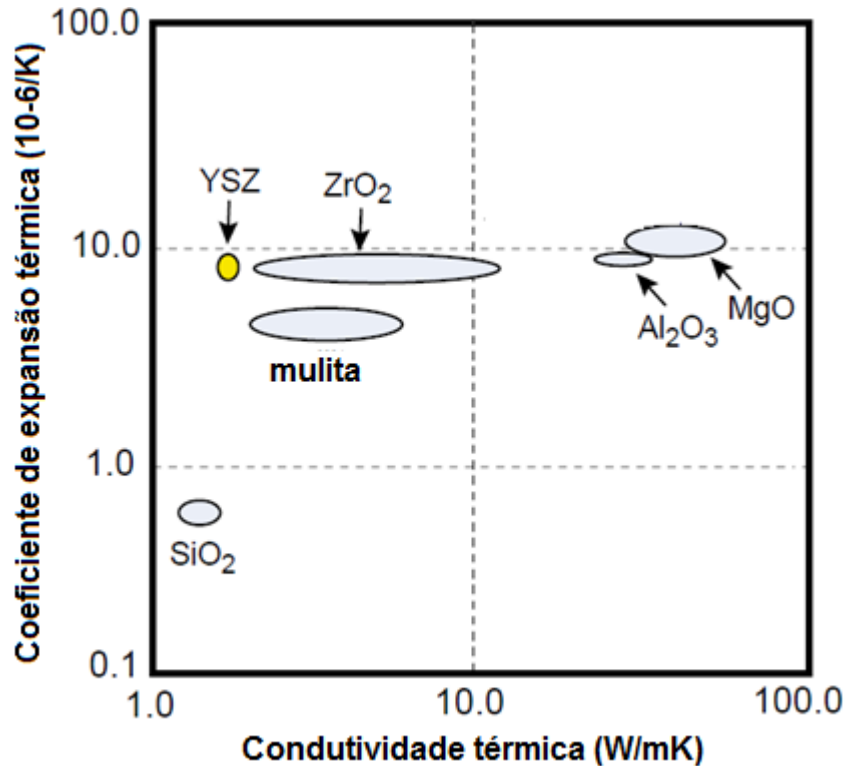


Figura 2-16 – Gráfico da condutividade térmica versus coeficiente de expansão térmica (modificado – Hass, 2000)

2.5.2 Processos para aplicação de TBCs – Pulverização térmica

A pulverização térmica é um grupo de processos em que, um material de alimentação é aquecido e impelido na forma de partículas ou gotículas individuais sobre uma superfície. A pistola de pulverização térmica gera o calor necessário, por meio de gases combustíveis ou de um arco elétrico. À medida que os materiais são aquecidos, eles passam para um estado plástico ou fundido e são confinados e acelerados por um fluxo de gás comprimido em direção ao substrato. As partículas chocam com o substrato, achatam e formam finas plaquetas que conformam e aderem às irregularidades do substrato preparado. À medida que as partículas pulverizadas incidem sobre a superfície, elas resfriam construindo, camada por camada, uma estrutura laminar formando o revestimento de pulverização térmica. A Figura 2-17 mostra uma visão típica da estrutura do

revestimento laminar. O revestimento formado não é homogêneo, contendo certo grau de porosidade, e no caso de metais pulverizados, o revestimento contém óxidos do metal. A ligação entre o substrato e o revestimento pode ser química, mecânica ou metalúrgica, ou uma combinação destas. As propriedades do revestimento aplicado são dependentes do material de alimentação, do processo de pulverização térmica e parâmetros de aplicação, e do pós-tratamento do revestimento aplicado (Bhatia, 1999).

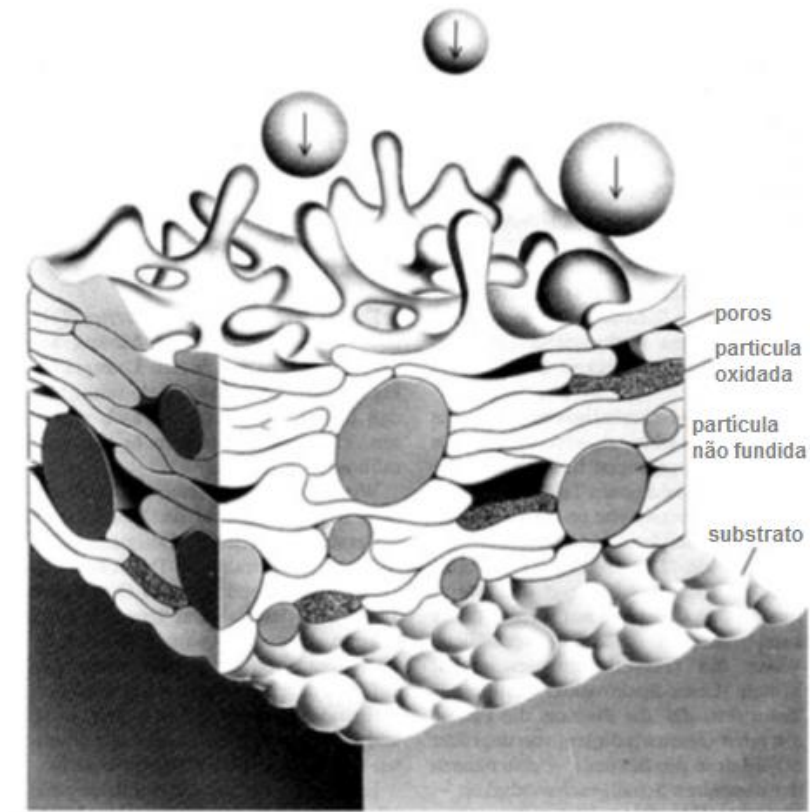


Figura 2-17- Formação de um revestimento por pulverização térmica (modificado- Babiak et al. 2006)

A camada aplicada por pulverização térmica irá funcionar como uma barreira térmica, evitando assim que o substrato atinja temperaturas críticas (perto do ponto de fusão). Durante o revestimento, o substrato é geralmente sujeito a uma moderada tensão térmica, mas a superfície não sofre fusão. Qualquer material pode ser pulverizado, desde que tenha um ponto de fusão bem definido, e não decomponha ou sublime durante a fusão (Heimann, 1996 e Babiak et al., 2006).

Babiak et al. (2006), em seu trabalho, classifica os processos de pulverização térmica considerando o tipo de fonte de calor de acordo com a norma DIN EN 657 (ver

Figura 2-18). Os mais comuns são pulverização a chama, pulverização a chama de alta velocidade, pulverização a arco e pulverização a plasma.

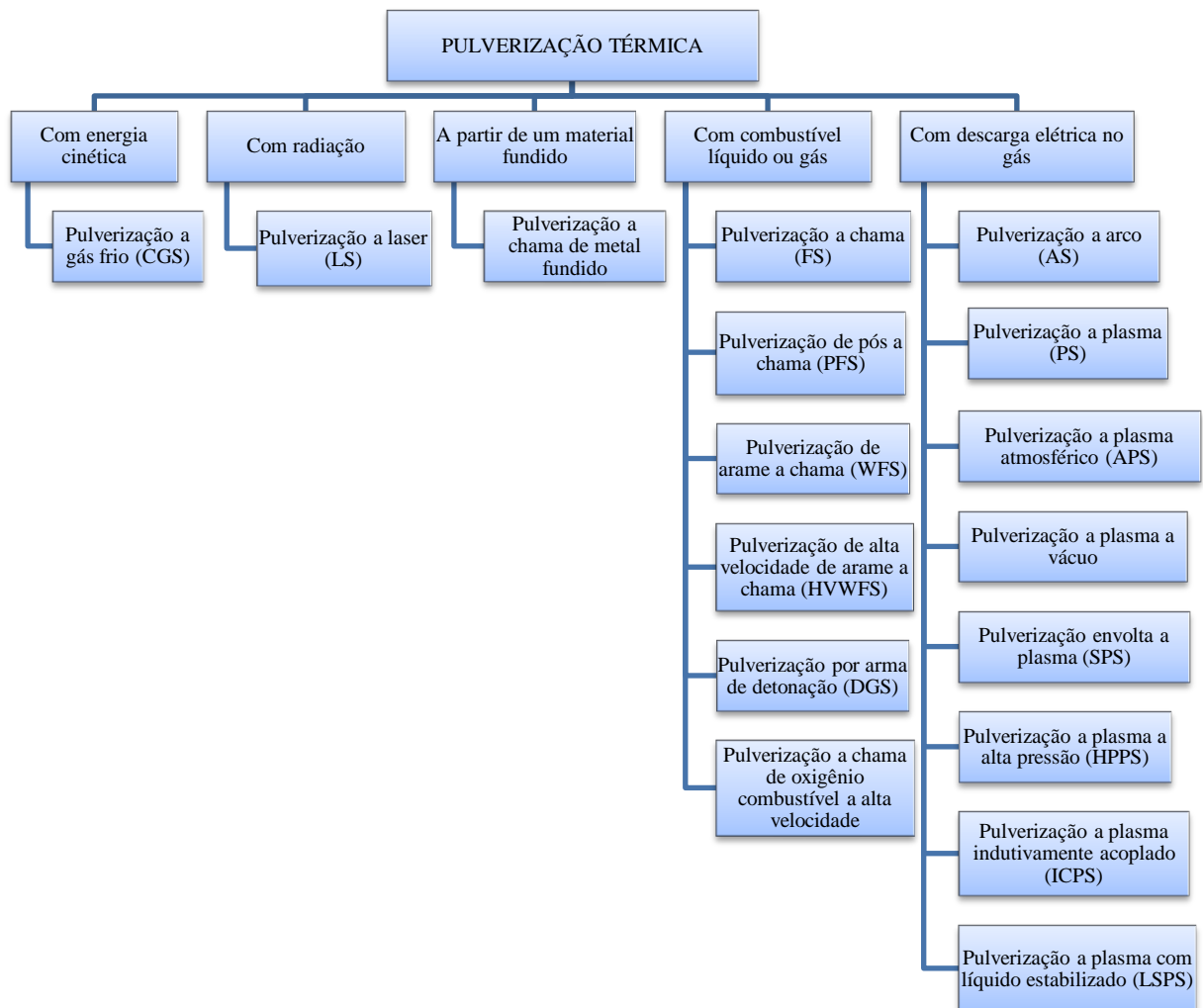


Figura 2-18 – Classificação das técnicas de pulverização térmica de acordo com a fonte de energia (modificado- Babiak et al., 2006)

2.5.2.1 Pulverização a plasma

Arcos de plasmas foram primeiramente utilizados como fonte de calor para produção de revestimentos em 1939. Desde então, técnicas de pulverização a plasma foram desenvolvidas continuamente, evoluindo para a técnica de pulverizar com o largo campo de aplicações hoje em dia. Uma razão para este desenvolvimento é a ampla seleção de

materiais para revestimento, por exemplo, metais, ligas, óxidos, carbonetos, bem como misturas desses (Zimmermann & Höhle, 2006).

Pulverização a plasma é utilizado para revestir superfícies com materiais que fundem a elevadas temperaturas. Um arco é formado entre um eletrodo e o bocal de pulverização, que atua como um segundo eletrodo. Um gás inerte pressurizado passa entre os eletrodos aonde é aquecido a uma elevada temperatura, formando um plasma de gás. Pó do material de deposição é então introduzido no gás aquecido, onde é fundido, e propelido até o substrato em alta velocidade. O sistema de pulverização a plasma consiste em um alimentador de pó, fonte de gás, pistola, e mecanismo de alimentação de pó. O processo pode ser utilizado para aplicar revestimentos de barreira térmica, tais como zircônia e alumina, e revestimentos resistentes ao desgaste tais como óxido de cromo (Bhatia, 1999).

A Figura 2-19 ilustra o princípio básico da pulverização a plasma. Um impulso de alta voltagem acende um arco que queima entre um cátodo em forma de dedo e um ânodo de cobre em forma de bocal. Ambos os eletrodos são refrigerados a água. O gás de trabalho, que pode ser uma mistura do gás primário ou secundário, alimenta o bocal por meio de um anel de distribuição de gás, fluindo entre os eletrodos. Aqui, devido ao arco, forma-se um plasma, isto é, elétrons emitidos pelo cátodo e acelerados pela diferença de potencial, colidem com os átomos do gás de trabalho ficando parcialmente ionizados. Moléculas de gases dissociam em átomos individuais antes da ionização. Portanto, o plasma é um gás quente com uma considerável porção de átomos ionizados e moléculas (Zimmermann & Höhle 2006).

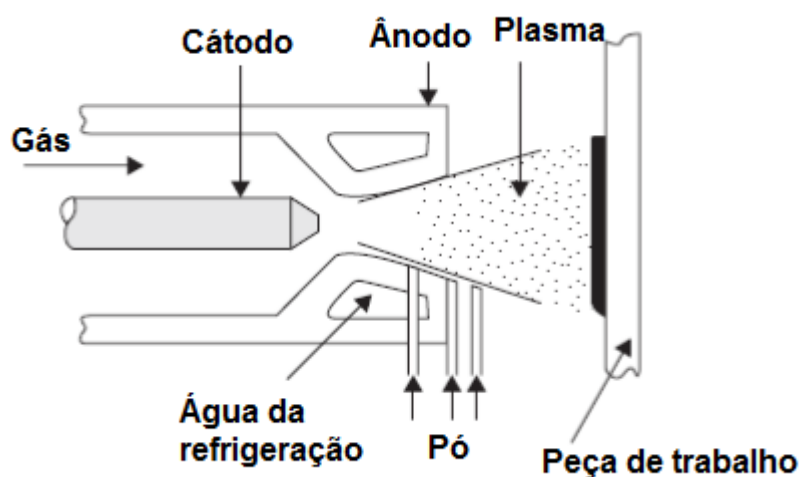


Figura 2-19 – Princípio de pulverização a plasma (Smallman & Ngan, 2007)

2.5.3 Características do revestimento por pulverização térmica

Revestimentos por pulverização térmica possuem elevada dureza e resistência à erosão, tornando-os especialmente valiosos em aplicações de alto desgaste. A dureza e a densidade dos revestimentos por pulverização térmica são tipicamente menores do que a do material de alimentação do qual o revestimento é formado. No caso de revestimentos metálicos, a dureza e a densidade do revestimento dependem do material, do tipo de equipamento e dos parâmetros da pulverização. Em geral, quanto maior a velocidade das partículas, maior a dureza e densidade do revestimento. A porosidade do revestimento também depende do processo, parâmetros de aplicação, bem como, do material de pulverização (Bhatia, 1999).

Revestimentos metálicos por pulverização térmica podem ser anódico ou catódico em relação ao substrato. Uma vez que, a corrosão ocorre no ânodo, revestimentos anódicos corroem em ambiente corrosivo e o cátodo não irá. Sistemas de revestimento anticorrosivo são geralmente projetados de maneira que o material do revestimento seja anódico em relação ao substrato metálico. Os revestimentos anódicos irão corroer ou sacrificar para proteger o substrato. Em alguns casos, a própria resistência à corrosão do material pulverizado é importante. Para aplicações em elevadas temperaturas e a exposição a produtos químicos, o revestimento proporciona uma barreira resistente à corrosão (Bhatia, 1999).

Em seu trabalho Hass, (2000) relata que as diferentes propriedades térmicas e mecânicas dos revestimentos de YSZ sintetizados por duas vias de processamento resultam de diferenças na morfologia da porosidade presente dentro da camada de barreira térmica. Em camadas APS, poros inter-splat resultam da invasão de gotículas fundidas no substrato. Estes poros estão paralelamente alinhados à superfície do substrato e são acompanhados por micro trincas e finas fronteiras de grão. A condutividade térmica de revestimentos de YSZ irá diminuir com o aumento da fração volumétrica dos poros. Neste caso, os poros proporcionam uma alta impedância ao fluxo de calor através da espessura do revestimento, resultando em uma barreira térmica com baixa condutividade térmica.

Revestimentos produzidos por EB-PVD tem uma microestrutura colunar com poros inter colunares alongados que se tornam predominantemente alinhados perpendicularmente ao plano do revestimento à medida que aumenta a sua espessura. Uma fina distribuição dos poros intercolunares também existe. Os poros intercolunares alongados aumentam a adesão

do revestimento no plano do substrato, resultando em uma melhora do tempo de vida da degradação do sistema TBC (veja Figura 2-20).

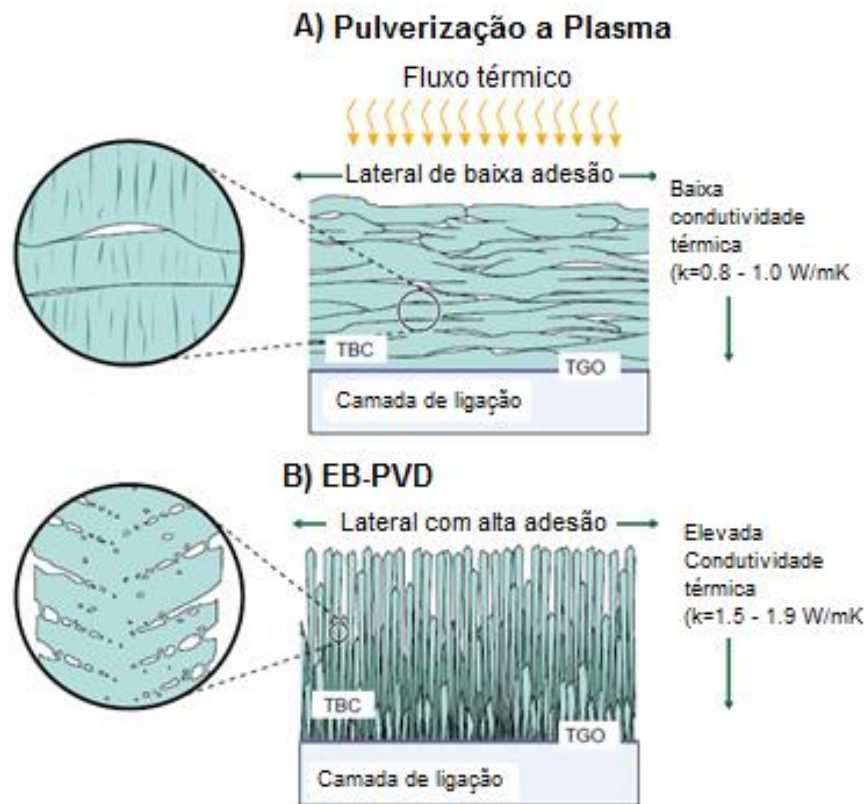


Figura 2-20 – Ilustração esquemática da morfologia dos poros (a) YSZ depositada por pulverização a plasma mostra-se grosseira, poros na forma de discos paralelamente alinhados a superfície do substrato e (b) revestimento de YSZ por EB-PVD com poros alongados perpendicularmente alinhados a superfície do substrato (modificado- Hass, 2000)

Nicholls et al. (2002) relata que a condutividade térmica para revestimentos baseados em zircônia são significativamente menores do que a zircônia pura, tendo estes últimos, valores entre 2.2 e 4.0W/m.K, dependendo do polimorfismo presente na zircônia. Isto pode ser visto na Figura 2-21, que representa graficamente os dados de condutividade térmica para a cerâmica zircônia e de revestimentos em função da quantidade de ítria na cerâmica.

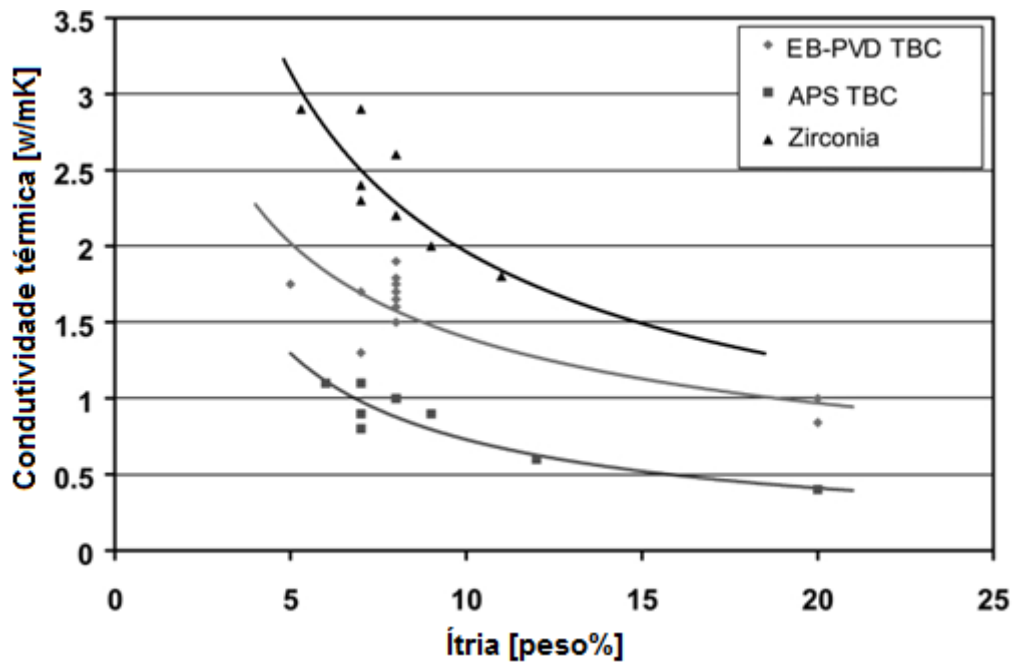


Figura 2-21 – Condutividade térmica da cerâmica de zircônia e TBCs de zircônia em função da quantidade de ítria (modificado- Nicholls et al. 2002).

É evidente que a condutividade térmica de revestimentos baseados em zircônia depende fortemente das características microestruturais do revestimento, introduzidos como resultado do método de deposição escolhido. Cerâmicas pulverizadas a plasma, atualmente oferecem a menor condutividade térmica (0.8 – 1.1 W/m.K) mas as custas do acabamento superficial, a tolerância de tensão e resistência à erosão. Revestimentos cerâmicos por EB-PVD têm valores intermediários de condutividade térmica (aprox.. 1.5 – 1.9 W/m.K), entre a zircônia parcialmente estabilizada com ítria (2.2 – 2.0 W/m.K) e os valores reportados por cerâmicas pulverizadas à plasma; mas oferecem um acabamento superficial de alta qualidade, uma melhor tolerância e melhoras na resistência a erosão sobre aqueles pulverizados a plasma (Nicholls et al., 2002).

A redução da condutividade térmica intrínseca do material pode ser obtido pela redução na capacidade de calor específico, velocidade de fônons, caminho livre médio, densidade ou índice de refração. Portanto, para produzir uma baixa condutividade térmica na cerâmica baseada na zircônia, as únicas opções são reduzir o caminho livre médio dos portadores de calor, para reduzir a velocidade de transporte de calor, ou para diminuir a densidade do material (Nicholls et al., 2002).

2.6 SUBSTRATO METÁLICO PARA TBCs (LIGA DE Cu)

Além da boa condução de calor, o substrato metálico deve satisfazer os requisitos mais exigentes, tais como a resistência a tração em temperaturas elevadas, ductilidade suficiente a temperaturas muito baixas, resistência a fadiga térmica e boa tolerância em relação à atmosfera de hidrogênio (Schloesser et al. 2010).

Existem poucas, se algumas, limitações para o substrato metálico. Tipicamente, TBCs são aplicados em substratos metálicos; entretanto, estruturas compósitas também podem ser revestidas. Quando a aplicação envolve temperaturas elevadas, revestimentos graduados são empregados para minimizar a diferença de expansão entre o substrato e o revestimento (TST, 2011).

