

Luís Antonio Silva*
 Instituto de Aeronáutica e Espaço
 São José dos Campos/SP – Brasil
 silvalas@iae.cta.br

*autor para correspondência

Investigação da distribuição do filme de resfriamento em um motor-foguete à propulsão líquida

Resumo: O presente estudo apresenta os resultados da investigação de um método de resfriamento amplamente utilizado em câmaras de combustão, denominado filme de resfriamento, que é aplicado a um motor-foguete à propulsão líquida. Esta utiliza como propelentes oxigênio líquido e querosene. Partindo de um motor cujo filme de resfriamento é formado por meio da introdução de combustível pelos injetores posicionados na periferia do sistema de injeção, analisou-se experimentalmente o filme formado pelo líquido que escoou pela parede interna da câmara de combustão. O parâmetro utilizado para validação e refinamento dos dados teóricos foi o comprimento do filme de resfriamento, pois esse parâmetro é de suma importância para que se obtenha uma proteção térmica eficiente internamente à câmara de combustão. Os ensaios a frio confirmaram um comprimento suficiente do filme de resfriamento para a câmara de combustão do motor estudado.

Palavras-chave: Filme de resfriamento, Motor-foguete, Propulsão líquida.

Investigation of the cooling film distribution in liquid rocket engine

Abstract: This study presents the results of the investigation of a cooling method widely used in the combustion chambers, which is called cooling film, and it is applied to a liquid rocket engine that uses as propellants liquid oxygen and kerosene. Starting from an engine cooling, whose film is formed through the fuel spray guns positioned on the periphery of the injection system, the film was experimentally examined, it is formed by liquid that seeped through the inner wall of the combustion chamber. The parameter used for validation and refinement of the theoretical penetration of the film was cooling, as this parameter is of paramount importance to obtain an efficient thermal protection inside the combustion chamber. Cold tests confirmed a penetrating cold enough cooling of the film for the length of the combustion chamber of the studied engine.

Keywords: Cooling film, Rocket engine, Liquid engine.

INTRODUÇÃO

A atividade espacial contribui de maneira significativa para o desenvolvimento do Brasil, seja pelas informações que disponibiliza, sob a forma de imagens e dados coletados sobre o território nacional, ou pelo efeito indutor de inovação que decorre dos esforços na aquisição, desenvolvimento de tecnologias e de conhecimentos críticos para atender às necessidades do Programa Nacional de Atividades Espaciais (PNAE) de 2005 a 2014. Tais esforços resultam em um benefício para a indústria e para a sociedade (Agência Espacial Brasileira, 2005).

A construção de veículos lançadores não apenas garante e preserva a necessária autonomia para o acesso ao espaço,

como possibilita também a exploração comercial dos serviços de lançamento.

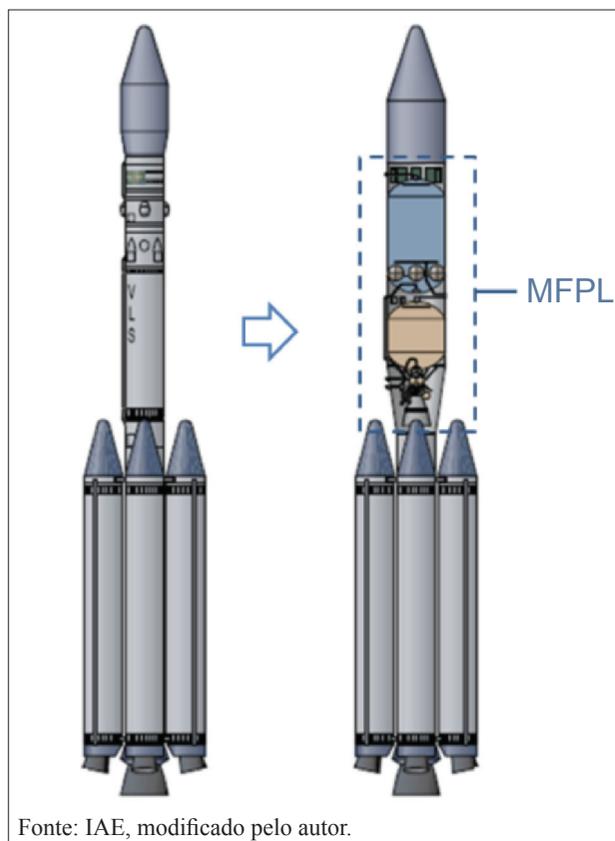
Para alcançar seu objetivo, o PNAE propõe, entre outras diretrizes, a capacitação do país na área de propulsão líquida, inicialmente para equipar os estágios destinados a garantir precisão de inserção em órbita dos satélites e, subsequentemente, para integrar os grandes lançadores, objetivando o crescimento da capacidade dos veículos lançadores em disputar o mercado internacional de transporte espacial (Agência Espacial Brasileira, 2005).