Ligas de cobre são estudadas por Schloesser et al. (2010) e Bertoldo Jr., (2011) como substrato metálico na fabricação de bocais convergente-divergente com revestimento cerâmico. As propriedades de maior importância na seleção de ligas de cobre aplicadas em projeto mecânico são a condutividade elétrica, condutividade térmica, resistência à corrosão e boa resistência mecânica para o requisito do regime de trabalho. Depois da prata, cobre é o melhor condutor de calor e eletricidade por ter uma resistividade elétrica de $1.7 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ (à 20°C) e amplamente usado na indústria eletrônica, apresentando uma coloração vermelho-marrom, tendo um ponto de fusão de 1083°C e densidade de 8.96 g/cm^3 (à 20°C) (Chiaverini, 1986).

O cobre pode ser facilmente unido por solda ou brasagem convencional, podendo ser trabalhado tanto a frio como a quente, sem apresentar dificuldades significativas para obter a geometria desejada. Isto se deve a excelente capacidade de deformação fornecida por ligas de cobre (Chiaverini, 1986).

No seu trabalho Bertoldo Jr., (2011) sugere algumas ligas de cobre aplicadas à construção de bocais, tais como UNS C18150, UNSC18200, UNS C18400, UNS C18600. Selecionando a liga UNSC18200 que melhor atende aos requisitos estruturais, fabricação, aplicação de barreira térmica e por apresentar semelhanças com o material utilizado no motor do foguete a propelente líquido MFPL L5.

Schloesser et al. (2010), escolheu CuCr1Zr (que é liga de cobre contendo 1% de cromo e 0,3% de zircônio) em seu trabalho por causa de suas boas propriedades em elevadas temperaturas.

Na liga de CuCr, o teor de Cr varia de 0,6% à 1,2%. O uso desta liga implica na realização de um tratamento de endurecimento por precipitação que se destina a aumentar a sua resistência (Chiaverini, 1986).

O diagrama de equilíbrio do sistema Cu-Cr é do tipo eutética com um plano líquido e miscibilidade completa no estado líquido (ver Figura 2-22). As fases de equilíbrio do sistema são: (1) líquida, (L); (2) solução sólida fcc, (Cu), com máxima solubilidade de aproximadamente 0,89 em %Cr a 1077°C; e a solução sólida bcc, (Cr), com solubilidade insignificante de Cu abaixo da temperatura eutética (1077°C). A solubilidade sólida de Cu em Cr é conhecida por ser extremamente reduzida abaixo da temperatura eutética. Também a solubilidade de Cr em Cu é menor do que 1% (Chakrabarli & Laughlin, 1984).

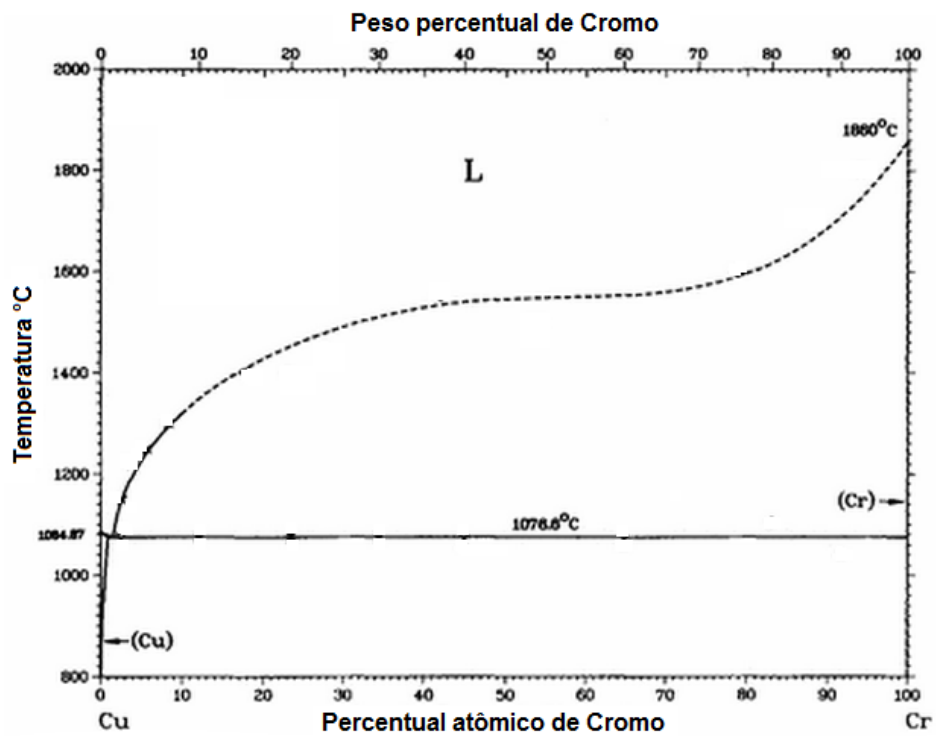


Figura 2-22 – Diagrama de fase do sistema Cu-Cr (modificado - Chakrabarli & Laughlin, 1984).

2.7 CARBONO-CARBONO

Com o desenvolvimento de propelentes sólidos altamente energéticos e condições de disparo mais duras em avançados motores de foguetes sólidos (SRMs), compósitos de grafite e carbono-carbono têm encontrado crescente aplicação em bocais de motores sólidos por causa das suas excelentes propriedades térmicas, físicas e baixa densidade (Bianchi et al., 2011).

Carbono-carbono refere-se a uma composição que compreende um reforço de fibra de carbono em uma matriz de carbono (Pierson, 1993 e Brady et al., 2004). Estes materiais são relativamente novos e caros devido a dificuldade do processo e do tempo de fabricação, sendo usado apenas em aplicações de alto custo (Strong, 2008). As suas propriedades desejáveis incluem módulo de tensão elevado e resistência à tração que são retidos a temperaturas superiores a 2000°C, resistência à deformação, e valores de tenacidade à fratura relativamente grande. Além disso, compósitos de carbono-carbono tem baixos coeficientes de expansão térmica e condutividade térmica relativamente alta; estas características, juntamente com tensões elevadas dá origem a uma suscetibilidade relativamente baixa ao choque térmico. Sua maior desvantagem é a propensão à oxidação a temperaturas elevadas, o que pode levar a degradação da peça (Callister, 2007).

Como os compósitos de carbono-carbono são uma estrutura heterogenia que consiste em fibras, matriz e poros, a estimativa das suas propriedades de transpor térmico torna-se complexa. Entretanto, materiais de carbono-carbono com condutividades térmicas adaptadas podem ser fabricados através da escolha apropriada dos componentes, sua configuração e condições de processo (Manocha, 2003).

2.7.1 Fabricação de compósitos de carbono-carbono

Segundo Strong (2008), a fabricação da matriz de carbono começa com a combinação de reforço e resina em uma pré-forma não curada. A matéria prima mais comum usada para fazer esta pré-forma é a resina fenólica e a fibra de carbono. Este processo, quando no estágio não curado, é muitas vezes chamado de pré-forma verde. Por causa do uso frequente de fibras de carbono, a designação de compósitos de matriz de carbono como compósitos de carbono-carbono é generalizada. No entanto, a definição rigorosa da terminologia permitiria este nome apenas quando o reforço é fibra de carbono.

O material da pré-forma é colocado no molde, para ajustar ao contorno, e em seguida ao forno. Para a maioria dos compósitos, a cura é seguida de uma etapa final de acabamento que finaliza o processo. Porém, compósitos de matriz de carbono exigem passos únicos após o molde. Como será visto, os passos seguintes consomem muito tempo e são dispendiosos, fazendo com que os compósitos de carbono-carbono estejam entre os materiais compósitos mais caros (Strong, 2008).

A próxima etapa do processo é a pirólise. A pirólise consiste em aquecer a peça, na ausência de ar (oxigênio), de modo que a resina não oxide (queime). A temperatura do processo é geralmente em torno de 1000°C. Durante a pirólise, quase toda a resina torna-se carbono puro através da retirada do oxigênio, hidrogênio e outros átomos nela contidos. Esta retirada dos outros elementos que não são carbono deixa para trás uma estrutura porosa que é mantida em conjunto com a força da matriz residual e as fibras de reforço. Caso nenhum passo adicional seja realizado, teremos boas propriedades térmicas, mas propriedades mecânicas inferiores. Cada um dos poros seria um ponto de propagação de trinca, o que reduziria muito as propriedades de tensão, flexão e compressão (Strong, 2008).

Para melhorar as propriedades mecânicas do compósito, os poros são preenchidos através da adição de resina na peça. Este passo, denominado impregnação, pode ser realizado através da infusão do material da matriz porosa de carbono com resina adicional, podendo ser um gás ou um líquido. Quando a resina está no estado gasoso, o processo de impregnação é chamado de deposição química de vapor. Neste processo, a resina de impregnação ou algum outro material rico em carbono, tal como acetileno, é vaporizado e depois com a pressão ou a vácuo entra nos poros da matriz de carbono. Quando a impregnação é realizada no estado líquido, os poros da matriz de carbono são cobertos com a resina líquida, permitindo sua infiltração nos poros do compósito, este processo pode ser acelerado com a pressão. No entanto, mesmo com a pressão ou a vácuo, os dois processos levam tempo considerável, muitas vezes da ordem de dias ou semanas (Strong, 2008).

Quando a impregnação procede de modo que os poros da matriz de carbono sejam preenchidos com a resina nova, o compósito é novamente pirolisado. A segunda pirólise carboniza a nova resina, retirando o oxigênio, hidrogênio e outros átomos e, portanto, cria mais alguns poros nas áreas recém-impregnadas. Também expelle átomos adicionais de outros elementos (não carbono) do restante da matriz de carbono, criando certa porosidade no material (Strong, 2008).

O material compósito é então submetido a outro passo de impregnação, no qual gás ou resina líquida é infundido no interior dos poros do material. Assim, o processo de impregnação e de pirólise é repetido várias vezes (Strong, 2008).

Quando a impregnação está completa, o material é submetido a uma temperatura elevada, isto é chamado de carbonização e ocorre a cerca de 2500 °C. Neste momento o número de átomos de outros elementos é pouco e assim a porosidade é mínima e pode ser ignorada (Strong, 2008).

A matriz de carbono pode ser então revestida. Este passo não é feito para todas as partes. O revestimento aplicado é não inflamável, de modo que a matriz de carbono não queime quando aquecido na presença de oxigênio. O revestimento é quase sempre uma cerâmica, tal como carboneto de silício (Strong, 2008).

Finalmente, a peça é acabada. Este passo irá incluir lixamento, corte, perfuração de orifícios de fixação, ou outros processos semelhantes que permitem que o compósito de carbono encaixe em uma montagem, caso necessário (Strong, 2008).

2.7.1.1 Revestimento do compósito de carbono-carbono

O ambiente hostil gerado pela combustão dos propelentes cria muitos problemas para os materiais que constituem o motor, destacando a erosão do material do bocal. Com a queima dos propelentes, o bocal é exposto aos produtos da combustão que formam uma camada turbulenta na superfície do bocal. Ocorrendo a transferência de energia para a parede do bocal, causando um aumento de temperatura da superfície, e conseqüentemente aumentando a reatividade do material da tuberia, fazendo com que reações químicas heterogêneas ocorram entre o material do bocal e espécies oxidantes tais como, H_2O , OH e CO_2 , normalmente encontrados em quantidades significativas nos produtos da combustão. Essas reações heterogêneas consomem as espécies oxidantes na superfície do bocal produzindo monóxido de carbono (CO), resultando em uma erosão termoquímica da tuberia (Bianchi et al., 2011 e Thakre & Yang, 2008). Por isso, estudos sobre a proteção contra oxidação de compósitos de carbono-carbono são tão importantes quanto o desenvolvimento dos compostos em si. Sistema de proteção contra oxidação de compósitos de carbono-carbono é baseado na (i) modificação da matriz através da adição de algum inibidor da oxidação (como B, Si, Zr ou seus compostos) ou/e (ii) deposição de revestimentos cerâmicos sobre a superfície. Estes revestimentos são geralmente multicamadas de materiais com gradientes funcionais de carbonetos, nitretos e óxidos de Si, Zr, Ta, Al etc (Pierson, 1993).

Um exemplo é o uso do revestimento de carboneto de silício, com 0.127 à 0.178mm de espessura, o qual é usado como revestimento para aplicações no cone do nariz e bordos de ataque das asas do ônibus espacial, em freios de grandes aeronaves comerciais, embreagens e freios de carros de Fórmula 1 e bocais de foguetes (Brady et al., 2004).

2.7.1.2 Propriedades térmicas de compósitos de carbono-carbono

Compósitos de carbono-carbono possuem uma estrutura heterogênea constituída de fibras, matriz e poros, com variação na microestrutura das duas primeiras, tornando complexa a estimativa das suas propriedades de transporte térmico. No entanto, materiais de carbono-carbono com condutividade térmica adaptada podem ser fabricados pela escolha apropriada dos componentes, sua configuração e condições de processamento. Compósitos com fibras ou matriz de grafite ou suas combinações altamente orientadas podem apresentar uma condutividade térmica elevada na direção da fibra, da ordem de 250 - 350 W/mK. Embora esses compósitos apresentem caráter altamente anisotrópico e baixa condutividade em direções transversais a fibra, há sempre modos de melhoria através da variação da arquitetura das fibras e sua adição em diferentes formas e maneiras (Manocha, 2003).

2.8 GRAFITE

O grafite com a sua excepcional resistência e estabilidade térmica em altas temperaturas é um excelente candidato para muitas aplicações aeroespaciais. Suas propriedades, por meio de modificações de processo, são capazes de atender uma série de critérios de projeto para resistir em condições ambientais extremamente duras (Kirk-Othmer, 2003).

A estrutura de grafite é composta por camadas de átomos de carbono dispostos em forma hexagonal, dentro das camadas, cada átomo de carbono está ligado a três átomos vizinhos coplanares por fortes ligações covalentes. A quarta ligação do elétron participa de uma fraca ligação de Van der Waals entre as camadas. A clivagem interplanar é facilitada como consequência destas fracas ligações interplanares, dando origem as excelentes propriedades de lubrificação do grafite (Callister, 2007).

Grafite é um material estrutural leve que mantém a maior parte da sua resistência mecânica, mesmo a temperaturas superiores à 2200°C. Tem uma elevada resistência ao choque térmico e exibe boas características de interação de nêutrons e estabilidade sob irradiação. A facilidade de processamento e disponibilidade comercial do grafite são outras qualidades desejáveis para estas aplicações, no entanto, a oxidação a temperaturas elevadas

é um problema que requer sistemas de anti oxidação para uma utilização prolongada (Kirk-Othmer, 2003).

A erosão do grafite em aplicações em bocais é um resultado de ambos os fatores: químico e mecânico. Mudanças de temperatura, pressão ou razão combustível/oxidante afetam fortemente a taxa de erosão. Propriedades do grafite que afetam sua resistência à erosão incluem a densidade, porosidade e a distribuição do tamanho de poro (Kirk-Othmer, 2003).

A entrada do convergente, garganta e a seção de saída do divergente de um bocal são frequentemente fabricados ou revestidos com grafite convencional, especialmente em pequenos bocais, em que a estabilidade dimensional é extremamente importante, uma vez que uma pequena alteração na dimensão resulta em uma mudança relativamente grande no desempenho. Em outros projetos a garganta pode ser fabricada com grafite convencional com a entrada e o cone de saída moldados com carbono ou materiais fibrosos de grafite, que servem de reforço para matérias plásticas de alta temperatura. Em bocais com dimensões maiores, as três seções podem ser fabricadas de materiais com fibra reforçada, por causa da alta resistência, baixo peso e facilidade de construção de materiais compósitos (Kirk-Othmer, 2003).

2.9 TERMOPAR COMO UM SISTEMA DE PRIMEIRA ORDEM

Muitos sistemas mecânicos, térmicos e elétricos podem ser modelados usando equações diferenciais de primeira ordem. Faremos uma pequena abordagem dessas equações aplicadas a resposta transiente dos termopares utilizados nos testes.

Ogata (2002) considera o sistema de primeira ordem mostrado na Figura 2-23. Fisicamente, isto pode representar um circuito RC, um sistema térmico, ou semelhante.

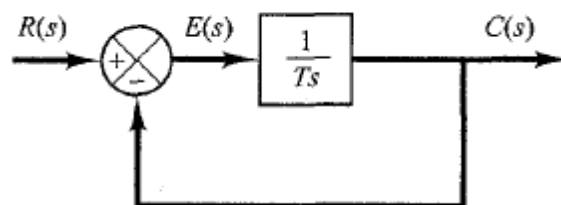


Figura 2-23 – Diagrama de bloco de um sistema de primeira ordem. (Ogata, 2002)

A relação de entrada e saída do sistema é dada por:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{Ts + 1}, \quad (31)$$

uma vez que a transformada de Laplace da função degrau é $1/s$, substituindo $R(s) = 1/s$ na Equação (31), nos obtemos:

$$C(s) = \frac{1}{Ts + 1} \frac{1}{s}, \quad (32)$$

expandindo $C(s)$ em frações parciais temos:

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{T}{Ts + 1} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \left(\frac{1}{T}\right)}, \quad (33)$$

tomando a transformada inversa de Laplace da Equação (33), obtemos:

$$c(t) = 1 - e^{-\frac{t}{T}}, \text{ para } t \geq 0, \quad (34)$$

a Equação (34) prevê que, inicialmente, a saída $c(t)$ é igual a zero e, finalmente, torna-se a unidade (Ogata, 2002).

O termo T é chamado de constante de tempo da resposta, sendo descrita como o tempo para $e^{-t/T}$ decair 37% do valor inicial. Alternativamente, a constante de tempo é o tempo que a resposta leva para atingir 63% do valor final do degrau. Verificamos isso fazendo $t=T$ na Equação (34), assim temos (Nise, 2004):

$$c(T) = 1 - e^{-\frac{T}{T}} = 1 - e^{-1} = 1 - 0.37 = 0.632. \quad (35)$$

O gráfico da Figura 2-24 representa a curva de resposta exponencial $c(t)$ dada pela Equação (34). Em uma constante de tempo, a curva de resposta exponencial passou de 0-63,2% do valor final. Em duas constantes de tempo, a resposta atinge 86,5% do seu valor final. Em $t=3T$, $4T$, e $5T$, a resposta atinge 95%, 98,2% e 99%, respectivamente, do valor final. Então, para $t=4T$, a resposta permanece dentro de 2% do valor final. Percebemos então, que o estado estacionário é atingido matematicamente somente após um período de tempo infinito. Na prática, no entanto, uma estimativa razoável do tempo de resposta é o período de tempo da curva de resposta chegar e permanecer dentro da linha de 2% do valor final ou quatro constantes de tempo (Ogata, 2002).

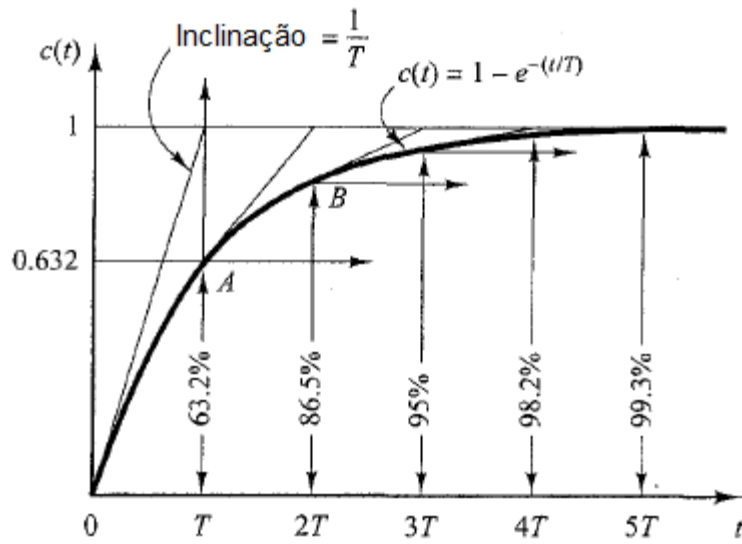


Figura 2-24 – Curva de resposta exponencial. (modificado - Ogata, 2002)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 BANCADA DE TESTES

A bancada de testes do motor-foguete a propelente híbrido, foi desenvolvida no Laboratório de Energia e Ambiente (LEA) do Departamento de Engenharia Mecânica (ENM) da Universidade de Brasília pelos alunos do Grupo de Pesquisas Aeroespaciais (GPA), sob a supervisão dos professores Carlos Alberto Gurgel Veras e Artur Elias de Moraes Bertoldi. A bancada permite ensaios de câmaras de combustão de tamanhos variados, possibilitando medidas de pressão, temperatura e empuxo.

A estrutura de apoio da bancada consiste em uma base metálica móvel, onde são fixadas as válvulas e a balança de empuxo. Na parte superior da estrutura de apoio são fixadas duas placas metálicas com espessura de 20 mm, e entre elas é disposta uma manta de borracha, com o objetivo de absorver parte da vibração gerada durante o funcionamento do motor. Um desenho esquemático da bancada é ilustrado na Figura 3-1.

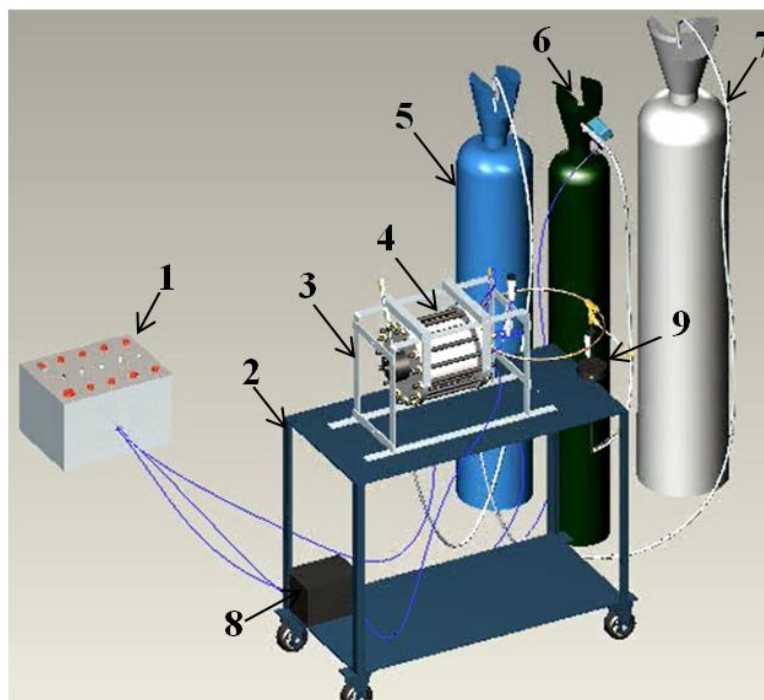


Figura 3-1 – Desenho esquemático da bancada de testes. 1- central de comando, 2- estrutura de apoio móvel, 3-balança de empuxo, 4- motor, 5- tanque de ar comprimido, 6- tanque de oxigênio, 7- tanque de GLP, 8- bateria e 9- placa de orifício.

A balança de empuxo (Figura 3-2) possibilita o movimento pendular do motor que atua sobre a célula de carga, registrando qualquer variação no empuxo durante os testes.