O atual veículo lançador de satélites (VSL) brasileiro, denominado VLS-1, possui quatro estágios com a missão de lançar satélites de massa entre 100 a 350 kg, em altitudes de 200 a 1.000 km. Com o domínio da tecnologia de propelente líquido, será possível o desenvolvimento

Received: 09/06/11

Accepted: 04/07/11

dos lançadores de médio e grande porte, visando à inserção de satélites em órbita geoestacionária (Agência Espacial Brasileira, 2005). O veículo com a tecnologia de propulsão líquida é mostrado na Fig. 1.



Fonte: IAE, modificado pelo autor.

Figura 1. VLS.

Assim, para a obtenção do motor-foguete à propulsão líquida (MFPL), que equipará o VLS, é indispensável um método eficaz de resfriamento das paredes que compõem o corpo da câmara de empuxo, devido às elevadas taxas de transferência de calor envolvidas. Com este intuito, este artigo apresenta uma investigação do método de resfriamento denominado filme de resfriamento (*film cooling*), por meio da análise do comportamento do filme ao longo da câmara de combustão.

MFPL

Em termos gerais, pode-se admitir que os MFPL pressurizados por turbobomba, como o que se pretende estudar, são dispostos conforme apresentado na Fig. 2.

A câmara de empuxo é um dos subsistemas principais de um motor-foguete, pois nela os propelentes são dosados, injetados, atomizados, vaporizados, misturados e queimados, gerando gases a altas temperaturas. Na sequência, tais gases são acelerados e expelidos a velocidades supersônicas (Sutton, 1986; Huzel, 1992).

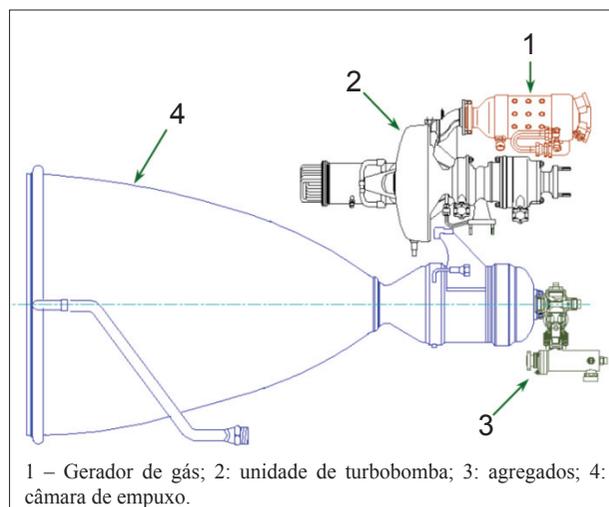


Figura 2. Componentes de um MFPL (Silva, 2009).

Existem diversos métodos de resfriamento que permitem ao material das paredes da câmara de combustão manter sua integridade estrutural. Os mais comuns são: o resfriamento regenerativo (*regenerative cooling*), resfriamento por transpiração (*transpiration cooling*), filme de resfriamento (*film cooling*) e o revestimento (*coating*). Tais métodos são brevemente apresentados a seguir (NASA, 1972).

Resfriamento regenerativo: Um ou mais propelentes circulam como fluido refrigerante em torno da superfície externa da parede a ser resfriada. Este método também é conhecido por jaqueta de refrigeração.

Resfriamento por transpiração: Uma parede porosa é resfriada internamente pelo escoamento forçado do fluido refrigerante por meio dos poros do material.

Filme de resfriamento: Uma fina camada de fluido refrigerante é mantida sobre a superfície interna da parede da câmara de combustão. Este método é o objetivo deste estudo investigatório e está detalhado no decorrer deste artigo.

Revestimento: Uma camada de material de baixa condutividade térmica é depositada como barreira térmica no lado interno da parede.

É importante ressaltar que a utilização de apenas um método de resfriamento não é suficiente, o que implica no uso combinado de duas ou mais técnicas de resfriamento. Este trabalho concentra-se no método de resfriamento, por meio do filme de resfriamento, porque este representa uma técnica muito utilizada em câmaras de empuxo como a que se pretende estudar.

O método estudado apresenta como vantagens: o resfriamento da parede interna da câmara de empuxo, utilizando o próprio

propelente fornecido para o funcionamento do motor, pois não necessita de adição de novos componentes que acarretariam em acréscimo de massa ao estágio; o fornecimento de líquido para a formação do filme de resfriamento é realizado pelos injetores posicionados na periferia do cabeçote, os quais são componentes do sistema de injeção da câmara de empuxo e possibilitam a utilização dos mesmos conceitos já aplicados na injeção dos propelentes na câmara de combustão. Neste método, o líquido que resfria a câmara participa da queima dos propelentes.

Como desvantagens da utilização do método de resfriamento por filme de resfriamento podem ser citadas: a adição de propelente na superfície da parede da câmara de combustão modifica a razão de mistura do par propelente, reduzindo a eficiência do motor; em alguns casos, este método não é suficiente para ser utilizado como único recurso de resfriamento; devido ao filme de resfriamento ser consumido ao longo da câmara de empuxo, não é possível, em alguns casos, o resfriamento de toda a câmara de empuxo, principalmente a garganta, em que ocorre a maior taxa de transferência de calor.

Para a investigação de quaisquer métodos de resfriamento, é primordial o conhecimento do motor a que se pretende estudar, por meio de seus requisitos e parâmetros técnicos de funcionamento.

O motor em desenvolvimento para aplicação no VLS-1 denomina-se L75 e seus parâmetros técnicos de funcionamento principais estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros técnicos de funcionamento do L75.

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade dimensional
P	Empuxo	75	kN
\dot{m}_{global}	Vazão mássica global	23,341	kg/s
$\dot{m}_{\text{k}}^{\text{o}}$	Vazão mássica de oxidante na câmara de combustão	15,806	kg/s
$\dot{m}_{\text{k}}^{\text{f}}$	Vazão mássica de combustível na câmara de combustão	7,201	kg/s
km global	Relação de mistura global	2,17	-
km k	Relação de mistura da câmara de combustão	2,19	-
Is global	Impulso específico do motor	327,7	s

Fonte: IAE.

Filme de resfriamento

Conforme foi apresentado, há alguns métodos para resfriar a câmara em projetos de motores foguete. Assim, o filme de resfriamento pode ser produzido pelo sistema de injeção por meio da aspersão de um dos propelentes pelos injetores periféricos ou pelos canais, dispostos no fechamento inferior do cabeçote de injeção, direcionados à parede da câmara de combustão.