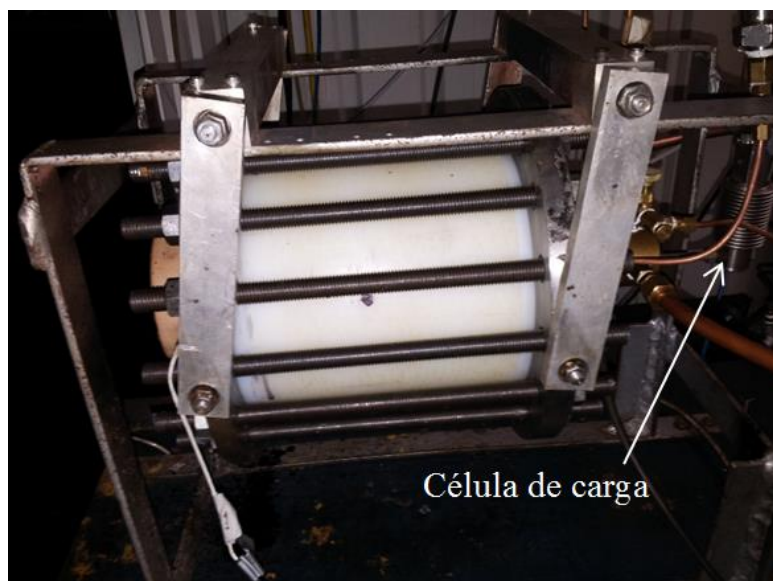


Figura 3-2 – Foto do motor montado na balança de empuxo.

O grão combustível consiste em um envoltório (case) de nylon® onde a parafina é armazenada. Para a fixação do grão combustível são utilizados dois flanges de aço inoxidável com 15 parafusos (M16) para garantir a boa fixação do grão, e evitar vazamentos durante os testes com o aumento da pressão na câmara. Os flanges possuem dois parafusos M8 na lateral para fixação na balança de empuxo. Para melhor compreensão chamaremos de flange N° 1 aquele onde o sistema de injeção é fixado, e de flange N° 2 onde é fixado o bocal supersônico (ver Figura 3-3).

Os cilindros de gases ficam separados da bancada experimental. São utilizados três cilindros, um de GLP (gás liquefeito de petróleo), um de gás oxigênio (GOX) e outro de ar comprimido.

Para a injeção de oxidante e ignição do motor, é utilizada uma câmara de cobre, fixada no flange N°1. A câmara de injeção possui entradas para o oxidante, ar comprimido e GLP da ignição, vela automotiva para gerar a centelha da ignição, transdutor de pressão e água para interrupção imediata da chama de combustão por motivos de segurança e de preservação do grão (ver Figura 3-4).

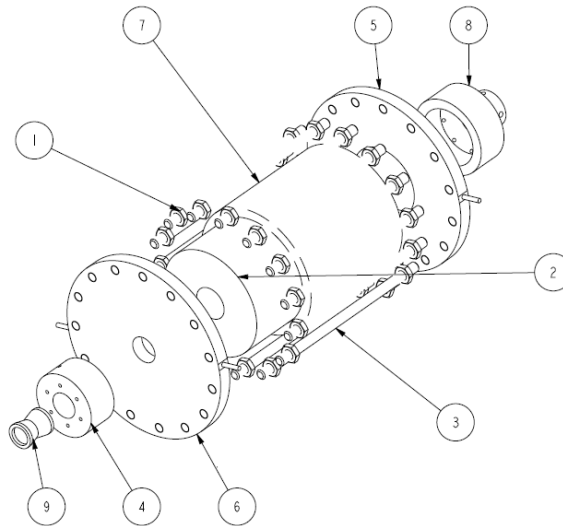


Figura 3-3- Desenho esquemático dos componentes utilizados na montagem do motor. 1- porca M16, 2- grão combustível, 3- parafuso M16, 4- câmara de Celeron, 5- flange nº 1, 6- flange nº 2, 7- case de nylon®, 8- câmara de cobre do sistema de injeção e 9- bocal convergente-divergente.

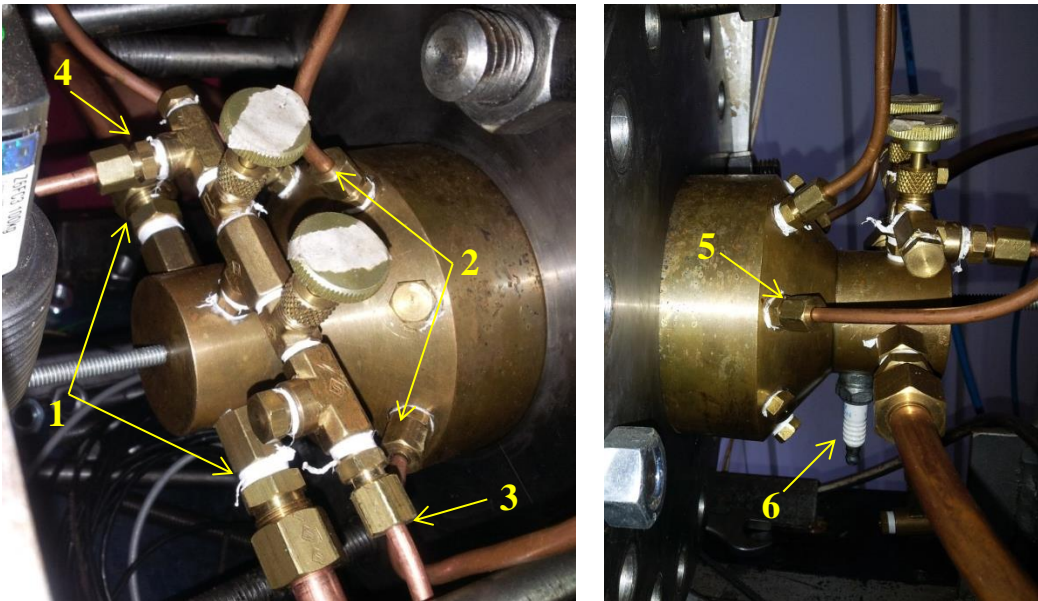


Figura 3-4 – Sistema de injeção do motor. 1- entrada de oxigênio, 2- entrada de água, 3- entrada de GLP, 4- entrada de ar comprimido, 5- transdutor de pressão e 6- vela de ignição.

O cilindro de GLP é da marca Supergasbras com 45 kg de massa, composto por uma mistura de 70 % de butano e 30 % de propano. E é conectado à bancada por meio de um tubo revestido de fibra metálica, seguido por uma válvula pneumática uniflow, para

impedir o retorno do gás, e por válvulas reguladoras de pressão. Após essas, o gás prossegue em tubos de cobre, de três milímetros de diâmetro interno, para o sistema de injeção.

O cilindro de gás oxigênio é da White Martins e possui 10 m³ a uma pressão de 200 bar. Também é utilizado tubo de fibra metálica por questões de segurança.

Logo na saída do cilindro, o gás oxigênio passa por um manômetro seguido por uma válvula pneumática para o acionamento à distância. Ao chegar à bancada, o gás oxigênio passa por niples e uma placa de orifício (geralmente 3,99mm de diâmetro, podendo ser modificada) com o objetivo de reduzir a pressão do gás para alcançar o valor desejado na câmara de combustão. Em ambos os lados da placa de orifício há transdutores de pressão e termopares para cálculo da vazão mássica. Após a placa de orifício o tubo do gás oxigênio é conectado através de uma conexão em “T” que divide o fluxo igualmente para dois tubos de cobre de dez milímetros de diâmetro interno, entrando um de cada lado no sistema de injeção. A Figura 3-5 mostra a localização da placa de orifício na bancada e a configuração dos tubos de entrada de oxigênio.

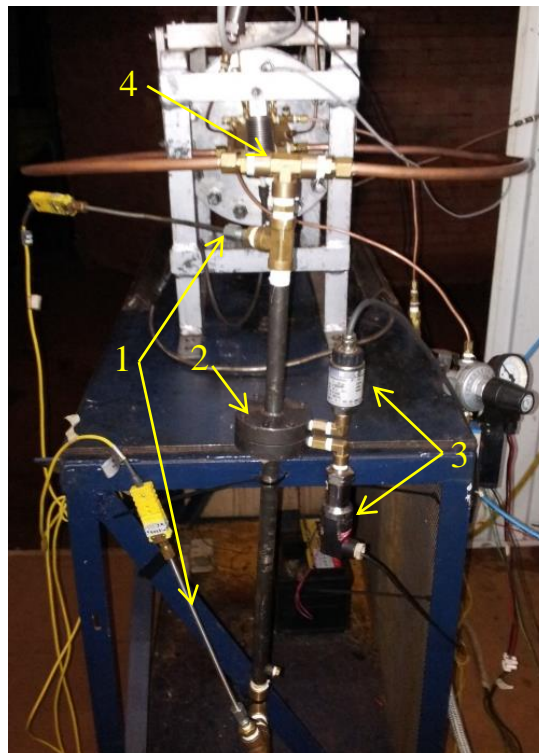


Figura 3-5 – Vista traseira da bancada de teste com o sistema de injeção e placa de orifício para queda de pressão. 1- termopares, 2- placa de orifício, 3- transdutores de pressão e 4 – conexão em T para a divisão do fluxo de oxigênio na entrada do sistema de injeção.

O terceiro cilindro é o de ar comprimido, da marca White Martins, produzido sinteticamente com 21 % de oxigênio e 79 % de nitrogênio. Uma válvula reguladora de pressão e dois manômetros, um de cada lado, estão dispostos na saída do cilindro para leitura da pressão interna e após a válvula. Ao chegar à bancada, passa por uma válvula solenoide e atravessa tubos de cobre de três milímetros até o sistema de injeção.

Tanto o ar comprimido quanto o GLP entram na parte superior do sistema de injeção, através de tubos de cobre, ocorrendo a mistura logo na entrada e colidindo frontalmente com a centelha. Esta é conectada por meio de uma bateria de 12 volts e 45 amperes da marca Lubax. Quando acionada, juntamente com uma abertura controlada das válvulas dos dois gases a uma razão estequiométrica adequada, inicia a ignição.

As válvulas de controle são fixadas na lateral da bancada, e o controle é feito por meio de uma central de comando. Nessa controla-se o sistema de injeção de GLP, ar comprimido e a centelha da ignição, a injeção de oxigênio no decorrer do ensaio e o sistema para apagar a chama ao término do ensaio.

O bocal é fixado ao motor com o auxílio de uma câmara de Celeron. São utilizados 6 parafusos M6 para fixar a câmara ao flange N°2. Para vedação, entre o flange e a câmara de Celeron, são utilizados um oring e papel velomoid (utilizado como junta em motor de automóvel). Os termopares são posicionados na câmara de Celeron através de dois furos dispostos 180°. A Figura 3-6 permite visualizar essa montagem.



Figura 3-6 – Fotos da montagem da câmara de fixação da tubeira com os termopares.

O Celeron é um plástico laminado com reforços de tecidos de algodão e resina fenólica, fabricado através do processo de prensagem, onde é aplicada alta pressão e alta temperatura sobre o material, dando origem a um material duro e denso. Quando o calor e

a pressão são aplicados simultaneamente às camadas, uma reação química (polimerização) ocorre, aglomerando as camadas em uma massa sólida e compacta. Trata-se de um material onde as características principais são: alta resistência ao desgaste, ao cisalhamento e ao choque, baixo coeficiente de atrito, amortece ruído e absorve vibrações (<http://www.plastecno.com.br/produtos.phd?categoria=12>).

A pressão do oxigênio na garrafa está em torno de 180 bar, uma queda de pressão é necessária para injetar o oxidante com uma pressão em torno de 5 bar na câmara de combustão. Isso é obtido através dos redutores de pressão ao longo da linha em conjunto com a placa de orifício.

3.2 GEOMETRIA DA TUBEIRA E MATERIAIS DE FABRICAÇÃO

Todas as tubeiras utilizadas nos testes apresentam a mesma geometria interna, e foram projetadas utilizando o software RPA – Tool for Rocket Propulsion Analysis. O comprimento do bocal é de 45 mm e 20 mm de diâmetro da garganta. A razão de expansão é 2,25 e 1,96 a razão de contração, com meio ângulo no convergente igual a $10,55^\circ$ e 12° na seção divergente. A parede dos bocais de cobre possui 6 mm de espessura, os demais bocais possuem espessura variável conforme vemos na Figura 3-7.

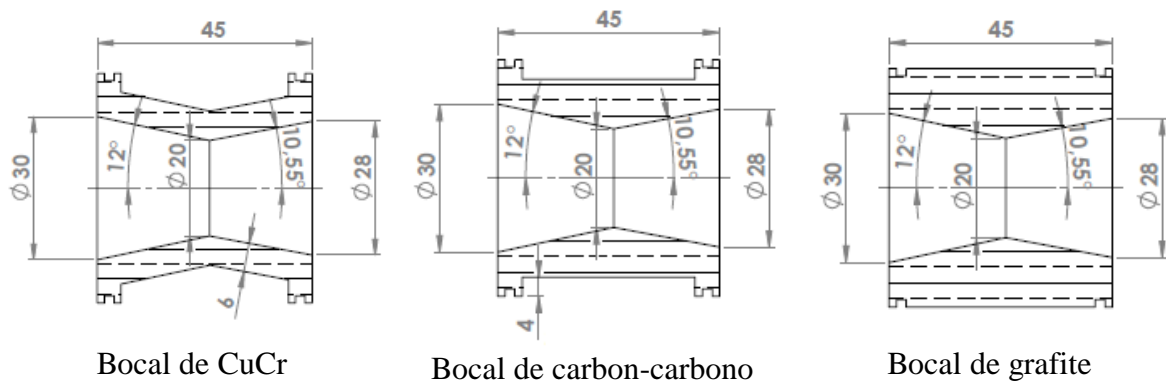



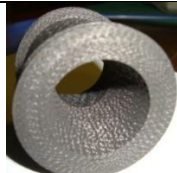





Figura 3-7 - Dimensões dos bocais testados.

Foram utilizados 12 bocais diferentes, sendo 5 deles fabricados em carbono-carbono, 2 de grafite, 3 de cobre-cromo com revestimento de zircônia estabilizada com ítria e 2 de cobre-cromo sem revestimento. Os bocais de carbono-carbono e grafite foram fabricados e revestidos com SiC na Ucrânia sobre os cuidados do Professor Anatoli Sanin da Dnipropetrovsk Oles' Gonchar National University, e os bocais de cobre-cromo foram

fabricados no SG-9 dentro da Universidade de Brasília e revestidos com ítria estabilizado com zircônia pelo processo de pulverização a plasma no Brasil pela Rolls Royce.

Todos os bocais de carbono-carbono, grafite e CuCr testados receberam uma nomenclatura para identificação conforme descrito na Tabela 3-1. Os processos de fabricação dos bocais, bem como os processos de revestimento são descritos nas próximas seções.

Tabela 3-1 – Nomenclatura e descrição dos bocais utilizados nos testes em bancada.

Bocal	Descrição	Imagem
B1	Bocal de grafite PG 50 com revestimento de SiC;	
B2	Bocal de carbono-carbono com fibra UralT22 sem revestimento de SiC;	
B2a	Bocal de carbono-carbono com fibra UralT22 com revestimento de SiC;	
B3	Bocal de carbono-carbono com fibra UralT22 e feltro sem revestimento de SiC;	
B3a	Bocal de carbono-carbono com fibra UralT22 e feltro com revestimento de SiC;	
B4	Bocal de cobre-cromo sem revestimento de YSZ;	
B4a	Bocal de cobre-cromo com revestimento de YSZ.	

3.3 FABRICAÇÃO DAS TUBEIRAS DE CARBONO-CARBONO

Foram fabricados dois tipos de pré-formas com base na viscosidade da fibra de carbono.

3.3.1 Tecido de fibra de carbono

O tecido de carbono é preparado utilizando a fibra Ural-T22Ra (Урал-T22Pa). O tecido é umedecido em uma solução de cola PVA e 5% de água, recebendo o formato de uma barra circular com o diâmetro requerido, que é fixada pela fibra de carbono Ural-nsh (Урал-нш). Em seguida as pré-formas secaram em um forno com temperatura de 120°C. Na Figura 3-8 temos a aparência original da seção da barra circular, com densidade de 0,7-0,8g/cm³.

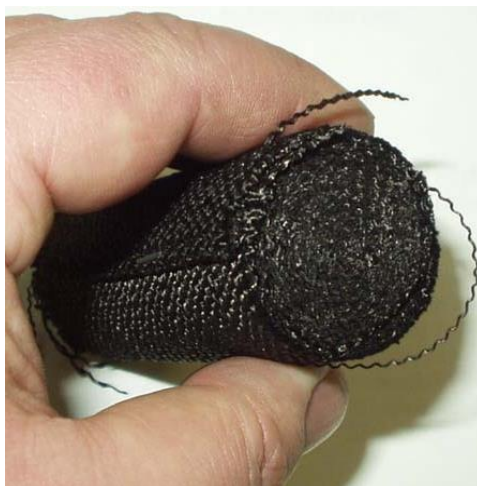


Figura 3-8 – Estrutura da pré-forma de tecido de fibra de carbono..

3.3.2 Estrutura de reforço combinado

O segundo tipo de pré-forma foi produzido com uma tecnologia similar, mas utilizando o tecido de carbono (Ural T22) e feltro espesso. Eles foram humedecidos em uma solução de cola PVA com 5% de água e em seguida a barra foi secada sobre uma mesa de corte. Na superfície de tecido seco foi enrolado o feltro de carbono viscoso da marca Karbofon. Esta combinação de materiais foi levada ao forno à temperatura de 120°C, tendo uma densidade de aproximadamente 0,4g/cm³ após o processo.

3.3.3 Impregnação com Pirocarbono

A impregnação das pré-formas com pirocarbono foi realizado na unidade AGATE-1.6 (АГАТ-1.6) usando o método de termogradiente de fase gasosa (método do movimento radial da área de pirolise).

A configuração básica da unidade consiste em uma câmara cilíndrica a vácuo refrigerada à água com eletrodos axiais de cobre (localizados nas tampas superior e inferior). Os eletrodos são móveis para compensar a expansão térmica da cerâmica durante o processo. Cada unidade tem um sistema de suprimento de energia separado para o aquecimento das cerâmicas, incluindo o regulador de tensão e transformador de potência. As unidades são equipadas com sistema de aspiração (0,1 – 0,001 torr) e sistema de admissão de gás. Durante a realização dos processos de impregnação de CH₄ a unidade trabalha sob pressão atmosférica ou a baixa pressão, podendo ser regulada a partir de 5-10 torr para atmosférica. As unidades são também equipadas por um sistema de admissão de gases inertes, hidrogênio e outros.

Cada unidade está equipada com um sistema de controle automático e controle de parâmetros do processo. Este sistema inclui o aumento e a redução programada da temperatura, manutenção automática da temperatura definida durante um processo com precisão necessária (normalmente com precisão +/- 1°C), controle de temperatura da água de arrefecimento, sistema de sinalização de queda dos parâmetros e etc. O controle de temperatura é monitorado por termopares e pela visão - usando pirômetros.

O diâmetro da câmara de trabalho da unidade AGATE-1.6 é de 0,6 m e altura de 1,4 m. A unidade é equipada com uma porta para a carga e descarga de produtos. A unidade AGATE trabalha com corrente alternada e potência elétrica máxima de 250 kW. A tensão de trabalho nos eletrodos é regulada de 0 à 40 V e corrente de 6 kA.

O aquecimento das pré-formas foi realizado por admissão direta de corrente. Para controle da temperatura das pré-formas, utilizam-se termopares com cobertura de quartzo.

O processo de impregnação foi conduzido com fluxo de gás natural (metano) na temperatura de 900 – 1100 °C. A taxa de movimento da área de pirolise foi de 0,25 - 0,5 mm/hora e o consumo de gás de 4-6 m³/hora.



Figura 3-9 - Aparência original da unidade AGATE-1.6



Figura 3-10 – Aparência original da pré-forma dentro da câmara da AGATE-1.6.

Após a impregnação das pré-formas de CCCM (Carbono-Carbono Composite Material) apresentam uma forma geométrica regular (cilíndrica), sendo então, levadas para

o torno mecânico para receber o formato desejado. Na Figura 3-11 é apresentada a forma original da seção de um molde de CCCM com tecido de fibra de carbono.



Figura 3-11 - Pré-forma de CCCM com tecido de fibra de carbono.

A densidade do material é de 1,35-1,5 g/cm³ para tecido de fibra de carbono, e 1,6-1,65 g/cm³ para a pré-forma de tecido e feltro denso.

3.3.4 Processo de revestimento de SiC.

Foi utilizado o método de pintura para aplicação do revestimento de carboneto de silício na superfície do material. Pó de silício KR-0 foram triturados apresentando partículas de 63 µm, sendo então misturados com o conjuntivo. As amostras foram aquecidas até uma temperatura de 40-60 °C para o mergulho na mistura. Após o mergulho as amostras foram levadas ao forno para secagem, e caso necessário, o processo é repetido mais uma ou duas vezes para o recebimento de uma densa camada uniforme de silício na superfície.

O processo de aplicação da mistura de silício foi realizado na unidade AGATE-2.0, possuindo construção similar a AGATE-1.6 com uma porta ampliada.

Para realizar o processo de aplicação da mistura de silício foi construído um equipamento tecnológico especial de CCCM. O equipamento permite o uso de unidades existentes como fornos de alta temperatura para o recozimento das amostras.

Um esboço da aparência original do equipamento e sua modificação na câmara da unidade são representados na Figura 3-12. O equipamento tecnológico consiste de aquecedor tubular de alta temperatura de CCCM (2), proteção térmica (4), janela

pirométrica (5). Aquecedores através de inserções de grafite (1 e 8) são localizadas entre os eletrodos da unidade. As amostras ou recipientes com amostras (3) são inseridas diretamente em um aquecedor ou inserções especiais (6). Para prevenir a destruição do equipamento pelo silício fundido é utilizada uma proteção especial (7).

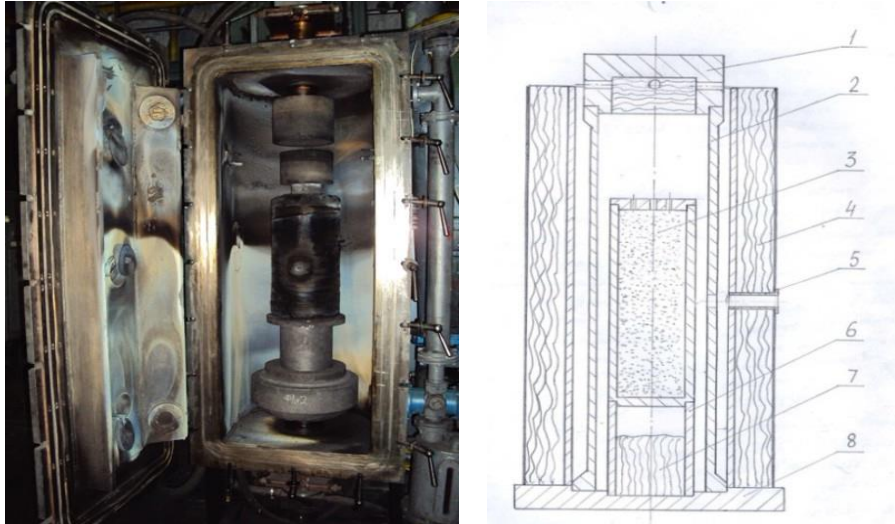


Figura 3-12 – Aparência e esquema do equipamento industrial para a execução dos processos de alta temperatura das amostras com base na instalação da AGATE

Após a montagem do equipamento tecnológico e fixação das pré-formas, fecha-se a porta da câmara para geração de vácuo e aquecimento. Após 15 minutos no aquecedor, ocorre um aumento de temperatura para 1500-1550°C, as pré-formas são mantidas a esta temperatura durante 15 minutos aproximadamente, desligando-se os equipamentos. O controle de temperatura é realizado pela visualização do desaparecimento da fibra, por uma janela pirométrica por meio de um pirômetro óptico. Após o resfriamento (aprox. 4 horas) a bomba de vácuo é desligada, a câmara é preenchida com ar, abre-se a porta do equipamento e as amostras são retiradas. Para melhorar a qualidade do revestimento o processo é repetido 3 vezes.