Para que o material da câmara de empuxo possa resistir às altas temperaturas dos produtos de combustão, organiza-se a mistura dentro da câmara de empuxo de modo a formar regiões de gases com temperaturas decrescentes, na direção do núcleo para a periferia. Para tanto, usualmente, os injetores periféricos possuem razão de mistura mais rica em combustível do que os injetores centrais, proporcionando temperatura de estagnação mais baixa junto à parede. Este comportamento gera regiões que podem ser observadas na Fig. 3 (Kessaev, 2006).

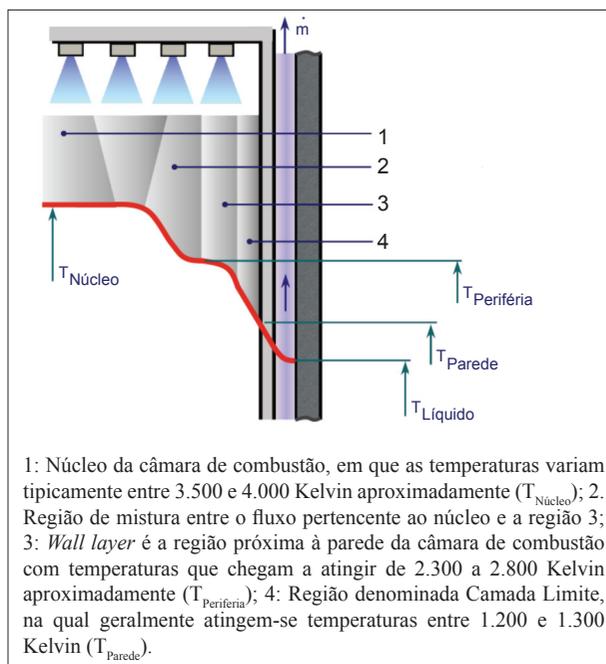


Figura 3. Regiões de mistura (SILVA, 2009).

Nas principais câmaras de empuxo existentes que utilizam o método de resfriamento regenerativo, observa-se a aplicação simultânea do *film cooling*, o qual é normalmente aplicado por meio dos injetores periféricos (NASA, 1972). A Tabela 2 mostra a aplicação do filme de resfriamento em alguns motores regenerativos conhecidos.

O sistema de resfriamento deve ser projetado visando o preenchimento homogêneo de líquido no perímetro da câmara de combustão. Para tanto, há necessidade de se investigar a distribuição do líquido aspergido pelos injetores

Tabela 2. *Film cooling* em motores regenerativos (NASA, 1972).

Motores	Propelentes empregados	Líquido refrigerante para film cooling
F-1	LOx/RP-1	RP-1
J-2	LOx/LH2	GH2
RL 10	LOx/LH2	GH2
Agena	IRFNA/UDMH	UDMH
Titan I family	LOx/RP-1	RP-1
Titan II family	N2O4/A-50	A-50
Titan III family	N2O4/A-50	A-50
X-15	LOx/NH3	NH3

periféricos, com vistas à isenção das áreas de deficiência na proteção térmica que permitem pontos quentes.

Ocasionalmente, o filme pode ser utilizado para solucionar superaquecimentos, localizados pelo fornecimento do filme de líquido diretamente na área afetada.

Os principais problemas, que envolvem o projeto do sistema de resfriamento por *film cooling*, resultam da dificuldade em (NASA, 1972):

- fornecer a quantidade exata de líquido de resfriamento (vazão mássica), pois o fornecimento de líquido deve ser suficiente para o resfriamento, mas não deve degradar acentuadamente o impulso específico;
- determinar o comprimento e o arranjo do fluxo de líquido na quantidade requerida de líquido refrigerante para que este seja usado de forma eficiente, proporcionando um recobrimento homogêneo da parede da câmara de combustão.

Com relação ao fornecimento de líquido refrigerante à parede da câmara de combustão, há um entendimento – um tanto qualitativo – de que este fornecimento deve (NASA, 1972): minimizar a mistura entre os reagentes buscando tornar o filme de resfriamento com um único componente; e maximizar a cobertura das superfícies a serem protegidas.