No aquecimento até 1500°, o silício foi fundido, interagindo com o carbono, formando um filme de SiC na superfície da amostra. Deve-se notar que pirocarbono, precipitado usando métodos em fase gasosa, tem estrutura cristalina clara e pouca interação com o silício, ao contrário de um carbono amorfo. É especialmente observado nas amostras com estrutura de reforço combinado (com base de tecido e feltro denso).

3.4 BOCAIS DE COBRE-CROMO COM REVESTIMENTO

A liga UNS18200 é utilizada na fabricação dos bocais de cobre-cromo. Como dito anteriormente, esse material foi selecionado com base nos trabalhos realizados por Bertoldo Jr., 2011 e Schloesser et al., 2010.

Uma barra redonda de dimensões 50,8 x 300 mm, foi fornecida pela Metalmax ligas especiais, para a fabricação de 5 bocais, dos quais 3 foram revestidos com zircônia estabilizada com ítria e 2 bocais permaneceram sem revestimento.

Os dados fornecidos pelo fabricante da liga estão listados na Tabela 3-2 abaixo:

Tabela 3-2 - Propriedades da liga de CuCr fornecidas pelo fabricante.

Composição	Cu 98,96%
	Cr 0,64%
	Outros 0,40%
Dureza	65/73 (HRB)
	111/125 (HBR)
Condutibilidade térmica	311,4/328,7 (W/m.K)
Resistência à tração	35/48 (Kg/mm ²)
Densidade	8,90 (g/cm ³)

O material foi usinado pelos técnicos do SG-9, localizado na Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília.

3.4.1 Medida de rugosidade

Realizou-se a medida da rugosidade da parte interna das tubeiras utilizando o rugosímetro modelo SJ-201 do fabricante Mitutoyo conforme Figura 3-13.



Figura 3-13- Rugosímetro para a medida da rugosidade média das tubeiras.

A rugosidade da superfície interna do bocal pode ter um grande efeito sobre o coeficiente de transferência de calor e, portanto no fluxo de calor. Estudos demonstram que o fluxo de calor pode ser aumentado até duas vezes com o aumento da rugosidade superficial. A maior rugosidade na superfície interna (no lado do gás quente) fará com que o gás da combustão no local, chegue perto da temperatura de estagnação (Sutton & Biblarz, 2001).

3.5 CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

Os termopares utilizados na verificação da temperatura do bocal durante a realização dos testes são do tipo K mineral com cabo de fibra de vidro de 200 mm com pote selagem e conector grande macho, fornecidos pela Thermomax (ver Figura 3-14). A temperatura máxima de trabalho é de 1200°C. Eles foram calibrados no Lab. de Metrologia Dinâmica da Faculdade de Tecnologia na UnB.

O sistema montado para calibração consiste em um forno elétrico da marca ISOTECH, multímetro digital Agilent 34401A e uma termoresistência tipo Pt-100 a 4 fios (250 mm de comprimento e diâmetro de 8 mm). A temperatura no forno variou de 200 à 400°C em intervalos de 50°C. Calibrações com temperaturas superiores a 400°C resultou em falhas no cabo de fibra de vidro dos termopares causando o seu rompimento. A falha ocorreu devido a pequena extensão do termopar, pois o tempo necessário para estabilizar o sistema fez com que o calor conduzido pela parte metálica, fosse o suficiente para queimar a proteção de fibra de vidro dos cabos dos termopares, por isso a curva de calibração foi

extrapolada para obter leituras acima de 400°C. Na Figura 3-15 visualizamos o sistema montado para a calibração.



Figura 3-14 – Foto do termopar utilizado no monitoramento da temperatura do bocal.

Os termopares são inseridos em um bloco metálico dentro do forno, a temperatura do forno é regulada e observa-se então, a variação da resistência do Pt-100 no multímetro digital. A temperatura do Pt-100 é relacionada com a resistência por uma tabela de valores. Os valores obtidos na calibração dos termopares foram dispostos na Tabela 3-3.



Figura 3-15 – Sistema montado para a calibração dos termopares.

Tabela 3-3 – Resultados da calibração dos termopares.

Termopares	Leituras				
	1	2	3	4	5
Termopar 1	193,05	246	295,86	345,27	396,51
Termopar 2	192,85	245,69	295,42	344,58	395,48
Pt-100	191,00	243,00	292,00	341,00	390,00

3.5.1 Tempo de resposta dos termopares

Para determinar o tempo de resposta dos termopares utiliza-se um equipamento de banho líquido da Julabo modelo F25. É utilizado o fluido refrigerante e anticongelante da Peak® dentro do tanque de banho. A Figura 3-16 apresenta o equipamento utilizado.



Figura 3-16 – Equipamento para banho líquido modelo F25 da Julabo.

O fluido é inicialmente aquecido até uma temperatura de 60°C onde os termopares são inseridos para a aquisição da curva de resposta.

Deve-se tomar o cuidado nesta análise, pois a temperatura inicial é diferente de zero, portanto é calculada a variação de temperatura. A constante de tempo é então obtida no gráfico no ponto onde a leitura é igual ao valor inicial acrescido do resultado da multiplicação da variação por 0,632. Para cada termopar foram realizadas 4 curvas de resposta. Portanto o tempo de resposta é determinado através da média destes valores.

Tabela 3-4 – Leituras e média dos tempos de respostas dos termopares 1 e 2.

	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3	Leitura 4	Média
Termopar 1	1,492	1,564	1,315	1,252	1,404
Termopar 2	1,256	1,440	1,502	1,502	1,471

Para a análise dos gráficos de temperatura adotaremos o valor 1,4 segundos para o tempo de resposta dos termopares 1 e 2.

3.6 TESTES E AQUISIÇÃO DE DADOS

Em cada teste o tempo de queima é de aproximadamente 10 segundos, fora o tempo de ignição. Esse tempo foi determinado com base nos testes preliminares com bocais de cobre-cromo sem revestimentos, que falharam após 5 segundos de teste. Para monitorar a temperatura da parede dos bocais são utilizados 2 termopares dispostos 180°, localizados na seção da garganta.

A bancada é acionada por uma caixa de comando a distância, inicialmente ar e GLP são liberados juntamente com a centelha, ocorrendo a ignição. Após 3-5 segundos de ignição é acionada a válvula que libera o oxigênio para a queima principal e desligam-se as válvulas de GLP e ar comprimido. Após 10 segundos fecha-se a válvula do oxigênio e é acionada a válvula que libera água dentro do motor para apagar a chama e manter o formato do grão, evitando perda de parafina após o ensaio.

Grãos combustíveis de diferentes composições foram utilizados, por isso alguns bocais, quando possível, foram reutilizados. Isto porque outros trabalhos de graduação e mestrado estudam a variação da taxa de regressão com a mistura de dopantes na parafina, tendo 3 composições diferentes de parafina: 100% parafina, 85% parafina com 15% parafina vegetal, e 80% parafina com 20% gordura animal (sebo de boi).

O objetivo dos testes é obter dados comparativos dos bocais utilizados, pela determinação da temperatura de parede e desgaste do bocal (variação nos diâmetros da garganta e possível variação de massa).

A massa inicial e final dos bocais é verificada, porém esses resultados não são válidos, pois a quantidade de parafina impregnada nos bocais mascarou a massa final. Em alguns casos, a massa final é maior que a massa inicial. Por isso, atentou-se apenas a

verificação da variação do diâmetro da garganta e a análise visual da região de desgaste em cada bocal.

Nos testes iniciais para calibração da bancada, observa-se o desgaste prematuro do flange N°2, cujo material é aço inoxidável. A razão para tal é a mudança do oxidante (óxido nitroso para oxigênio), fazendo com que a razão O/F, rica em oxigênio, promova uma chama agressiva ao material. Na Figura 3-17 e Figura 3-18 observamos a região de fusão do flange e da tubeira. A câmara de refrigeração teve boa parte do seu material consumido (fundido) durante o teste.



Figura 3-17 – Fotos do flange de inox antes e após o teste, podendo observar o desgaste devido a agressividade da queima.

A solução proposta para proteger o flange dos gases da combustão, evitando que este sofra desgaste prematuro, é o uso de uma proteção de Celeron encaixada no final do grão. Tal proteção consiste em uma tampa circular de Celeron, com espessura de 15 mm, furo central de 28 mm e um rasgo circular para o encaixe da cabeça dos parafusos de fixação da câmara da tubeira. (ver Figura 3-19).

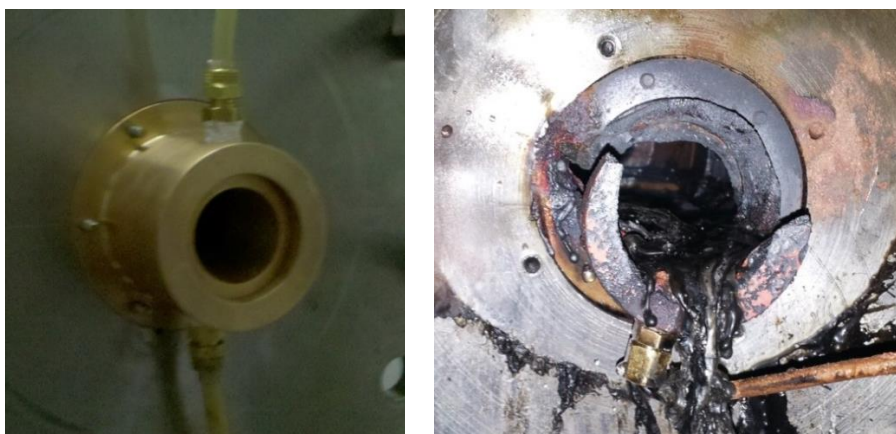


Figura 3-18 – Fotos da tubeira no interior da câmara de refrigeração antes e após o teste.

A proteção de Celeron possibilitou uma vida útil do flange superior ao esperado. Foram realizados 12 testes até a substituição da tampa de Celeron e do flange de aço inox. O desgaste observado após estes ensaios é inferior ao desgaste provocado pelo ensaio sem a proteção (ver Figura 3-20).



Figura 3-19 – Tampa de Celeron encaixada no final do grão para proteção do flange.



Figura 3-20 – Tampa de Celeron e o flange de aço inox substituídos após o 12º teste.

Para a aquisição de dados é utilizado o sistema da Lynx (ver Figura 3-21). O sistema físico consiste em um sistema integrado ADS0500 (condicionador de sinais) que permite a ligação de termopares, sensores em ponte, sinais de baixa tensão e corrente, possuindo 16 entradas digitais nível TTL. E um conversor (ADS-1000) A/D e D/A básico, entrada e saída em tensão, sem condicionador de sinais incorporado, utilizando interface de rede padrão Ethernet (conector RJ-45) com protocolo UDP/IP que permite a comunicação usando interfaces de rede disponíveis em qualquer computador. O software AqDados 7 é utilizado para adquirir os sinais e armazená-los em arquivos de séries temporais. Para a consulta dos arquivos utiliza-se o AqDAnalysis.

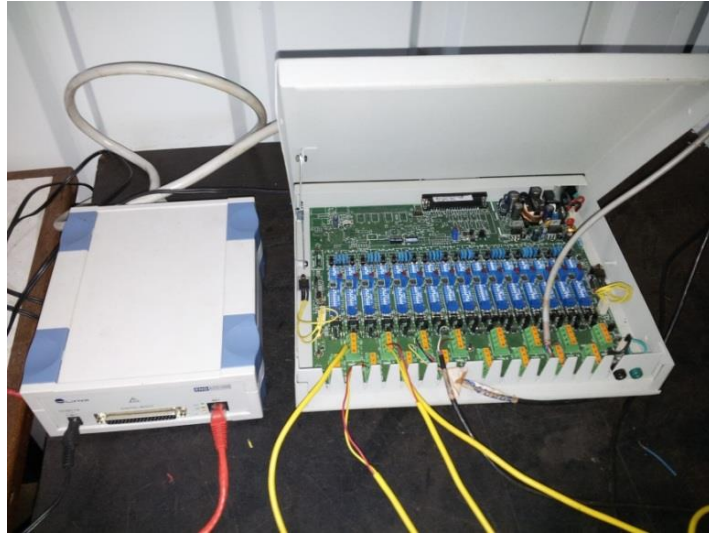


Figura 3-21 – Sistema de aquisição de dados da Lynx utilizado durante os testes na bancada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 REVESTIMENTO DOS BOCAIS

Os bocais B1 apresentam revestimento de SiC, porém o grafite possui uma estrutura compacta e com baixa porosidade, resultando em pouca penetração do revestimento no substrato. O revestimento obtido é de baixa qualidade e com pouca adesão. A Figura 4-1 mostra o revestimento aplicado no bocal de grafite. Nos bocais B2a e B3a o revestimento de SiC apresenta boa adesão ao substrato com maior penetração, devido a maior porosidade do material compósito (ver Figura 4-2).

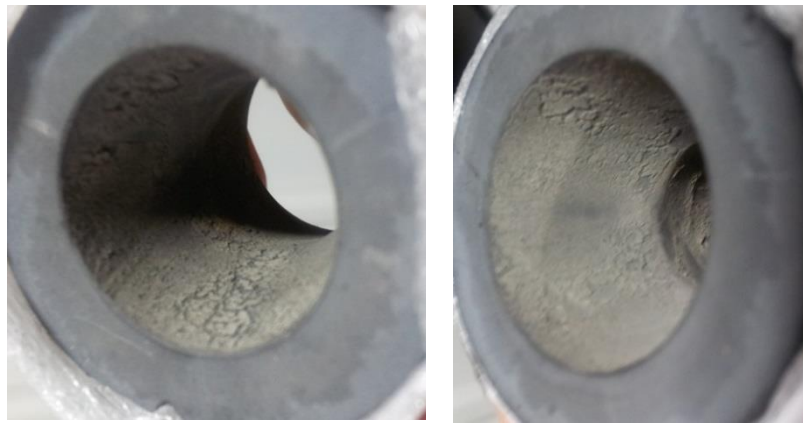


Figura 4-1 – Revestimento de SiC aplicado nas tubeiras de grafite.



Figura 4-2 – Revestimento nos bocais B2a (esquerda) e B3a (direita).

A função do revestimento de SiC nos bocais de grafite e carbono-carbono é proteger o substrato da oxidação na presença de oxigênio durante o funcionamento do motor. Uma vez que estes são suscetíveis a reagir com oxigênio em altas temperaturas

criando uma região de erosão química do material do bocal, resultando na queda de eficiência do motor.

Note que o revestimento de SiC não possui a função de barreira térmica igual a de YSZ aplicada nos bocais de CuCr, portanto não deve ocorrer uma diferença de temperatura entre o revestimento e o substrato de carbono-carbono ou grafite.

Os bocais fabricados com a liga de CuCr foram revestidos com YSZ utilizando a técnica de pulverização térmica, com o objetivo de criar uma barreira de proteção térmica. A espessura do revestimento varia em torno de 0,3 mm, apresentando bom acabamento superficial, porém com algumas descontinuidades ou protuberâncias próximas a seção da garganta (indicados pelas setas na Figura 4-3 e Figura 4-4). Nestas regiões, a energia cinética do gás que passa por essa imperfeição, é localmente convertida de volta em energia térmica essencialmente igual à pressão e temperatura de estagnação da câmara de combustão. Isso pode levar a um superaquecimento local e consequente falha da tubeira.



Figura 4-3- Revestimento do bocal B4a1.



Figura 4-4- Fotos do revestimento do bocal B4a2.

A rugosidade do revestimento cerâmico foi determinada juntamente com a dos bocais de carbono-carbono e grafite. Foram realizadas três medidas para o cálculo do valor médio. O cut-off utilizado é de 2,5 mm, pois trata-se de um perfil aperiódico (ver resultados na Tabela 4-1).

Tabela 4-1 – Valores da rugosidade Ra dos bocais testados.

Tubeira	Leituras – Ra (μm)			Valor médio - Ra (μm)
	1	2	3	
B4	3,98	4,50	3,67	4,05
B4a1	12,25	12,04	10,47	11,59
B4a2	16,18	16,04	15,02	15,75
B4a3	13,55	11,80	10,68	12,01
B2	4,74	7,14	6,85	6,24
B1	9,22	8,25	5,03	7,50

Os bocais de CuCr com revestimento apresentam valores de rugosidade média cerca de duas vezes superior aos outros bocais, implicando numa transferência de calor por convecção na parte interna (entre o gás quente e a superfície do revestimento) provavelmente superior aos bocais de carbono-carbono, grafite e CuCr sem revestimento, fazendo com que a temperatura da superfície do revestimento seja superior. Mas em contrapartida, o revestimento cerâmico possui um coeficiente de transferência de calor teórico, entre 0.8 e 1.0 W/mK segundo Hass, (2000) utilizando o processo de pulverização térmica, inferior ao do substrato de carbono-carbono, grafite e de CuCr sem revestimento. Fazendo com que a temperatura alcançada no substrato dos bocais B4a seja inferior, conforme será visto nas tabelas de resultados de temperaturas na próxima seção.

4.2 Leitura dos termopares

Para a leitura de temperatura são utilizados dois termopares dispostos na seção da garganta a uma distância de 6 mm da superfície interna (ver desenho técnico no Anexo B). Na Figura 4-5 são marcadas as posições de leitura das temperaturas em função do tempo de teste. Observamos que mesmo após o desligamento do motor (final do teste) a curva do termopar ainda apresenta um crescimento devido ao tempo de resposta necessário para

estabilizar o sinal do termopar. O tempo de resposta calculado na seção 3.5.1 é de 1,4 segundos.

O gráfico de pressão na câmara é utilizado para determinar o tempo de queima do grão, a Figura 4-6 mostra o ponto inicial e final da queima. Durante o tempo de queima a pressão na câmara de combustão sofre uma ligeira inclinação para baixo, o que é um comportamento típico de motores híbridos devido a abertura do canal do grão combustível e variações na geometria da tubeira.

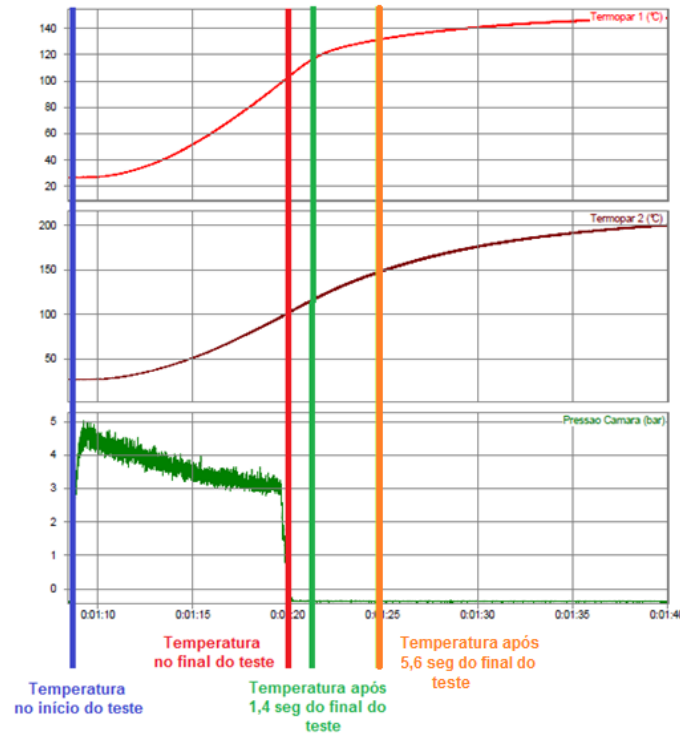


Figura 4-5 - Posições das leituras de temperaturas em função do tempo de teste nos gráficos dos resultados.

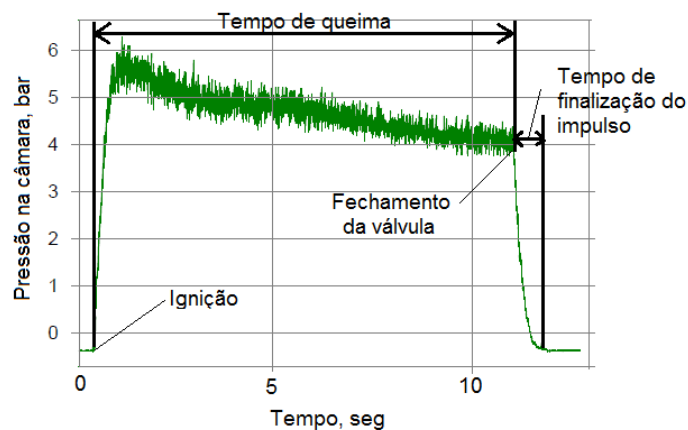


Figura 4-6 – Caracterização da curva de pressão na câmara em função do tempo.

São registrados na Tabela 4-2 os valores das temperaturas no início e no fim do ensaio. Note que, em alguns casos a temperatura inicial está bem acima da temperatura ambiente, isso acontece devido à ignição manual que em alguns casos possui um tempo superior aos demais fazendo com que a temperatura sofra um acréscimo antes da abertura da válvula de oxigênio que dá início a queima. Por isso a variação de temperatura é colocada na tabela. A variação de temperatura é a diferença entre a temperatura após 1,4 segundos do final do teste com a temperatura no início do ensaio para cada um dos termopares.

Tabela 4-2 – Valores das temperaturas máximas e mínimas de acordo com o grão combustível utilizado e o tempo de queima.

Teste	Bocal	Grão	Temperatura no início do ensaio (°C)		Temperatura no final do ensaio (°C)		Temperatura após 1,4 seg do final do ensaio (°C)		Variação de temperatura (°C)		Tempo de queima (seg)
			T1_i	T2_i	T1_f	T2_f	T1	T2	ΔT1	ΔT2	
1	B1-1	80/20	30,52	27,49	348,88	418,38	391,58	468,4	361,06	440,91	10,5
2	B1-2	85/15	23,75	22,10	428,07	829,38	448,77	829,37	425,02	807,27	15,5
3	B2	80/20	48,77	50,72	344,94	398,51	410,79	507,45	362,02	456,73	7,4
4	B2a-1	80/20	50,19	49,47	469,14	473,81	529,24	514,18	479,05	464,71	10,7
5	B2a-2	85/15	83,31	79,96	421,03	455,55	483,46	537,7	400,15	457,74	9,5
6	B3-1	80/20	101,86	71,45	465,74	475,56	524,83	501,87	422,97	430,42	10,1
7	B3-2	80/20	38,93	36,16	827,26	239,87	827,29	342,3	788,36	306,13	5,2
8	B3a	80/20	30,14	28,60	451,98	420,16	564,63	486,59	534,49	457,99	10,6
9	B3a	80/20	31,25	34,48	398,79	394,70	429,01	410,5	397,76	376,02	10,4
10	B4	85/15	28,25	27,87	391,71	452,61	449,54	515,57	421,29	487,70	8,4
11	B4	85/15	31,19	32,64	332,70	459,78	379,26	537,6	348,07	504,96	13,1
12	B4a1	85/15	25,30	25,27	302,11	327,07	377,61	398,17	352,31	372,90	10,4
13	B4a2	85/15	32,50	31,94	248,76	358,84	295,05	436,81	262,55	404,87	15,9
14	B4a3	85/15	30,82	31,54	140,32	144,09	174,32	176,66	143,50	145,12	10,0

Foram utilizadas duas composições diferentes de combustível na realização dos testes, com a seguinte nomenclatura: 80/20 com 80% de parafina comum e 20% de gordura animal (sebo de boi) e 85/15 com 85% de parafina comum e 15% de parafina alternativa. A parafina alternativa é composta por hidrocarbonetos, cera de abelha e óleo vegetal e é objeto de estudos na Universidade de Brasília para a análise da taxa de regressão

Os testes 2 e 7 apresentam respostas elevadas de temperatura final nos termopares T2 e T1 respectivamente. Conforme veremos nas análises individuais dos bocais na seção

4.3, o ponto de contato dos termopares, em ambos os testes, foi atingido por uma trinca, fazendo com que a leitura apresentasse valores superiores aos demais testes.