A formação do filme de resfriamento, no caso do motor L75, ocorre pela inserção de líquido rico em combustível por meio dos injetores periféricos. Esse líquido colide com a parede da câmara de combustão, fazendo com que uma parcela se desprenda e componha a parcela de líquido definida como atomização, enquanto que outra porção do líquido fornecido adere à parede formando uma película denominada *film cooling*. Este mecanismo de formação é mostrado na Fig. 4.

O líquido aspergido pelo injetor periférico forma um cone, com ângulo de abertura diferente do cone formado pelos

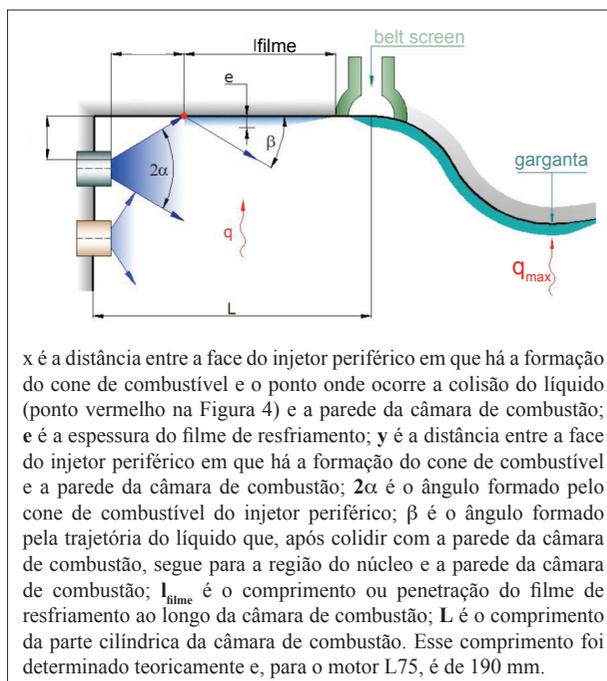


Figura 4. Formação do filme de resfriamento (SILVA, 2009).

injetores centrais. Esse procedimento visa proporcionar ao líquido injetado pelos injetores periféricos um maior alcance, pois na região próxima à face, na qual estão posicionados os injetores, não há necessidade de resfriamento, visto que as temperaturas geradas nessa região são facilmente suportadas pelo material da câmara de combustão. Entretanto, nas proximidades da garganta, onde acontece a maior transferência de calor, há a necessidade de uma combinação dos sistemas de resfriamento.

A distância percorrida pelo líquido aspergido dos injetores periféricos, após a sua colisão com a parede da câmara de combustão, recebe o nome de penetração e pode ser determinada teoricamente.

A validação dos cálculos que envolvem a penetração do filme de resfriamento ocorre por meio de ensaios a quente. Portanto, não fazem parte do presente estudo, visto que este limita-se à investigação por meio do ensaio a frio do sistema de injeção.

Outro parâmetro de suma importância na investigação do filme de resfriamento é a razão de mistura do filme de resfriamento, pois ocorre a interferência do líquido aspergido pelos injetores centrais na composição do filme de resfriamento. Para a análise desse parâmetro, é possível comparar os dados teóricos e os reais, obtidos por meio de ensaios a frio, com o auxílio de um espectrofotômetro. Este procedimento é proposto como trabalho futuro para a continuação do estudo apresentado.

Penetração do filme de resfriamento

À medida que o filme de resfriamento percorre a parede da câmara de combustão, ele é submetido a elevadas temperaturas provenientes da combustão, sendo consumido e, portanto, havendo uma diminuição da eficiência da proteção térmica na parede da câmara de combustão. Para que o filme de resfriamento percorra uma distância suficiente, é necessária a determinação da penetração, denominada *Liquid film length* (l_{filme}). Essa penetração é determinada por meio do balanço de energia. A expressão (Eq. 1) que representa a penetração do filme de resfriamento na câmara de combustão é (Kessaev, 2006):

$$l_{\text{filme}} = \eta \frac{\dot{m}_{\text{filme resfr}}}{\pi D} \left[\frac{C_p(T_s - T_h)}{q_{\text{aquec}}} + \frac{Q_s}{q_{\text{evap}}} \right] + x \quad (1)$$

onde,

η é o coeficiente que contabiliza a porcentagem de líquido do filme consumido pela combustão. Esse coeficiente depende do número de Reynolds, calculado para o filme de resfriamento, Re_L . Esta relação é mostrada no gráfico da Fig. 5.

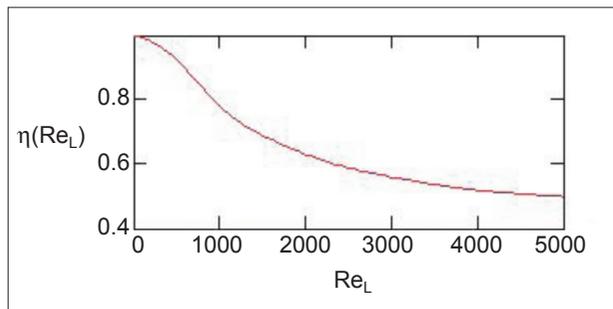


Figura 5. Consumo do filme de resfriamento (KESSAEV, 2006).

O número de Reynolds deve ser determinado levando-se em consideração a vazão mássica no filme de resfriamento ($\dot{m}_{\text{filme resfr}}$) e a viscosidade do líquido empregado nesse filme. Pela utilização do gráfico da Fig. 5, o valor do coeficiente η é de 0,98 para o número de Reynolds correspondente a 168,2.

D é diâmetro da câmara de combustão. O motor L75 apresenta esta dimensão igual a 0,18 m; C_p é a capacidade térmica do líquido à temperatura T_{cp} . Para a temperatura considerada, este valor é de 2.805 kJ/kg K (Raznjevic, 1976); T_{cp} é a temperatura média do líquido, determinada pela Equação 2:

$$T_{cp} = \frac{(T_h + T_s)}{2} \quad (2)$$

onde:

T_h é a temperatura inicial do líquido e corresponde a 298 K;

T_s é a temperatura de ebulição do líquido à pressão de câmara, p_k . Para o líquido empregado, esta temperatura é de 351,45 K (Raznjevic, 1976);

q_{aquec} é o fluxo total de calor para o aquecimento do filme líquido, determinado por meio da análise térmica;

q_{evap} é o fluxo total de calor para a evaporação do filme líquido, determinado por meio da análise térmica;

Q_s é o calor de evaporação do líquido aspergido para a formação do filme. Para o presente estudo, considera-se o combustível;

$\dot{m}_{\text{filme resfr}}$ é a vazão mássica de combustível destinada à formação do filme de resfriamento.

Na expressão utilizada para a determinação do filme de resfriamento, a vazão mássica no filme é a variável mais importante. Tal fato ocorre, pois, na investigação do *film cooling* proposta neste trabalho, a medição dessa vazão tornará possível verificar se os valores determinados teoricamente para a formação do *film cooling* são suficientes a uma penetração que preencha o comprimento da parte cilíndrica, L , da câmara de combustão até o recebimento de uma nova porção de líquido de resfriamento, por intermédio do *belt screen*, conforme mostra a Fig. 4.

Para o motor L75, a distância y , apresentada na Fig. 4, é de 8,65 mm e o ângulo de cone, 2α , formado pelos injetores periféricos, de 94° . A partir desses valores, é possível determinar a distância x como sendo 8,1 mm.

Por meio da expressão que representa o comprimento do filme e considerando a distância x que o líquido aspergido alcança antes de tocar na parede da câmara de combustão, há penetração do filme de resfriamento de 124 mm.