O tempo de queima padrão para os ensaios foi de 10 segundos, mas em alguns casos os testes foram abortados antes de atingirem o tempo padrão, pois ocorreram instabilidades durante a queima. O problema mais frequente foi a fusão do flange, fazendo com que uma grande quantidade de partículas fossem lançadas contra o bocal criando regiões de desgaste por erosão. A Figura 4-7 mostra o momento em que o ensaio com o bocal B3-2 (teste 7) apresenta uma grande quantidade de partículas fundidas do flange lançadas durante a queima, o ensaio foi abortado após 5,2 segundos de funcionamento do motor.



Figura 4-7- Teste com o bocal B3-2 com 5,2 segundos de duração, aonde são observados uma grande quantidade de partículas metálicas sendo ejetadas durante a queima do grão.

O teste com o bocal B4 (teste 11) foi realizado até a fusão do material da tubeira para determinar o tempo máximo de execução do ensaio com os bocais de CuCr sem revestimento. A Figura 4-8 mostra o momento em que a coloração da chama sofre alteração para um tom esverdeado indicando a fusão do substrato de CuCr. Neste momento a válvula de oxigênio é fechada para a interrupção do ensaio que ocorreu após 13 segundos de teste.

Também foi realizado um teste com tempo de 15,9 segundos com o bocal B4a2 (CuCr com revestimento) onde a integridade do substrato metálico foi mantida, verificando

então, que o revestimento cerâmico funcionou como uma barreira de proteção térmica evitando a fusão do bocal.



Figura 4-8 - Foto do momento em que a chama do teste de 13 segundos com o bocal B4 (CuCr sem revestimento) apresenta coloração esverdeada, indicando a fusão do material do bocal.

Para melhor visualizar a temperatura alcançada por cada bocal durante os ensaios, é construído com a Tabela 4-3 o gráfico da Figura 4-9 com a média das variações de temperatura registradas pelos termopares 1 e 2. A variação média da temperatura é a média das variações dos termopares 1 e 2 para cada ensaio, dado por $(\Delta T_1 + \Delta T_2)/2$, exceto para os ensaios 2 e 7 que foram consideradas apenas as variações registradas pelos termopares 2 e 1 respectivamente.

Observando o gráfico da Figura 4-9, onde os bocais estão alinhados por ordem decrescente de variação de temperatura, notamos que os maiores valores de leituras dos termopares aconteceram nos bocais B3a e B2a-1 e com tempo de queima próximo ao tempo padrão de 10 segundos. O bocal B2 com 7,4 segundos de queima também apresenta uma variação elevada, pois atinge um valor médio de 409,38 °C em um tempo inferior ao padrão. Isso se deve a elevada condutividade térmica dos compósitos de carbono-carbono. Bocais de CuCr sem revestimento (B4) também atingiram temperaturas elevadas, mas em contrapartida os bocais de CuCr com revestimento cerâmico apresentaram as menores

temperaturas. O revestimento possui uma condutividade térmica baixa funcionando como uma barreira térmica, diminuindo o calor transferido para o substrato de CuCr.

Tabela 4-3 - Média das variações de temperatura registradas pelos termopares 1 e 2 para cada ensaio.

Teste	Bocal	Variação de temperatura (°C)		Média das variações de temperatura (°C)
		$\Delta T1$	$\Delta T2$	$\Delta T_{\text{médio}}$
1	B1-1	361,06	440,91	400,98
2	B1-2	425,02	807,27	425,02
3	B2	362,02	456,73	409,38
4	B2a-1	479,05	464,71	471,88
5	B2a-2	400,15	457,74	428,94
6	B3-1	422,97	430,42	426,69
7	B3-2	788,36	306,13	306,13
8	B3a	534,49	457,99	496,24
9	B3a	397,76	376,02	386,89
10	B4	421,29	487,70	454,50
11	B4	348,07	504,96	426,52
12	B4a1	352,31	372,90	362,61
13	B4a2	262,55	404,87	333,71
14	B4a3	143,50	145,12	144,31

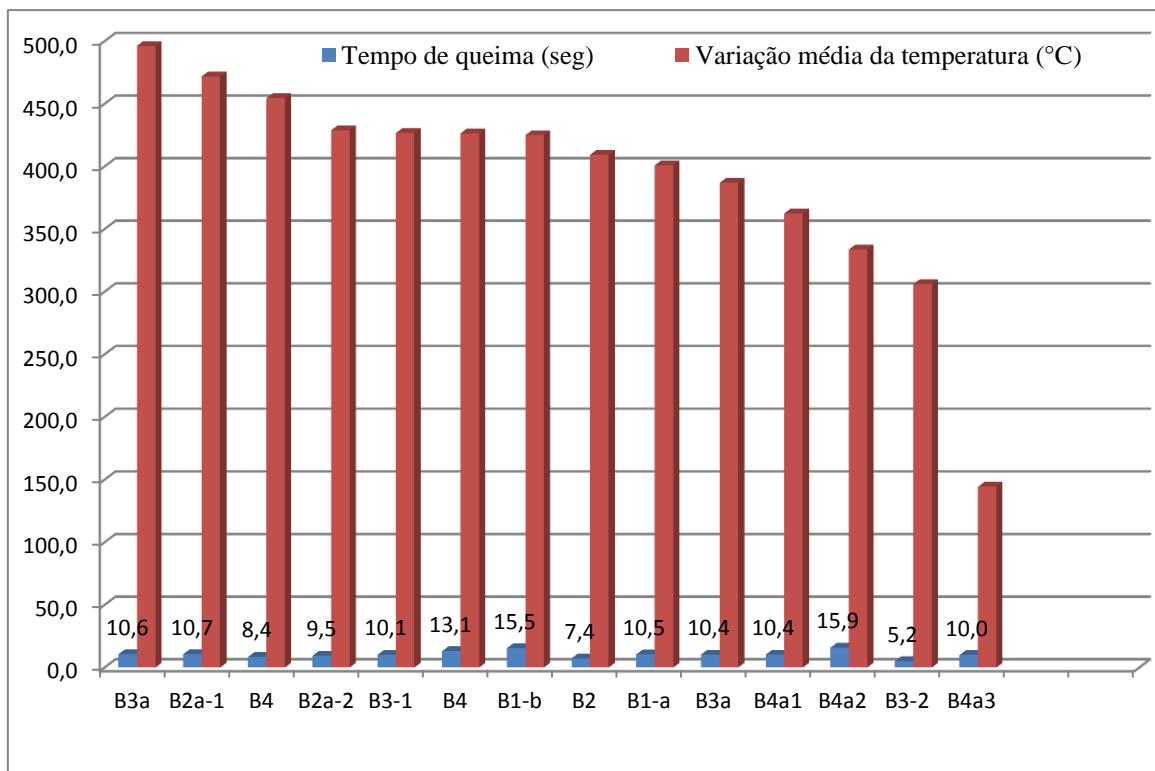


Figura 4-9 - Média das temperaturas dos termopares T1 e T2 em ordem decrescente no final do teste e tempo de queima para cada bocal ensaiado.

Uma comparação entre os testes com os bocais B4 (8,4 segundos) e B4a-1 (10,4 segundos) e B4a-3 (11 segundos) mostra que mesmo com um tempo menor de queima, o primeiro bocal possui uma variação média de temperatura bem acima dos outros bocais. O revestimento do bocal B4a-3 apresentou uma eficiência superior ao B4a-1, pois com um tempo maior de ensaio a variação de temperatura foi inferior. Essa diferença pode ser resultado de diferenças na espessura e densidade do revestimento, resultando numa variação da condutividade térmica entre os revestimentos dos três bocais. Mas em uma visão geral, a proteção térmica gerou grandes diferenças entre as variações de temperaturas apresentadas entre os bocais revestidos e os bocais sem revestimento, indicando que a barreira térmica atendeu ao objetivo de proteção do substrato não permitindo que o mesmo atingisse o ponto de fusão como ocorreu com o bocal B4 sem revestimento.

Outro ponto importante observado no gráfico é que mesmo com um tempo de queima superior, o bocal B4 apresenta uma variação de temperatura abaixo dos bocais de carbono-carbono, indicando que estes possuem uma condutividade térmica superior ao CuCr (311,4 / 328,7 W/mK).

Os dados obtidos nos transdutores de pressão na entrada e saída da placa de orifício, câmara de empuxo e os valores do empuxo e da razão O/F calculada em cada ensaio também são relatados na Tabela 4-4.

Lembrando que a pressão na garrafa de oxigênio (aprox. 200 bar) está bem acima da pressão utilizada na câmara de combustão, por isso são utilizados niples ao longo da linha de alimentação em conjunto com a placa de orifício. Ocorre em média, uma variação de 25 bar entre a entrada e saída da placa de orifício. E a queda de pressão da saída da placa de orifício para a câmara de combustão no início do ensaio é em média 6 bar, buscando uma pressão máxima no início do ensaio na câmara de combustão em torno de 4,5 bar. No decorrer do ensaio a pressão na câmara de combustão sofre um decréscimo, por isso a coluna de pressão média na câmara de combustão é adicionada.

A razão O/F ideal para o par propelente utilizado neste motor é cerca de 2.2, porém a razão calculada nos ensaios ficou bem abaixo deste valor ideal. O motivo foi a necessidade de diminuir a quantidade de oxigênio para evitar a degradação do flange de aço inox, pois o motor, conforme dito anteriormente, foi inicialmente projetado para utilizar óxido nitroso como oxidante. A substituição por oxigênio resultou em uma queima mais agressiva aos materiais que compõem a estrutura do motor.

Tabela 4-4 – Dados dos transdutores de pressão na placa de orifício, câmara de combustão, valores de empuxo e razão O/F durante os testes realizados.

Teste	Pressão na câmara de combustão (bar)			Pressão na placa de orifício (bar)		Empuxo (kgf)	Razão O/F
	Min.	Max.	Med.	Entrada	Saída		
1	2,94	4,36	3,65	32,36	9,38	16,95	0,87
2	3,45	5,11	4,28	40,02	11,94	20,50	1,13
3	4,82	5,65	5,24	44,77	13,78	25,02	1,15
4	3,87	5,15	4,51	37,59	11,28	19,15	0,74
5	3,52	5,04	4,28	33,25	11,01	20,45	0,73
6	2,87	3,37	3,12	28,30	8,57	14,96	0,55
7	4,34	4,70	4,52	38,91	11,76	19,49	1,63
8	4,35	5,40	4,88	40,17	12,30	22,61	0,68
9	4,09	5,85	4,97	38,27	11,61	20,17	0,78
10	3,18	4,08	3,63	36,80	10,94	14,04	1,17
11	3,23	4,39	3,81	35,99	10,50	17,57	1,06
12	4,63	5,89	5,26	42,09	12,80	25,76	0,90
13	3,83	4,84	4,34	33,55	9,86	13,97	0,97
14	4,30	5,62	4,96	38,02	11,48	18,50	0,91

4.3 Análise dos bocais testados

Fotos dos bocais testados foram coletadas após os testes para análise das regiões de desgaste, possibilitando uma comparação visual dos mesmos.

4.3.1 Bocal B1

Foram avaliados dois bocais de grafite, com as seguintes nomenclaturas: B1-1 e B1-2. O bocal B1-1 apresenta pequena região de desgaste no convergente. Grande parte deste desgaste é devido ao jateamento de partículas fundidas do flange, com regiões de depósito do material. Porém, mesmo sujeito ao jato de partículas, o bocal manteve íntegra a geometria da garganta apesar da baixa resistência a erosão do grafite.

A trinca apontada na Figura 4-10 foi inicialmente creditada às tensões térmicas devido ao acionamento do sistema de desligamento do motor, que injeta água no sistema de injeção. Mas como veremos a seguir, o bocal B1-2 apresentou uma trinca semelhante e não foi utilizado o sistema de desligamento do motor, indicando que os bocais de grafite apresentaram tensões térmicas elevadas devido ao fluxo de calor recebido dos gases da combustão.

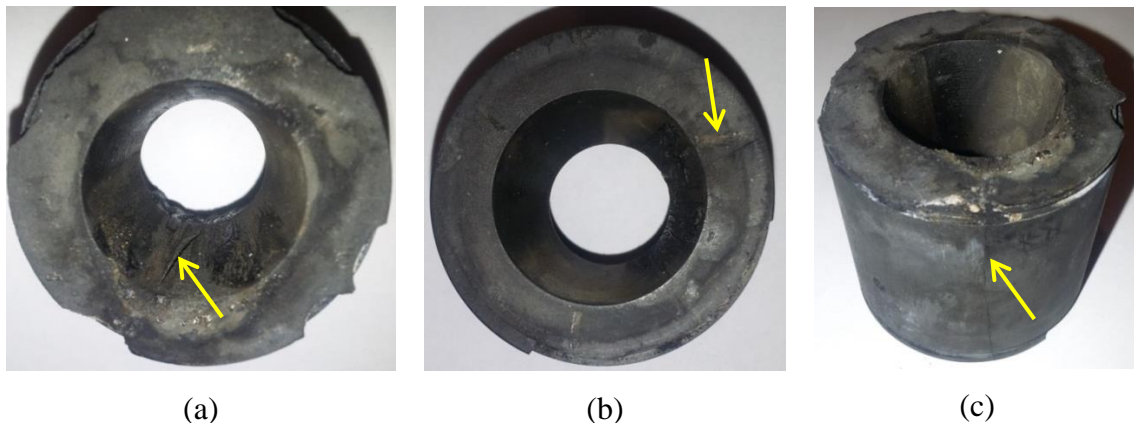


Figura 4-10 – Fotos do bocal B1-1 da seção convergente (a), divergente (b) e de perfil (c).

As perdas de pequenos pedaços na borda externa do bocal aconteceram por causa da fragilidade do grafite, o que exige uma maior atenção no manuseio durante a montagem.

O bocal B1-2 (ver Figura 4-11) utilizado em um teste de 15 segundos de queima apresentou grande desgaste no convergente (seta vermelha), além de uma trinca por toda

seção longitudinal. Esta trinca ocorreu durante a queima, uma vez que, pela análise do gráfico de temperatura do termopar T2 (ver Gráfico II do Anexo A), observa-se um crescimento acentuado da temperatura, comparado com o termopar T1, seguido de uma região com temperatura constante em torno de 829°C. Isso porque o ponto de leitura do termopar está localizado na região de propagação da trinca, indicando que esta se originou durante o funcionamento do motor.



Figura 4-11- Fotos do bocal B1-2 após o teste aonde é possível visualizar a trinca na seção longitudinal do bocal.

Após o teste do bocal B1-2, foi tirada uma foto do material ainda incandescente aonde podemos observar a trinca propagada na parte superior, indicada pela seta, na Figura 4-12.

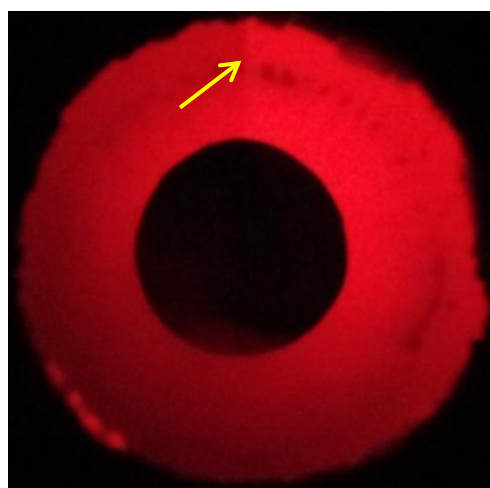


Figura 4-12- Foto do bocal B1-2 ainda incandescente após o teste, possibilitando a visualização da trinca na parte superior da figura.

4.3.2 Bocal B2

O desgaste apresentado no bocal B2 foi maior do que no bocal B1, a Figura 4-13 mostra região de grande perda de material no convergente. A causa também está relacionada com o jato de partículas fundidas do flange. Porém não houve propagação de trinca, uma vez que as condições dos testes são semelhantes. O divergente não apresenta regiões de desgaste mantendo a geometria inicial.

As maiores leituras de temperatura ocorreram com os bocais B2 e B2a, o que caracteriza uma maior condutividade térmica em relação aos demais bocais de carbono-carbono. Uma vez que, o tempo de queima do teste realizado com o Bocal B2 foi de apenas 7,4 segundos.

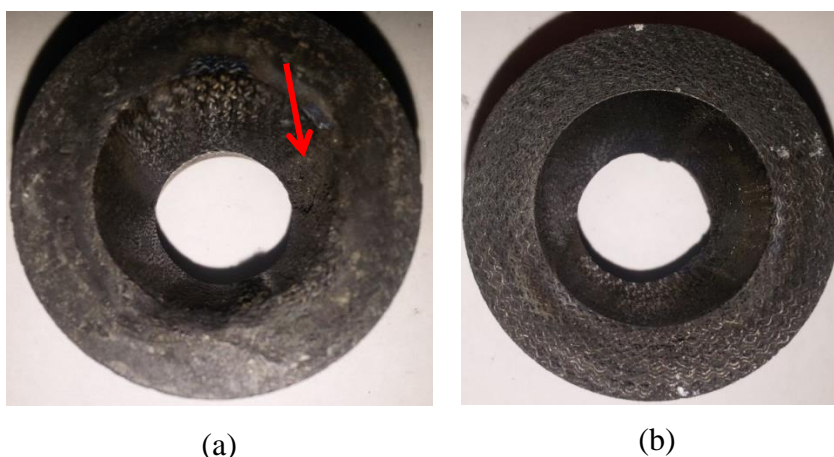


Figura 4-13 – Foto da seção convergente (a) e divergente (b) do bocal B2.

4.3.3 Bocal B2a

Foram testadas duas tubeiras B2a, que classificaremos como B2a-1 e B2a-2. Estes bocais apresentaram os melhores resultados, com uma região de desgaste comparativamente menor do que os demais. Lembrando que os bocais B2a possuem revestimento de SiC.

A tubeira B2a-1 (ver Figura 4-14) apresenta pequenas regiões de desgaste na seção convergente com a geometria da garganta praticamente inalterada. Porém, a B2a-2 (ver Figura 4-15) teve perdas consideráveis de material na seção convergente, com grande acúmulo de parafina e metal fundido do flange. O impacto direto das partículas de metal, causou grandes erosões, modificando a geometria do convergente.

O divergente de ambas as tubeiras não sofreram grandes variações, preservando a geometria inicial.



Figura 4-14 – Fotos do convergente (esquerda) e divergente (direita) da tubeira B2a-1.

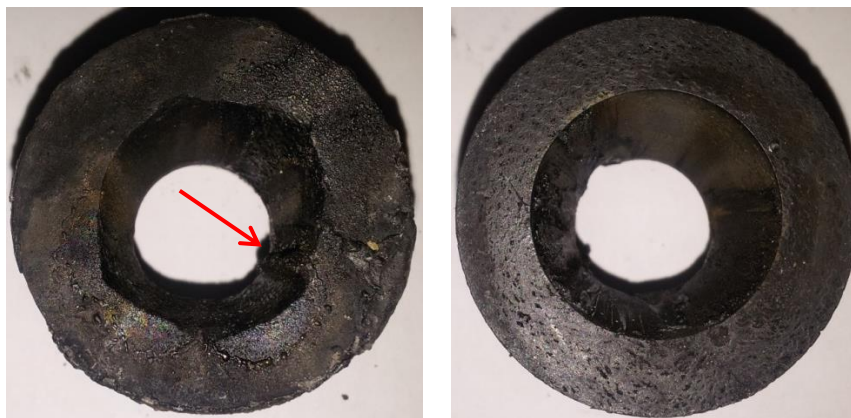


Figura 4-15 – Fotos do convergente (esquerda) e divergente (direita) da tubeira B2a-2.

4.3.4 Bocal B3

Foram testados dois bocais com a configuração B3, classificados como B3-1 e B3-2. O bocal B3-2 apresentou o maior desgaste dentre todos os bocais de carbono-carbono e grafite. Observamos nas Figuras 4-16, 4-17 e 4-18 que a tubeira possui uma trinca iniciada na seção de entrada do convergente até aproximadamente a metade do divergente.

Da mesma forma que ocorreu com o Bocal B1-2, a trinca propagou-se passando pelo ponto de contato do termopar T2, fazendo com que o gráfico de temperatura apresentasse uma curva anormal, com uma região de temperatura constante em torno de 824,54°C.

O bocal B3-1 (ver Figura 4-19) também apresenta uma pequena trinca no início do convergente, porém de menor dimensão comparada com a do B3-2. Uma pequena região de desgaste causada pelo jateamento de partículas do flange é observada. O divergente não apresenta variações na geometria.



Figura 4-16 – Tuberias B3-2(esquerda) e B3-1(direita), foto do convergente.



Figura 4-17 – Convergente (esquerda) e divergente (direita) da tubeira B3-2.



Figura 4-18 – Vista lateral da tubeira B3-2.



Figura 4-19 – Convergente (esquerda) e divergente (direita) da tubeira B3-1.

4.3.5 Bocal B3a

Apenas um bocal B3a foi fabricado e utilizado em dois testes consecutivos, cada um com aproximadamente 10 segundos de queima. Nas fotos da Figura 4-20, nota-se que não houve grandes perdas de material, apenas uma pequena trinca foi iniciada na entrada do convergente. O divergente e a garganta não apresentam pontos de desgaste.

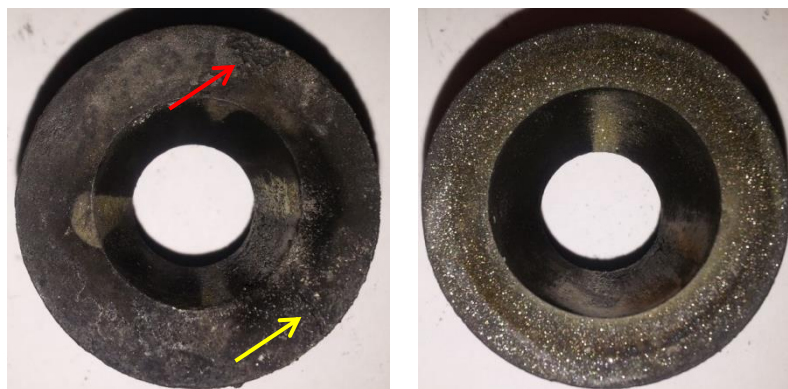


Figura 4-20 – Foto do convergente (esquerda) e divergente (direita) do bocal B3a.

4.3.6 Bocal B4 (CuCr sem revestimento)

A tubeira B4 (ver Figura 4-21) foi fabricada com a liga de cobre UNS18200 e não possui revestimento para proteção térmica. Foram realizados dois testes para a coleta de dados e posterior análise.