O valor da penetração do filme de resfriamento está relacionado à quantidade de líquido destinado a sua formação. O valor de 124 mm, determinado para a penetração, está considerando que 50% da vazão mássica que escoar pelos injetores periféricos fazem parte da formação do líquido. Esta porcentagem é uma estimativa e pode ser investigada pelo ensaio a frio, utilizando um dispositivo adequado.

A correção do valor da vazão mássica do filme de resfriamento possibilita uma avaliação mais precisa do

comportamento do filme de resfriamento, principalmente no que diz respeito à penetração do filme.

INVESTIGAÇÃO DO FILME DE RESFRIAMENTO

As simplificações consideradas no desenvolvimento desta investigação são:

- utilização de água como propelentes – oxidante e combustível;
- ausência de contrapressão internamente ao dispositivo de ensaio;
- tempo máximo de operação do dispositivo de ensaio proposto de quatro segundos.

Com a finalidade de garantir maior fidelidade dos valores colhidos, o ensaio é realizado no banco de testes utilizado para ensaios a quente do Laboratório de Propulsão Líquida (LPL), da Divisão de Propulsão Espacial – APE, do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE). Este banco de ensaio é utilizado para o ensaio a quente dos motores L5 e L15.

O banco de testes é capaz de fornecer vazões mássicas e pressões nos intervalos de tempo exigidos pelo experimento. O sistema de injeção utilizado no ensaio opera com as vazões mássicas e pressões especificadas para o motor L15, sendo que, para a operação com o motor L75, não há banco de testes com a capacidade requerida disponível até a data de término deste estudo. A montagem do dispositivo de ensaio no banco de 20 kN está apresentada na Fig. 6.

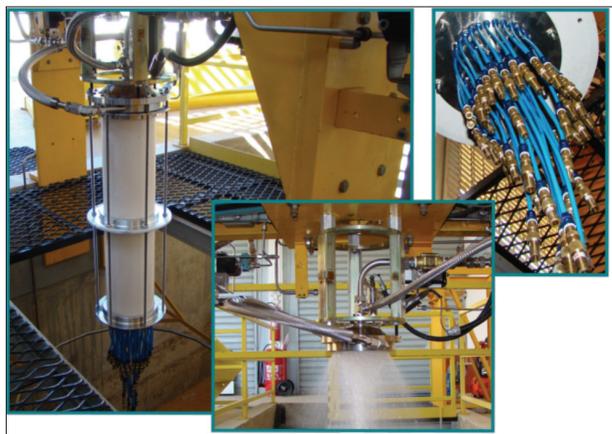


Figura 6. Dispositivo de ensaio no banco de 20 kN (SILVA, op. cit.).

O dispositivo de ensaios poderá ser reaproveitado para o mesmo teste hidráulico com o cabeçote de injeção do MFPL L75 quando houver disponível um banco de testes com maior capacidade, visto que tal dispositivo foi

dimensionado para a geometria deste motor, implicando em prejuízo para o tempo de operação, já que a vazão mássica do motor L75 é superior à mássica do L15.

Para melhor identificação do posicionamento dos injetores, usa-se um esquema que divide-os em camadas, como mostra a Fig. 7.

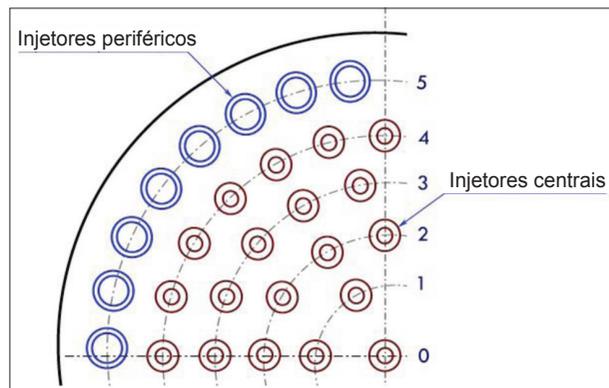


Figura 7. Identificação dos injetores em camadas (SILVA, 2009).