Figura 4-21 – Bocal B4 antes da realização dos testes.

No primeiro teste o tempo de queima foi de aproximadamente 8 segundos, atingindo uma variação de temperatura de 421,29 e 487,70°C após o teste nos termopares $\Delta T1$ e $\Delta T2$ respectivamente. Analisando a foto da Figura 4-22 não é possível notar regiões de desgaste, apesar do jateamento de materiais do flange. O substrato de cobre é mais denso do que os de carbono-carbono e grafite, suportando melhor a ablação mecânica pelo jateamento de partículas.

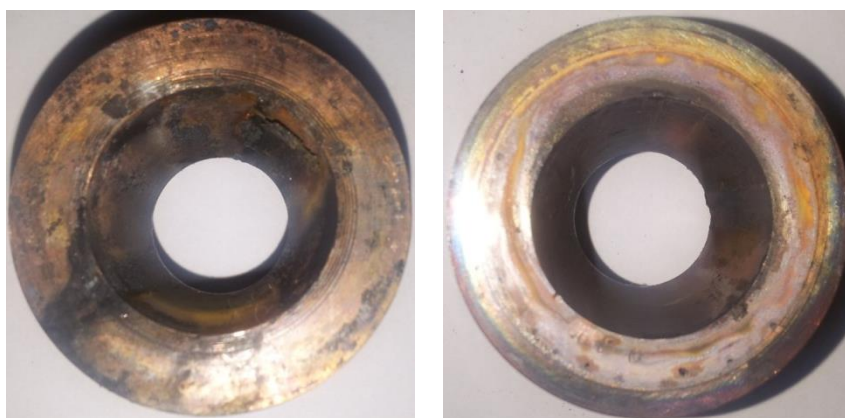


Figura 4-22- Fotos do convergente (esquerda) e do divergente (direita) após o primeiro teste com o bocal B4.

O segundo ensaio foi realizado até a falha do material, este momento é determinado pela mudança da coloração da chama para um tom esverdeado, após 13 segundos de teste, quando ocorre o início da fusão do material do substrato. Podemos observar na Figura 4-23, indicada pelas setas em vermelho, a região de fusão do material.



Figura 4-23 – Bocal B4 após o segundo teste de 13 segundos mostrando a região de fusão do material no convergente (esquerda) e divergente (direita).

4.3.7 Bocal B4a (CuCr com revestimento)

Três bocais de CuCr com revestimento foram testados. Para diferenciação foram nomeados como B4a-1, B4a-2 e B4a-3.

Com o B4a-1 realizou-se um testes de 10,4 segundos alcançando uma variação de temperatura $\Delta T_1 = 352,31^\circ\text{C}$ e $\Delta T_2 = 372,90^\circ\text{C}$. Nota-se que a temperatura alcançada aqui é inferior a variação de temperatura do bocal B4 ($\Delta T_1 = 421,29^\circ\text{C}$ e $\Delta T_2 = 487,70^\circ\text{C}$) durante o primeiro teste com 8 segundos

Após o teste (ver Figura 4-24) ocorreu um grande acúmulo de material fundido do flange tanto no convergente e divergente do bocal, e o revestimento apresentou pequenos pontos de desgastes na seção da garganta, como pode ser visto na Figura 4-25.



Figura 4-24- Fotos do convergente (esquerda) e divergente (direita) do bocal B4a-1 após o primeiro teste.



Figura 4-25- Fotos do bocal B4a-1 mostrando o desgaste na garganta vista pelo convergente (esquerda) e o acúmulo de material no divergente (direita).

O bocal B4a-2 foi utilizado no teste 13 com tempo de queima de 15,9 segundos. Apesar do tempo maior de queima, o bocal apresentou somente algumas regiões de desgaste no revestimento, localizados na região da garganta (ver Figura 4-26) e na entrada do convergente.

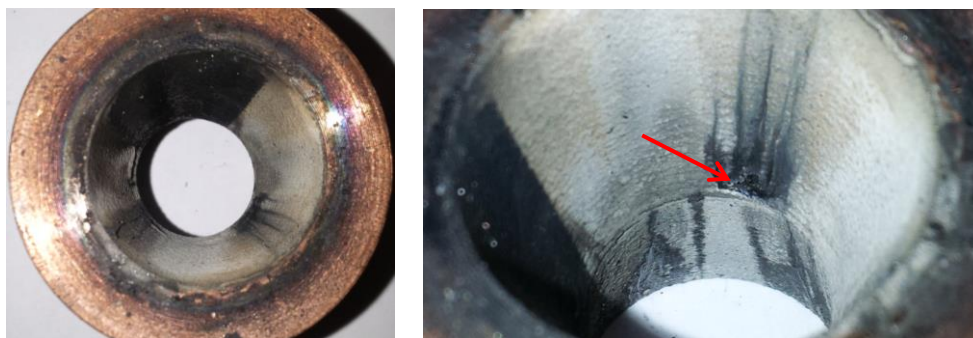


Figura 4-26- Foto do divergente (esquerda) e do ponto de desgaste na região garganta (direita).

A perda de material ocorrida na seção convergente pode ser associada a uma baixa adesão do revestimento ao substrato. Notamos na Figura 4-27, que a região de perda do material, deixou o substrato completamente exposto, diferente de outros pontos de desgaste que ocorreram uma erosão superficial do revestimento.

Comparando com o resultado obtido com o bocal B4, notamos que a função do revestimento (proteção térmica do substrato metálico) foi alcançada, uma vez que, o tempo de queima foi superior ao bocal sem revestimento, e a geometria inicial do bocal B4a-2 foi mantida sem grandes falhas.

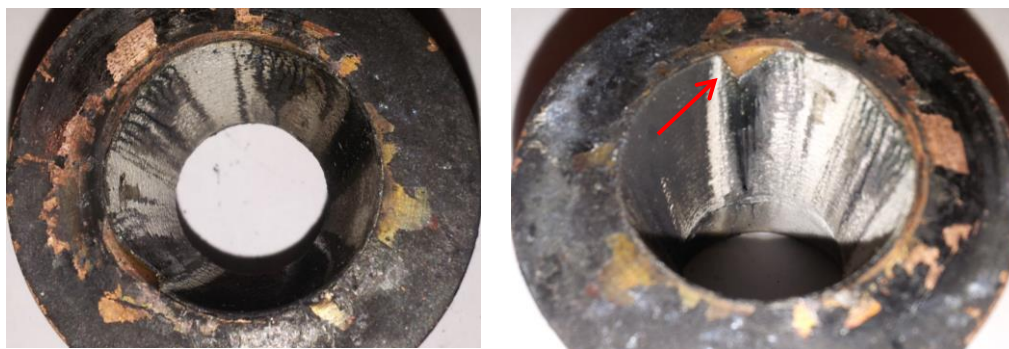


Figura 4-27- Fotos do convergente do bocal destacando o ponto de perda de material do revestimento.

O teste 14 utiliza o bocal B4a-3, com tempo de queima de 10 segundos. A perda de material do revestimento foi mínima, restrita à uma pequena seção na garganta que apresenta pontos de desgaste que podem ser observados na Figura 4-28.



Figura 4-28- Foto da seção convergente (esquerda) e dos pontos de desgastes do revestimento (direita).

4.3.8 Comparação dos desgastes observados

Os desgastes apresentados pelos bocais após os testes são dispostos na Tabela 4-5 juntamente com o tempo de queima. Os bocais de carbono-carbono e grafite, apesar de apresentarem excelentes propriedades termofísicas, tais como baixa densidade e elevada dureza, são severamente desgastados pelo ambiente hostil gerado pelos gases da combustão. Durante a operação do motor, a temperatura do material aumenta rapidamente, devido a severa transferência de calor dos gases da combustão para a superfície da tubeira. Reações químicas heterogêneas ocorrem entre o material do bocal e algumas espécies

oxidantes como H₂O, OH e CO₂ nos gases da combustão, fazendo com que ocorra a erosão química da superfície do bocal (Thakre e Yang, 2008). Aliado a isso, o impacto de partículas provenientes da fusão do flange em alguns testes, aumentou o desgaste dos bocais.

Tabela 4-5 – Descrição do desgaste em função do tipo de bocal e tempo de queima.

Bocal	Tipo de desgaste após o ensaio	Tempo de queima (seg)
B1-1	- pequena área de erosão no convergente; - trinca na seção longitudinal.	10,5
B1-2	- erosão profunda no convergente; - trinca na seção longitudinal passando pelo ponto de contato do termopar 2.	15,5
B2	- grande área de erosão no convergente; - não apresentou trincas.	7,4
B2a-1	- pequena área erosão no convergente; - não apresentou trincas.	10,7
B2a-2	- grande área de erosão no convergente; - acúmulo de material fundido no convergente e divergente; - não apresentou trincas.	9,5
B3-1	- pequenas áreas de erosão; - pequena trinca na entrada do convergente;	5,2
B3-2	- grande trinca longitudinal passando pelo ponto de contato do termopar 1; - acúmulo de material no convergente.	10,1
B3a	- pequena área de erosão; - pequena trinca na entrada do convergente (pouco visível).	1° teste: 10,6
		2° teste: 10,4
B4	1° teste: - não apresentou desgaste.	8,4
	2° teste: - fusão do substrato.	13,1
B4a-1	- perda de material do revestimento na região da garganta; - acúmulo de material fundido do flange no convergente e divergente.	10,4
B4a-2	- perda de material do revestimento na região da garganta e na entrada do convergente;	15,9
B4a-3	- perda de material do revestimento na região da garganta.	10

O bocal B3-2 sofreu o maior desgaste dentre os bocais de carbono-carbono, onde uma trinca iniciada na entrada do convergente sofreu um grande aumento pela passagem do gás da combustão, propagando por toda a seção longitudinal. O Bocal B3-1 apresenta o início de uma trinca semelhante, porém o tempo de queima não foi suficiente para o aumento da trinca como ocorreu com o bocal B3-2. Mas ao contrário dos bocais B3 sem revestimento, o bocal B3a, também fabricado com a fibra UralT22 e feltro, não apresentou grandes áreas de desgaste mesmo após dois ensaios de aproximadamente 10 segundos.

Essa diferença de resultados pode ser creditada a presença de revestimento de SiC no bocal B3a, fazendo com que o mesmo tenha uma resistência maior a oxidação, evitando o desgastes do bocal.

Bocais fabricados com fibra UralT22 sem feltro obtiveram bons resultados, pois o bocal B2 (sem revestimento de SiC) não sofreu grandes danos com o tempo de teste de 7,4 segundos. Da mesma forma, o bocal B2a-1 manteve praticamente intacta a sua geometria indicando que o desgaste excessivo do bocal B2a-2 tem como causa o impacto de partículas fundidas do flange. Nenhuma trinca foi observada nestes bocais, indicando que esta configuração da fibra de carbono é melhor do que a utilizada nos bocais B3.

O revestimento de YSZ nos bocais fabricados com liga de CuCr obteve êxito como barreira de proteção térmica, uma vez que, os bocais B4a apresentaram as menores variações de temperaturas. O desgaste observado nos bocais com revestimento possuem aspectos semelhantes, ocorrendo despreendimento da camada de revestimento na seção da garganta. Isso ocorre, devido a redução de área nesse local com conseqüente aumento da transferência de calor criando uma região de elevada temperatura e aumento da velocidade do escoamento fazendo com que a falha ocorra nessa seção.

Outro ponto importante a destacar é a fusão do bocal B4 (sem revestimento) num tempo de queima de 13 segundos, onde com um tempo maior de queima (15,9 segundos) o bocal B4a-2 teve apenas pequenos pontos de perda do material do revestimento, porém sem fusão do substrato metálico.

Os bocais de grafite apresentaram trincas por toda a seção longitudinal, evidenciando que a resistência a choques térmicos ficou baixa nesta configuração. A proteção de SiC não foi eficaz na proteção contra a oxidação, pois a penetração do revestimento no substrato foi baixa devido a baixa porosidade da estrutura de grafite, o que causou desgaste do material na seção convergente.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A substituição do oxidante de projeto da bancada (óxido nitroso – N_2O) por oxigênio, devido ao alto custo da recarga de N_2O , resultou em uma chama bem mais agressiva (rica em oxigênio) acarretando na fusão do flange nº2, fazendo com que o material fundido impactasse sobre o bocal causando regiões de desgaste. Isto ocorreu principalmente nos bocais B3 e B3a de carbono-carbono. Além disso, os parafusos de fixação da câmara de Celeron ficaram expostos aos gases de combustão na parte interna do motor. A solução encontrada para proteger tanto o flange como os parafusos de fixação da câmara de Celeron, foi utilizar um enxerto cilíndrico de Celeron no final do grão, de modo a criar uma barreira de proteção evitando que os gases incidissem diretamente no flange.

Outro problema encontrado foi o controle manual das válvulas que impediu a realização de testes com tempos iguais de queima, bem como da pressão de oxidante na câmara de combustão. Esta impossibilidade de controle resultou em testes com tempos e pressões variadas.

Apesar dos problemas na configuração da bancada, os testes possibilitaram uma análise comparativa dos bocais. O objetivo principal, foi verificar o desempenho dos bocais de CuCr com revestimento de zircônia estabilizada com ítria. E uma vez que, o estado-da-arte em motores a propelente sólido é o uso de bocais de carbono-carbono e grafite, estes também foram testados.

Bocais de grafite foram testados, uma vez que estes são bastante utilizados em motores a propulsão sólida, tornam-se alternativas relativamente mais baratas do que bocais de carbono-carbono. Entretanto, nos testes realizados, verificou-se que as tubeiras de grafite apresentaram propagação de trincas em todos os bocais ensaiados devido a carga térmica imposta pela combustão dos propelentes. E a baixa penetração do revestimento de SiC foi observado, devido a baixa porosidade do grafite ficando suscetível a oxidação.

Os testes com os bocais de carbono-carbono mostraram que a configuração dos bocais B2 e B2a apresentaram bons resultados, com pequena área de desgastes e ausência de trincas. O que não ocorreu com os bocais B3 (sem revestimento) que apresentaram trincas em todos os bocais, com destaque para o bocal B3-2 que sofreu o maior desgaste dentre todos os bocais de carbono-carbono testados. A presença do feltro na estrutura dos bocais B3 pode ter aumentado a porosidade do material final, facilitando a reação química entre o material do bocal e espécies oxidantes do gás de combustão. Porém essa porosidade

auxiliou a penetração do revestimento de SiC no bocal B3a, criando uma camada de revestimento mais eficiente do que os demais bocais. Por isso os resultados deste bocal, apesar de utilizado em 2 testes, não apresentou grandes áreas de desgaste. Conclui-se que o bocal B3a, por ter uma maior penetração do revestimento, é a melhor configuração a ser utilizada.

Os resultados com os bocais de CuCr foram surpreendentes, uma vez que o material do substrato apresenta um ponto de fusão em torno de 1080°C, temperatura essa que está abaixo da temperatura dos gases de combustão, em torno de 2000°C (na configuração utilizada). Através da análise dos gráficos de temperatura, pode-se observar que a barreira de zircônia estabilizada com ítria teve sua função alcançada, mantendo a variação da temperatura dos bocais revestidos, abaixo dos bocais de carbono-carbono, grafite e de CuCr sem revestimento. A boa adesão do revestimento ao substrato foi observada pela baixa perda de material, ocorrendo pequenas áreas de desprendimento na seção da garganta. Além disso, a comparação entre os testes 11 e 13 mostraram que o bocal B4 alcança o ponto de fusão em 13 segundos de teste, mas o bocal B4a-2 em 15,9 segundos não apresentou falha do substrato, desta forma fica evidente a eficiência do revestimento permitindo estudos futuros com essa configuração.

Comparando os resultados dos bocais de carbono-carbono e CuCr, pode-se concluir que apesar da maior densidade dos bocais B4a, o revestimento cerâmico permite que tais bocais suportem a carga térmica imposta pela combustão dos propelentes do motor, tornando-se uma alternativa barata e de fácil fabricação em relação aos bocais de carbono-carbono.

Com a experiência adquirida na realização dos testes com a bancada do motor foguete híbrido e, mediante os resultados obtidos com os bocais de cobre-cromo, uma nova configuração de bancada foi realizada por alunos da Faculdade do Gama sob a orientação do professor Manuel Barcelos.

Os problemas encontrados na disposição dos parafusos de fixação do grão combustível (15 parafusos), causando uma enorme perda de tempo na montagem da bancada, foi solucionado com um motor mais compacto e com menor número de parafusos. A posição do flange de fixação do bocal foi alterado, evitando que o mesmo sofra desgaste devido a fusão do material durante o funcionamento do motor. A balança de empuxo é substituída por um sistema de trilhos possibilitando um livre acesso ao motor e maior facilidade no aperto das conexões. A troca de bocais é facilidade pelo arranjo simplificado do sistema de fixação do bocal, o que possibilita o ensaio de diferentes bocais com geometrias e

materiais variados podendo atingir até 3500 N de empuxo. Um desenho esquemático da nova bancada é apresentado na Figura 5-1.

Com esta nova configuração será possível realizar testes com bocais de CuCr revestidos com zircônia juntamente com um sistema de refrigeração regenerativa com óxido nitroso. Esta proposta baseia-se em estudos preliminares dentro da UnB e por Lemieux (2010) em seu trabalho que propõem a utilização de óxido nitroso como fluido refrigerante em sistema regenerativo.

A ideia é utilizar o oxidante para circular o bocal e assim absorver parte do calor do substrato, mantendo-o a uma temperatura abaixo do ponto de fusão. Assim, teríamos uma proteção térmica associada a um sistema regenerativo, o que resultaria em tempos maiores de queima sem acarretar na falha do bocal.

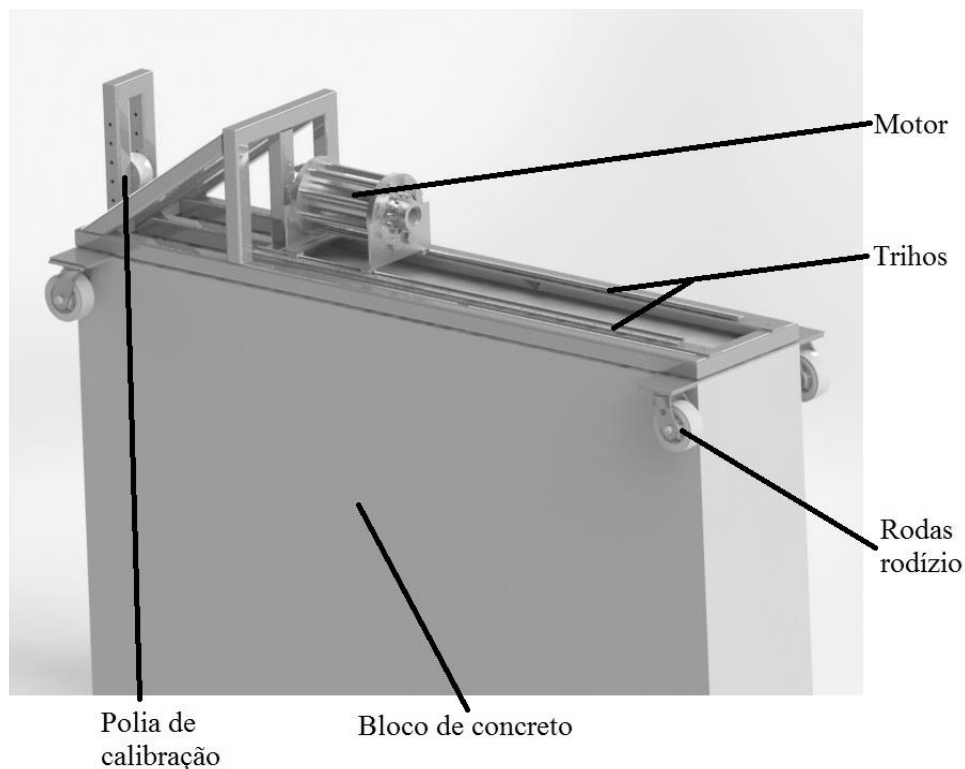


Figura 5-1 – Desenho esquemático da nova configuração da bancada de testes de motor foguete híbrido da Faculdade do Gama.

Inicialmente o oxidante não entrará novamente na câmara de combustão após passar pelo tubeira, isso porque é necessário primeiramente, controlar a vazão de oxidante de acordo com o fluxo de calor, para em seguida fazer o processo completo com a regeneração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alhama, F., Campo, A., 2003, “Network simulation of the rapid temperature changes in the composite nozzle wall of an experimental rocket engine during a ground firing test”, *Applied Thermal Engineering* 23, pp. 37-47
- Almeida, D.S., 2005, “Estudo de revestimentos cerâmicos sobre substrato metálico, obtidos por deposição física de vapores por feixe de elétrons para aplicação como barreira térmica”, Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores), INPE, São José dos Campos, 175 p.
- Amava, C., Aperador, W., Caicedo, J.C., Espinoza-Beltrán, F.J., Muñoz-Saldaña, J., Zambrano, G., 2009, “Corrosion study of Alumina/Yttria-Stabilized Zirconia ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YSZ}$) nanostructured Thermal Barrier Coatings (TBC) exposed to high temperature treatment”, *Corrosion Science* 51, pp. 2994-2999.
- Babiak, Z., Wenz, T., Engl, L., 2006, “Fundamentals of thermal spraying, flame and arc spraying”, *Modern surface technology*, WILEY-VCH, Weinheim, Germany, pp. 119-136.
- Beele, W., Marijnissen, G., van Lieshout, A., 1999, “The evolution of thermal barrier coatings – status and upcoming solutions for today’s key issues”, *Surface and Coatings Technology*, 120-121, pp. 61-67.
- Bertoldo Jr., J., 2011, “Estudo sobre corpos-de-prova da liga de cobre UNS18200 revestidos pelo processo de aspersão térmica a plasma”, Dissertação de mestrado, ITA, São José dos Campos, SP-Brasil.
- Bhatia, A., 1999, “Thermal spraying technology and applications”, Department of the army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington
- Bianchi, D., Nasuti, F., Onofri, M., Martelli, E., 2011, “Thermochemical erosion analysis for grafite/carbono-carbon rocket nozzles”, *Journal of propulsion and power*, vol. 27, No.1.
- Brady, G. S., Clauser, H. R., Vaccari, John A., 2004, “Materials handbook”, McGraw-Hill, 15th Edition.

- Callister, W.D., 2007, "Materials science and engineering: an introduction", 7th ed. 975 p.
- Cantwell, J. B., 2007, "AA283 - Aircraft and rocket propulsion", Course reader, Department of aeronautics and astronautics, Stanford University, Stanford California 94305. Disponível em: <http://www.stanford.edu/~cantwell/AA283_Course_Material/AA283_Course_Notes> . Acesso em 02/03/2013.
- Cao, X.Q., Vassen, R., Stoever, D., 2004, "Ceramic materials for thermal barrier coatings", Journal of the European Ceramic Society 24, pp. 1-10.
- Chakrabarli, D. J., Laughlin, D. E., 1984, "The Cr-Cu (Chromium-Copper) System", Bulletin of Alloy phase diagrams, Vol. 5 No.1 .
- Chelaru, T. V., Mingireanu, F., 2011, "Hybrid rocket engine, theoretical model and experiment" Acta Astronautica 68, 1891-1902
- Chiaverini, V., 1986, "Tecnologia mecânica – Estrutura e propriedades das ligas metálicas", Editora McGraw-Hill, v.1, 2.ed.
- Çengel, Y. A., 2002, "Heat transfer: a practical approach", McGraw-Hill, 2nded.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A., 2006, "Thermodynamics: An engineering approach", 5th edition, McGraw-Hill.
- Hass, D.D., 2000, "Directed Vapor Deposition of Thermal Barrier Coatings", Ph.D. Dissertation, University of Virginia, 256 p.
- Haidn, J. O., 2008, "Advanced rocket engines" In advances on propulsion technology for high-speed aircraft (pp. 6-1 - 6-40). Educational notes RTO-EN-AVT-150, paper 6. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. Disponível e :<<http://www.rto.nato.int>>. Acesso em 02/03/2013.
- Heimann, R. B., 1996, "Plasma-spray coating: Principles and applications", VCH, Weinheim, Germany,.
- Howell, J. R., Strite, M. K., Renkel, H. E., 1965, "Analysis of heat-transfer effects in rocket nozzles operating with very high-temperature hydrogen", NASA technical report, TR R-220.

- Humble, R. W., Henry, G. N., Larson, W. J., 1995, "Space Propulsion Analysis And Design", MacGraw-Hill Companies, Inc. Primis Custom Publishing.
- ISMAN, n.d. ISMAN. [Online] Available at: <http://www.ism.ac.ru/handbook/shsf.htm>, [Accessed 22 02 2012].
- Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergam, T. L., Lavine, A. S., 2007, "Fundamentals of heat and mass transfer", 6th ed.
- Karabeyoglu, A.; Ziliac, G.; Cantwell, B.J.; Dezilwa, S.; Castellucci, P., 2003, "Scale-up Tests of High Regression Rate Liquefying Hybrid Rocket Fuels". American Institute of Aeronautics and Astronautics. In: Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Nevada, USA
- Kirk-Othmer, 2003, "Encyclopedia of Chemical Technology", 3rd ed., Vol. 4, pp. 596–622.
- Leckie, R. M., Krämer, S., Rühle, M., Levi, C. G., 2005, "Thermochemical compatibility between alumina and ZrO_2 - $GdO_{3/2}$ thermal barrier coatings", Submitted to Acta Materialia, January 2005.
- Lemieux, P., 2010, "Nitrous oxide cooling in hybrid rocket nozzles", Progress in aerospace sciences 46, pp. 106-115
- Mattingly, Jack D., von Ohain, Hans, 2006, "Elements of propulsion: Gas Turbines and Rockets", American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2^a ed.
- Mironov, B. P., 1966, "Calculation of heat transfer in nozzles", Journal of applied mechanics and technical physics, Vol. 7, No. 4, pp. 116-120.
- Manocha, L. M., 2003, "High performance carbon-carbon composites", Sadhana, vol. 28, parts 1&2, pp. 349-358.
- Maricocchi, A., Bartz, A., Wortman, D., 1995, "Thermal Barrier Coating Workshop", NASA Conference Publication 3312, 79.
- Nise, N. S., 2004, "Control systems engineering", 4^a ed., John Willey & Sons, United States of America, 969p.

- Nicholls, J.R., Lawson, K.J., Johnstone, A., Rickerby, D.S., 2002, "Methods to reduce the thermal conductivity of EB-PVD TBCs", *Surface and Coatings Technology* 151-152, pp. 383-391.
- Ogata, Katsuhiko, 2002, "Modern control engineering", 4^a ed., Prentice Hall, New Jersey, 963p.
- O'Leary, R. A., Beck, J. E., 1992, "Nozzle design", *Threshold – Pratt & Whitney rocketdyne's engineering journal of powder technology*. Disponível em: <<http://www.pwengineering.com/articles/nozzledesign.htm>>. Acesso em: 01/05/2013
- Ponomarenko, A., 2012, "Thermal analysis of thrust chambers", *RPA:Tool for rocket propulsion analysis*.
- Polyaev, V.M., Burkaltsev, V.A, 2002, "Liquid propellant rocket engines", *Thermal to mechanical energy conversion: Engines and requirements – Vol.II*, Department of rocket engines, Bauman Moscow State Technical university, Russia.
- <http://www.plastecno.com.br/produtos.phd?categoria=12>
Acesso em: 07/04/2013.
- Rogachev, A. & Baras, F., 2007, "Models of SHS: An Overview. *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*", Volume 16, pp. 141-153.
- Strong, A. B., 2008, "Fundamentals of composites manufacturing: Materials, methods, and applications", 2ed
- Schloesser, J., Fedorova, T., Bäker, M. and Rösler, J., 2010, "Thermal Barrier Coatings on Copper Substrates for Rocket Applications", *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol.4, N° 2, pp.189-195.
- Schneider, H., Schreuer, J., Hildmann, B., 2007, "Structure and properties of mullite – A review", *Journal of the European Ceramic Society* 28, pp. 329-344.
- Schulz, U., Fritscher, K., Peters, M., 1996, "EB-PVD Y₂O₃ and CeO₂/Y₂O₃ stabilized zirconia thermal barrier coating – crystal habit and phase composition", *Surface and Coatings Technology* 82, pp. 259-269.

- Smallman, R.E., Ngan, A.H.W, 2007, "Physical Metallurgy and Advanced Materials", Ed. HB, 7th ed. 673 p.
- Sutton, G. P., Biblarz, O., 2001, "Rocket propulsion elements: an introduction to the engineering of rockets", 7thed
- Turner, M. J. L., 2009, "Rocket and spacecraft propulsion – principles, practice and new developments", Spring Praxis books, 3 ed.
- Thakre, P., Yang, V., 2008, "Chemical erosion of carbon-carbon/graphite nozzles in solid propellant rocket motors", Journal of propulsion and power, vol.24, No. 4.
- TST, 2011, "Thermal Barrier Coatings (TBC)", Thermal Spray Technologies, INC. 17 Jul. 2011<<http://www.tstcoatings.com>>.
- Vidyavathy, S. M., Kamaraj, V., 2009, "Microwave sintering of niobium co-doped yttria stabilized zirconia", Modern applied science, vol.3, No 6, pp. 102-105
- Xiaoying Z., 2011, "Coupled simulation of heat transfer and temperature of the composite rocket nozzle wall", Aerospace Science and Technology, Vol. 15, pp. 402-408.
- Xie, X., Guo, H., Gong, S., Xu, H., 2011, "Lanthanum-titanium-aluminum oxide: A novel thermal barrier coating material for applications at 1300 °C", Journal of the European Ceramic Society 31, pp. 1677-1683
- Wright, P.K., Evans, A.G., 1999, "Mechanisms governing the performance of thermal barrier coatings", Current Opinion in Solid State and Materials Science 4, pp. 255-265.
- Zimmermann, H., Höhle, H. M, 2006, "Development of an economical high-performance plasma spray system for highest-quality demands even under challenging production conditions", Modern Surface Technology, pp.159-178

ANEXOS

ANEXO A – Gráficos com a curva de temperatura registrada pelos termopares 1 e 2 juntamente com a curva de pressão na câmara.

Nos gráficos II, IV, V, VI, VII, VIII e IX utilizar a equação $T_2 = 1,3464 \times T - 12,441$ para corrigir a leitura (T) de temperatura do termopar 2.

Gráfico I - Teste com bocal B1-1.

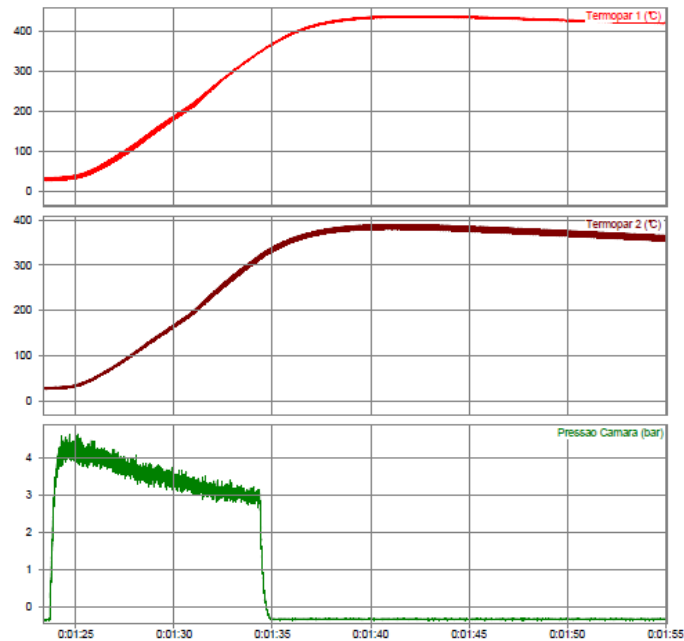


Gráfico II – Teste com o bocal B1-2.

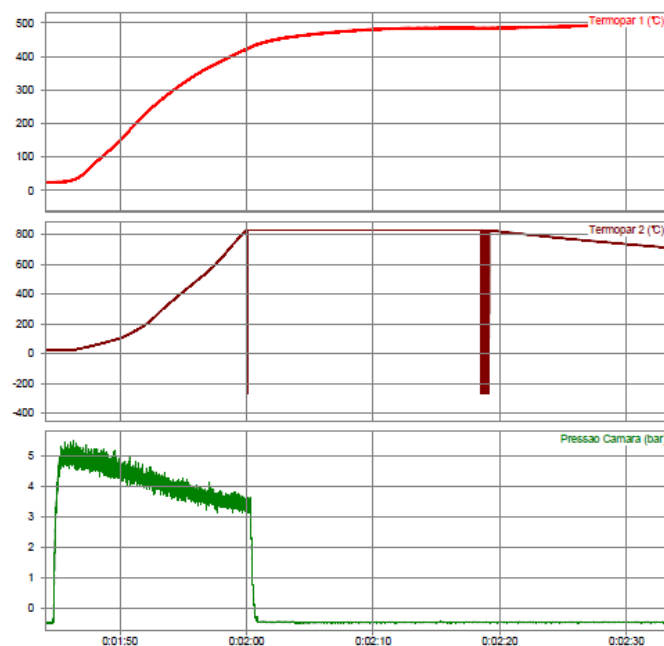


Gráfico III – Teste com o bocal B2.

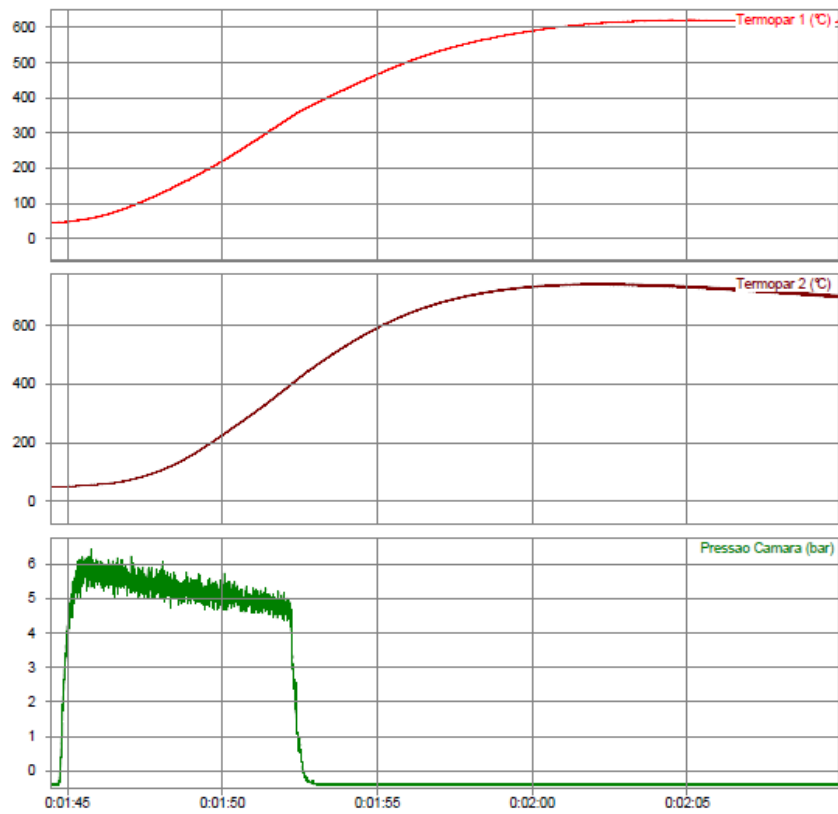


Gráfico IV – Teste com o bocal B2a-1

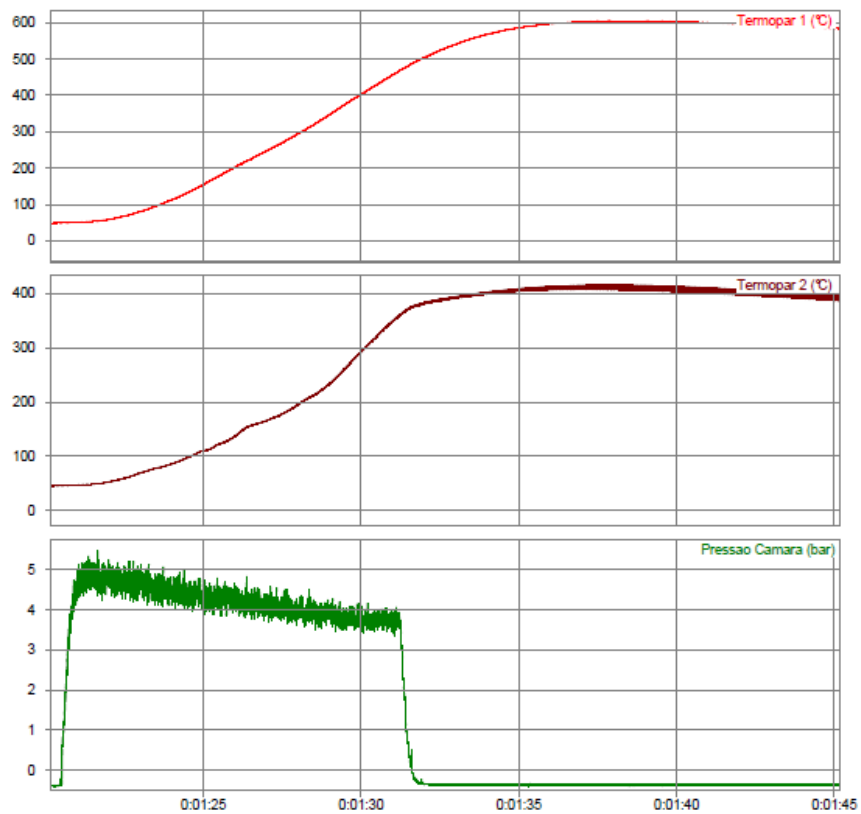


Gráfico V – Teste com o bocal B2a-2.

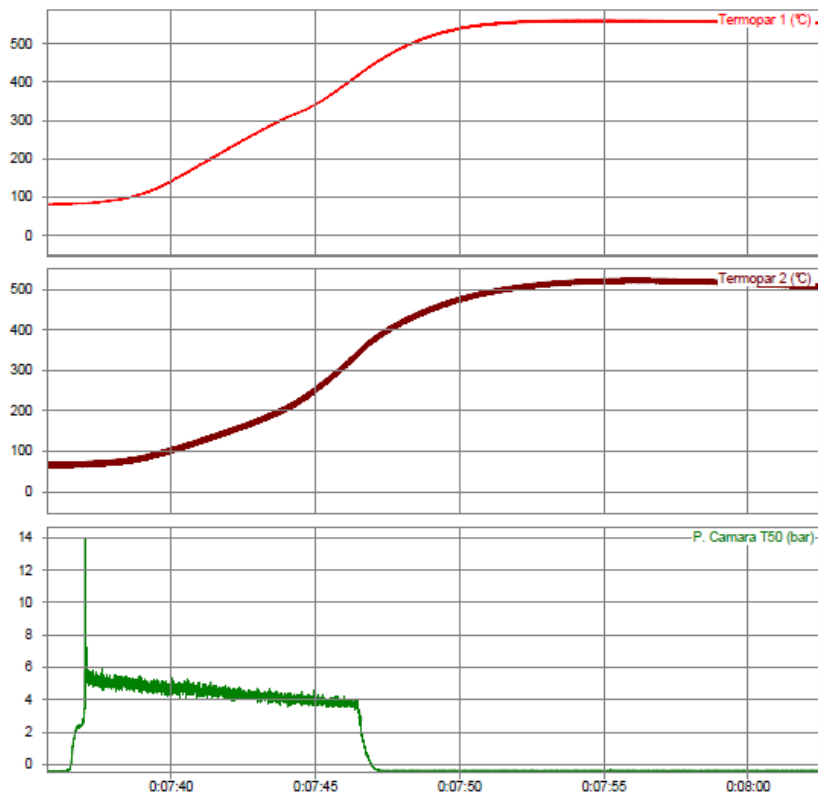


Gráfico VI – Teste com o bocal B3-1.

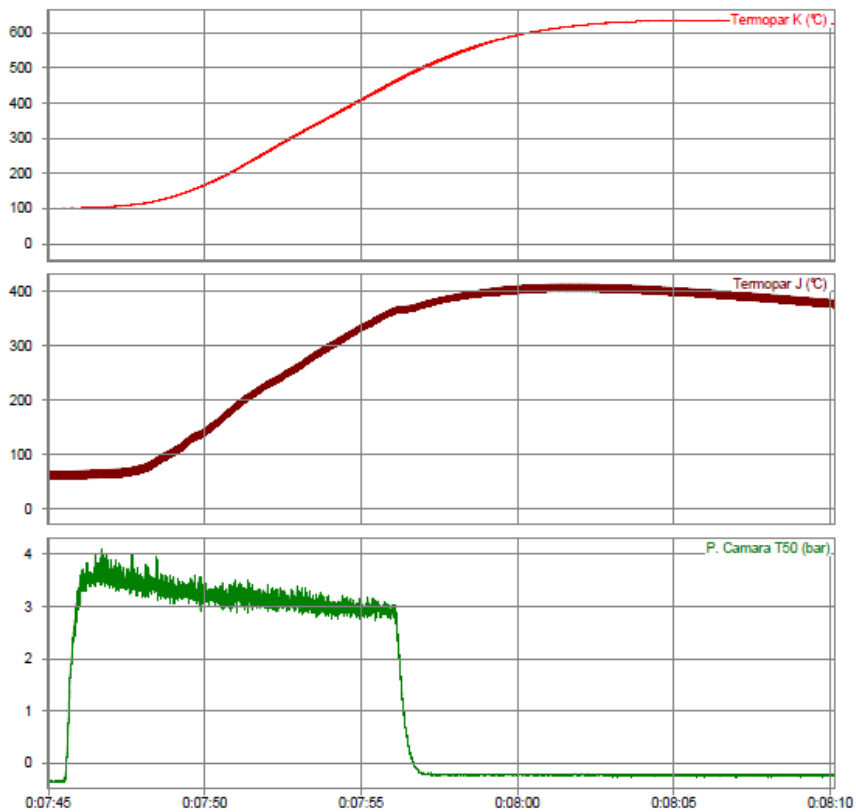


Gráfico VII – Teste com o bocal B3-2.

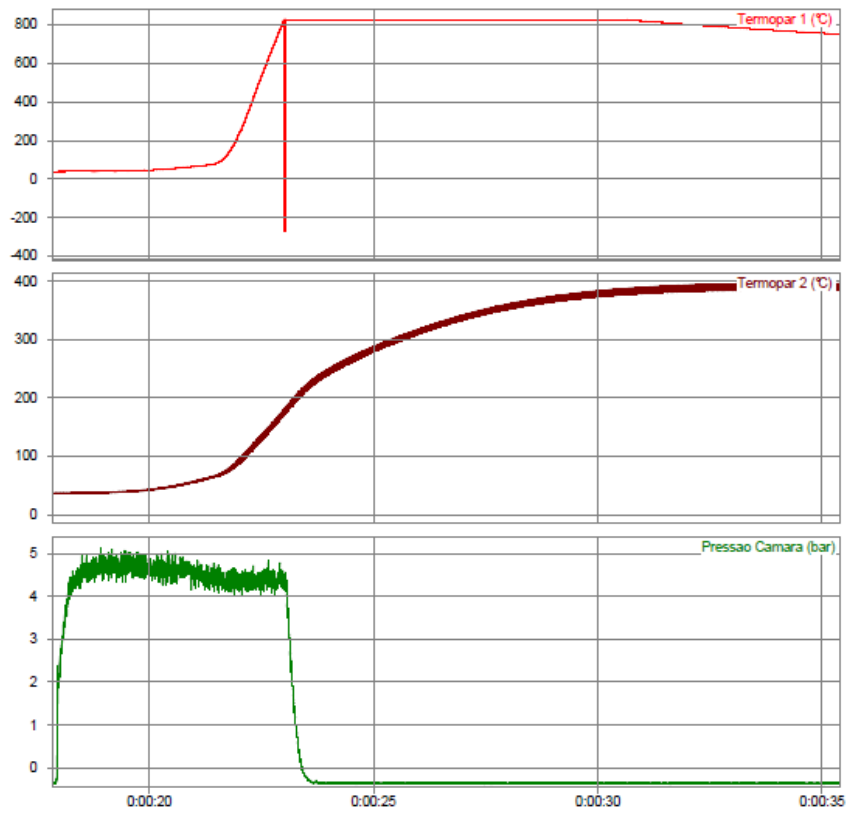


Gráfico VIII – Teste com o bocal B3a.

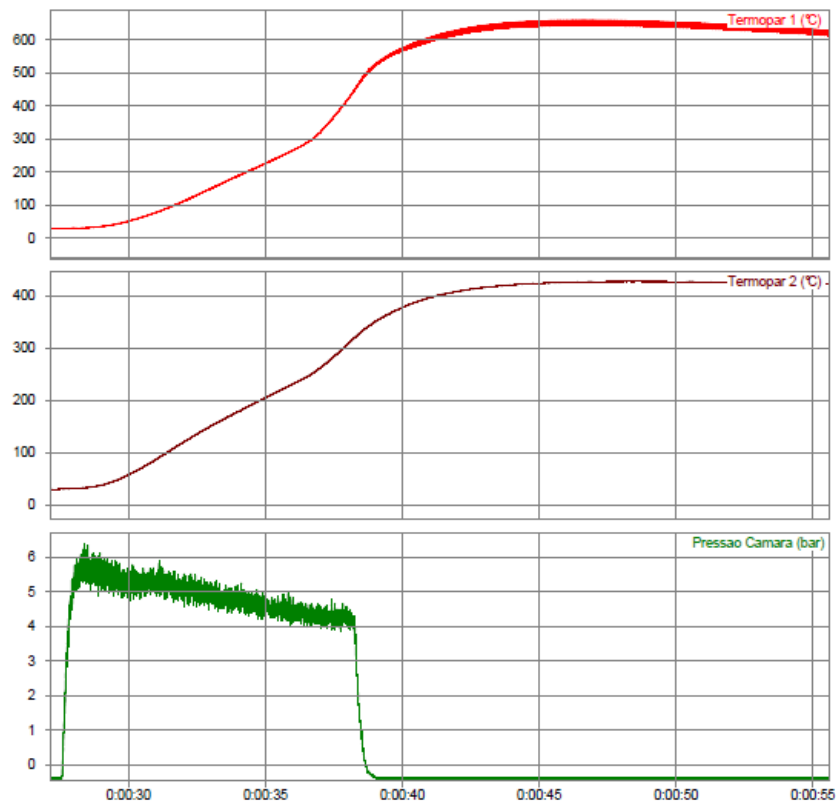


Gráfico IX – Teste com o bocal B3a.

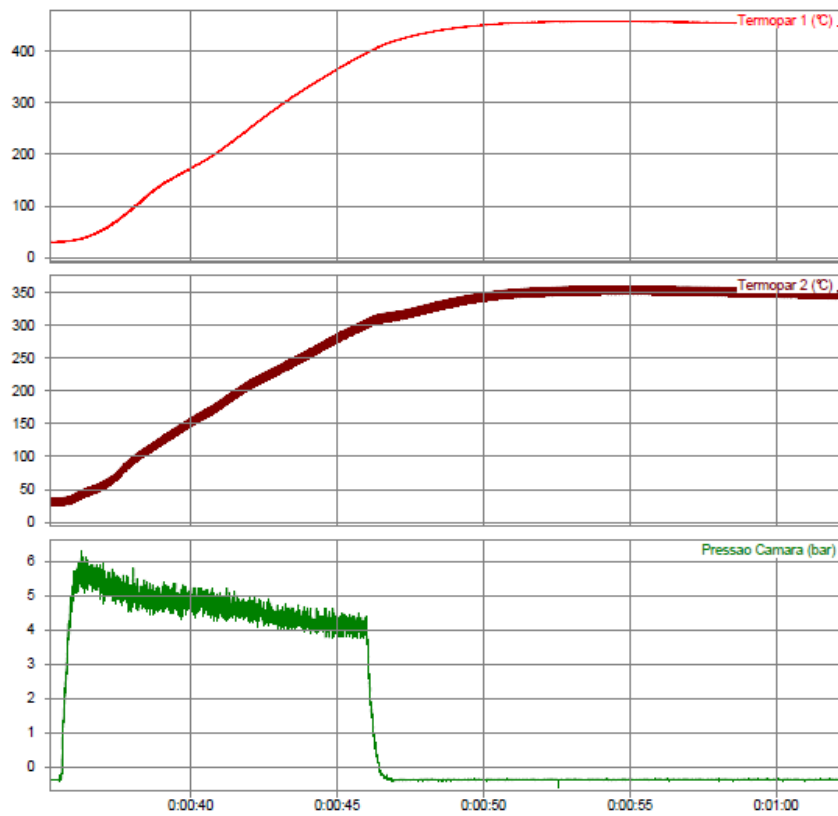


Gráfico X – Teste com o bocal B4.

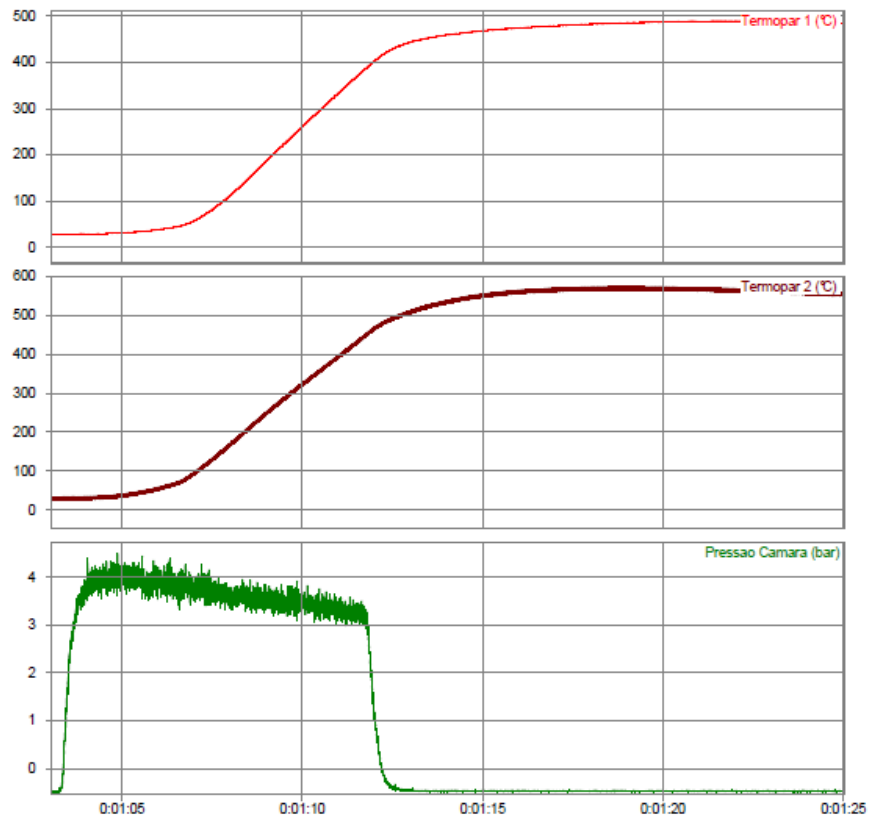


Gráfico XI – Teste com o bocal B4.

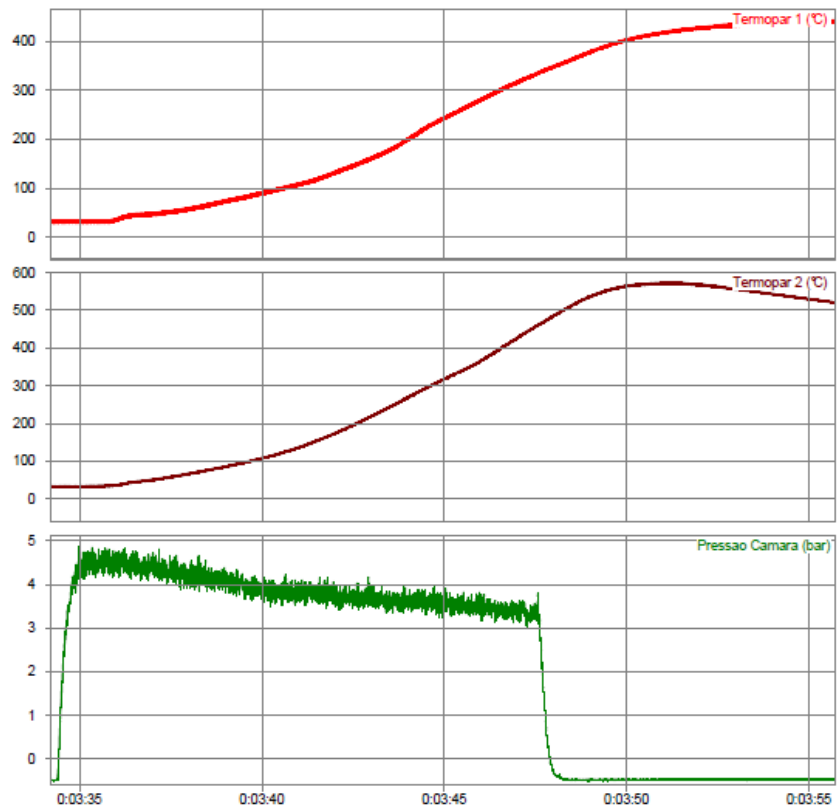


Gráfico XII – Teste com o bocal B4a1.

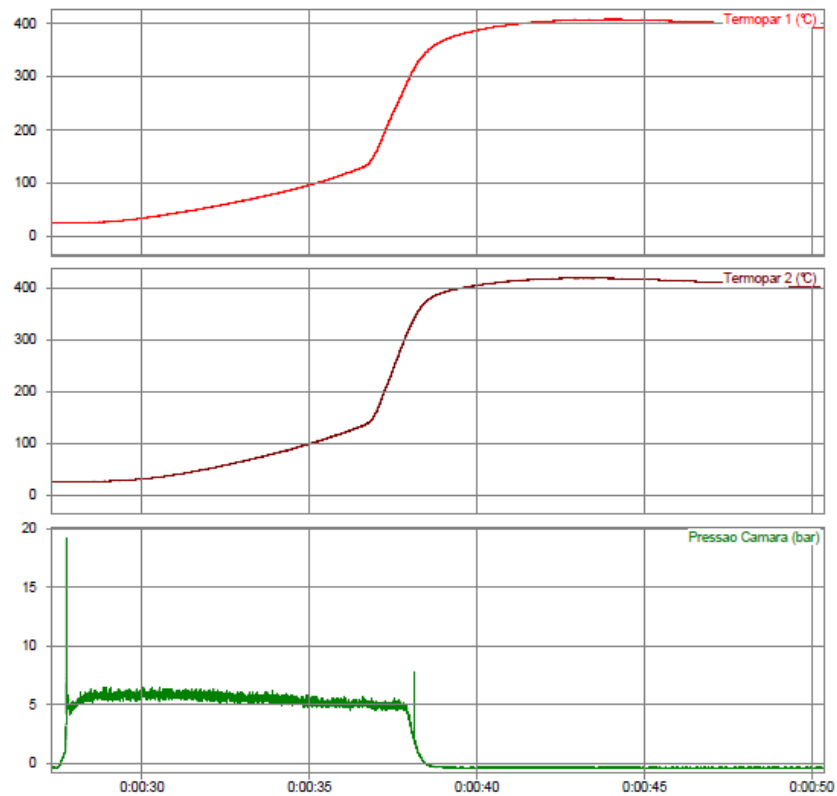


Gráfico XIII – Teste com o bocal B4a2.

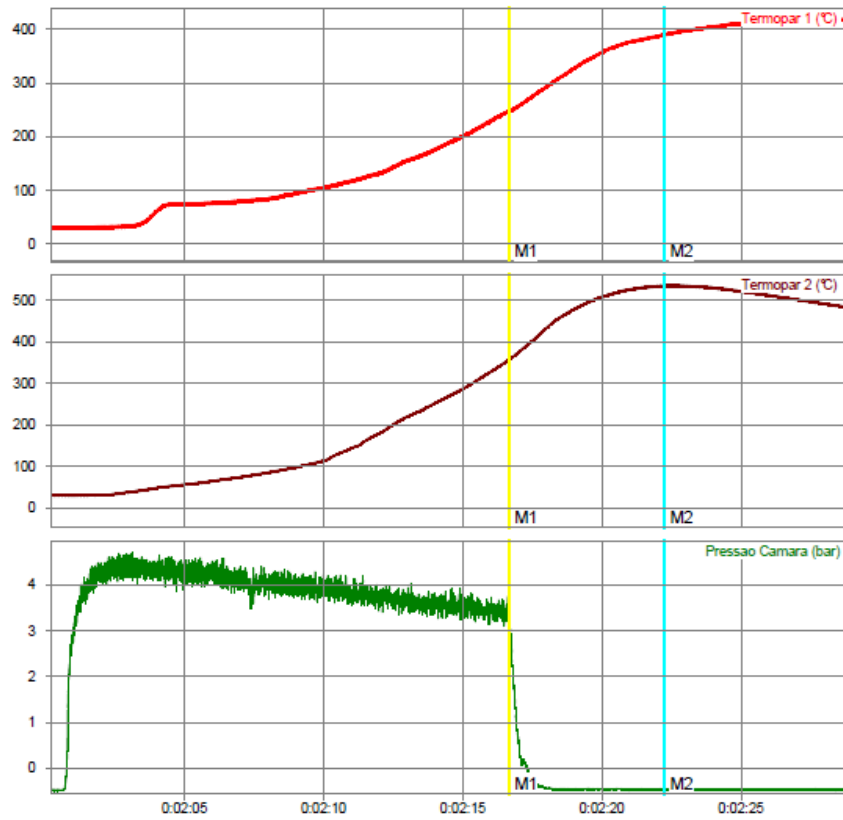
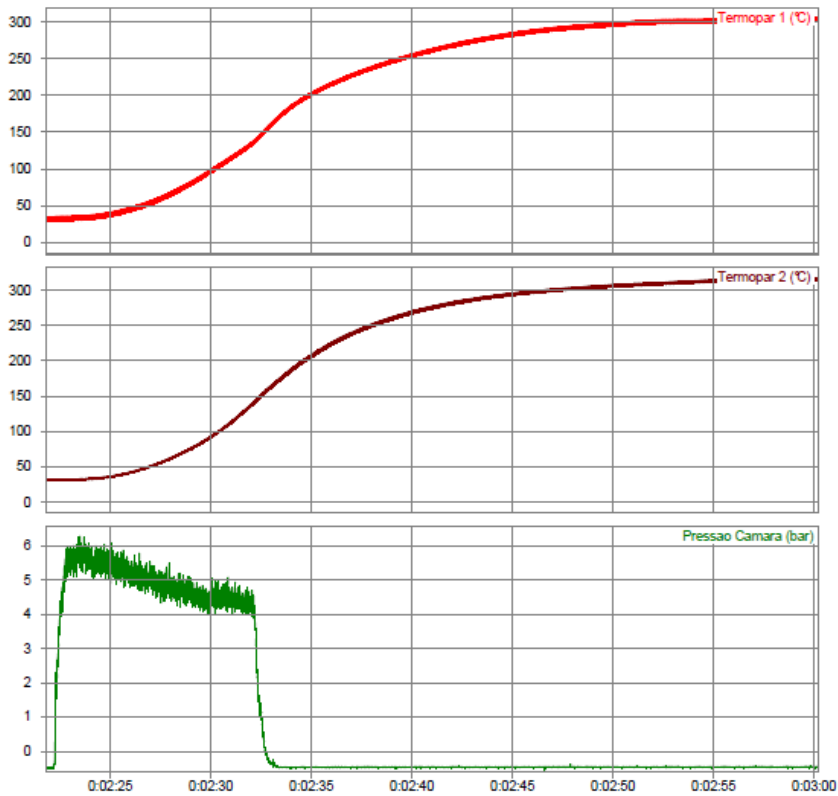
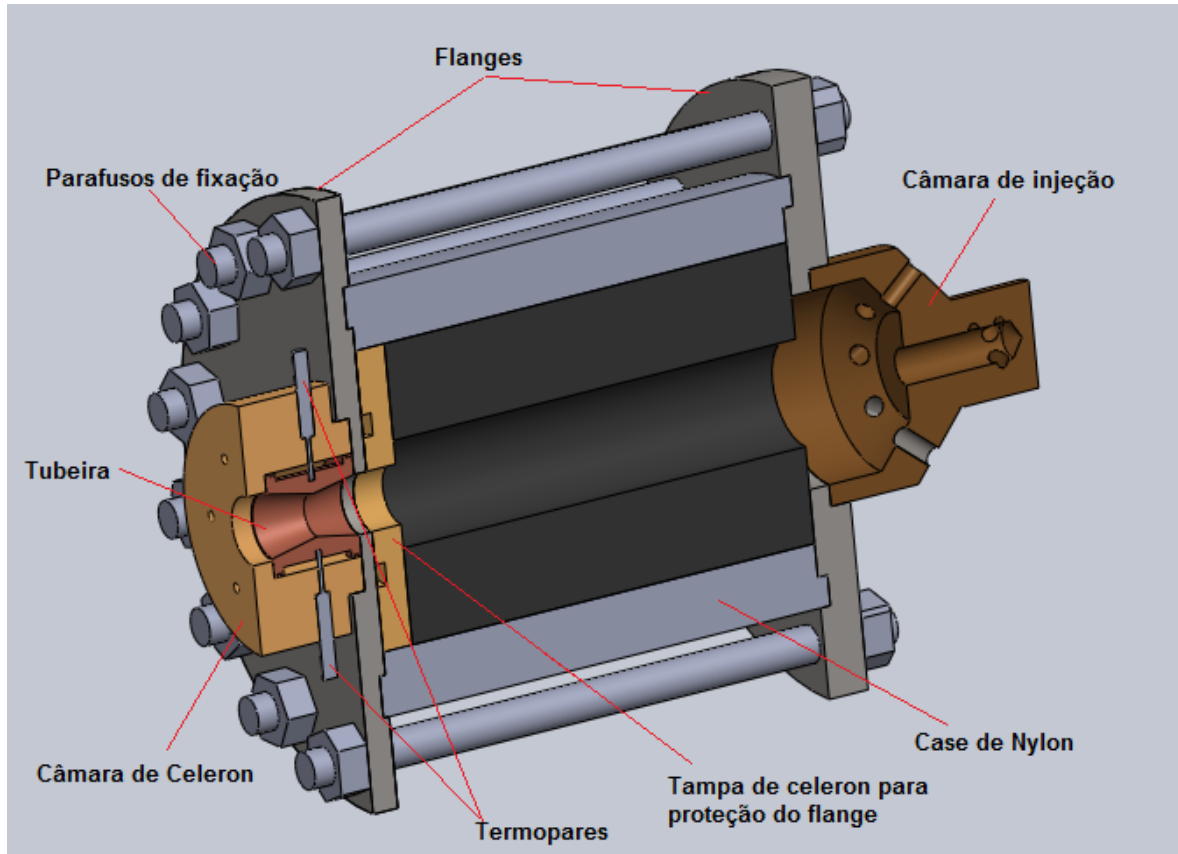


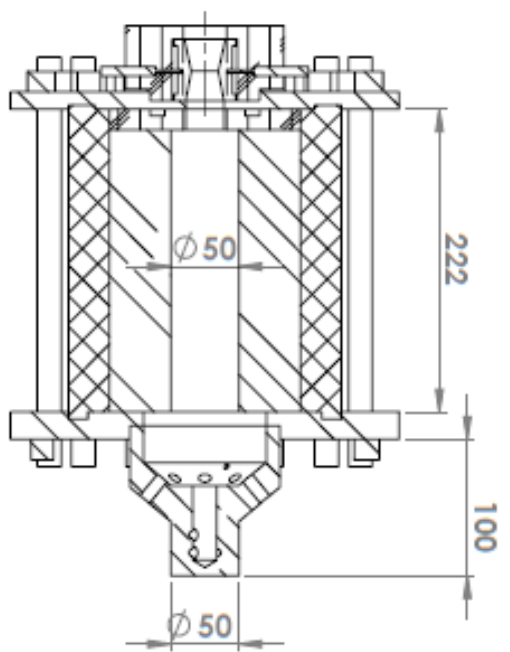
Gráfico XIV – Teste com o bocal B4a3.



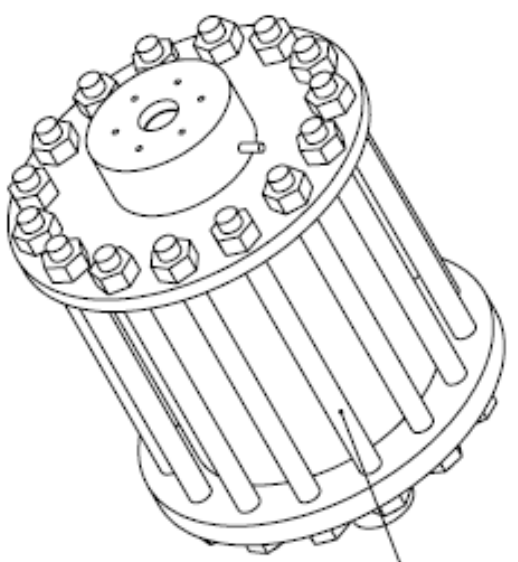
ANEXO B – Modelo 3D do motor montado e desenhos técnicos.

Desenho 3D do motor montado com a descrição dos componentes, possibilitando a visualização da posição dos termopares.

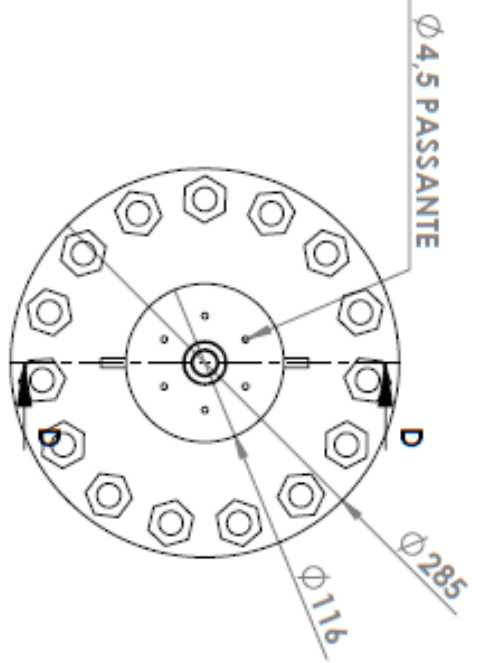




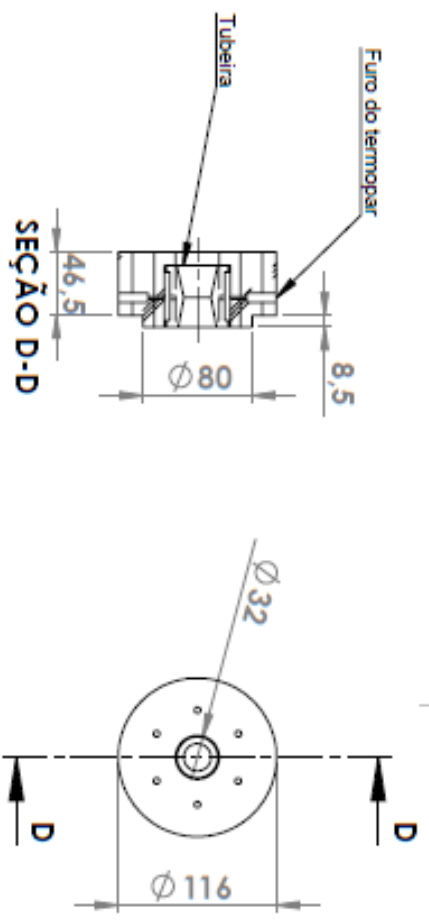
SEÇÃO D-D



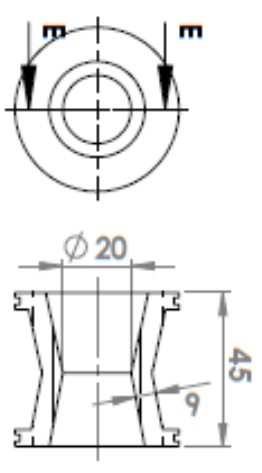
15 parafusos



Des.:	13/06/2013	Nome	Fábio Oliveira	UnB Universidade de Brasília
Visto:				
Exec.:				
Escala:	1:5	Titulo:	Montagem do motor	A 4
				FOURTEI DE I

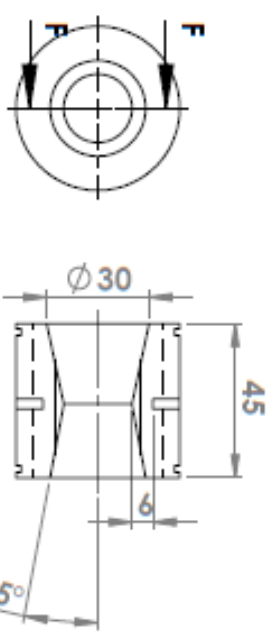


Tubeira montada na câmara de ceramion



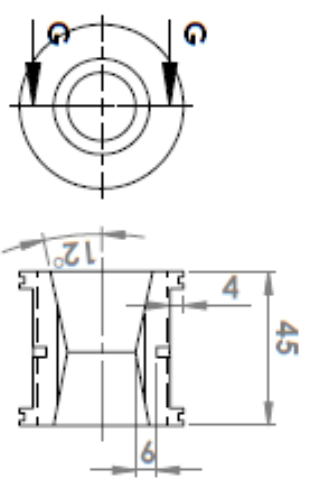
Tubeira de CuCr

SEÇÃO E-E
ESCALA 1 : 2



Tubeira de grafite

SEÇÃO F-F
ESCALA 1 : 2



Tubeira de carbono-carbono

SEÇÃO G-G
ESCALA 1 : 2



Data		Nome		Unb Universidade de Brasília
Des.: 13/06/2013		Fábio Oliveira		
Visto:				
Exec:				A 4
Escala: 1/5		Tuberas		
				FOYHA 1 DE 1