Os injetores são ensaiados individualmente para a determinação de parâmetros, tais como a vazão mássica e o ângulo de cone. Cada injetor é identificado e sua posição no cabeçote é mapeada. A Fig. 8 apresenta o cabeçote de injeção utilizado para o ensaio.

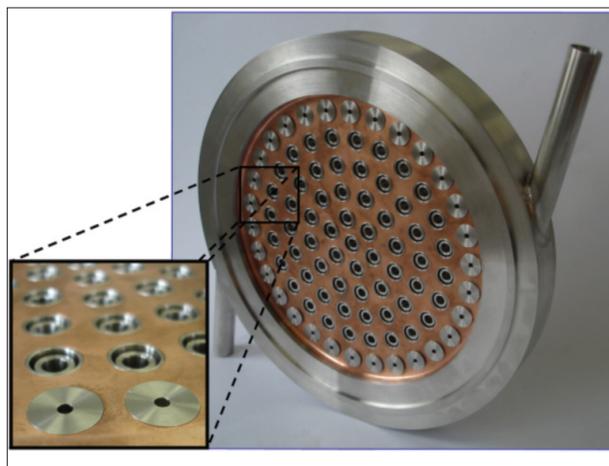


Figura 8. Cabeçote de injeção (SILVA, 2009).

O líquido aspergido pelos injetores periféricos escoia pela parede do dispositivo de ensaio e é coletado em sua parte inferior, na qual são posicionadas válvulas que conduzem o líquido para um recipiente calibrado (proveta), onde serão realizadas as medições. A medição também pode ser realizada com o auxílio de uma balança (massa).

A Fig. 9 ilustra o esquema de funcionamento do dispositivo para tal ensaio.

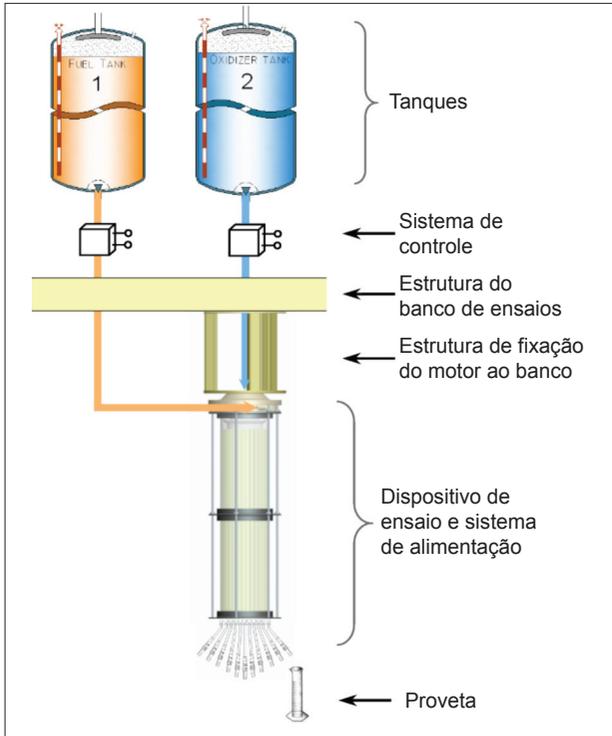


Figura 9. Esquema do ensaio (Silva, 2009).

São executados dois tipos de ensaios: um com a utilização de um cilindro que separa as camadas 4 e 5 para verificar a porção de líquido fornecida pelos injetores periféricos, sem a influência dos injetores centrais da camada 4; e outro com uma aba cônica que permite a captação exclusiva do líquido que escoo pela parede interna do dispositivo de ensaio. Em ambos os casos ocorre a separação do líquido em cavidades localizadas no perímetro da camada 5, conforme mostra a Fig. 10.

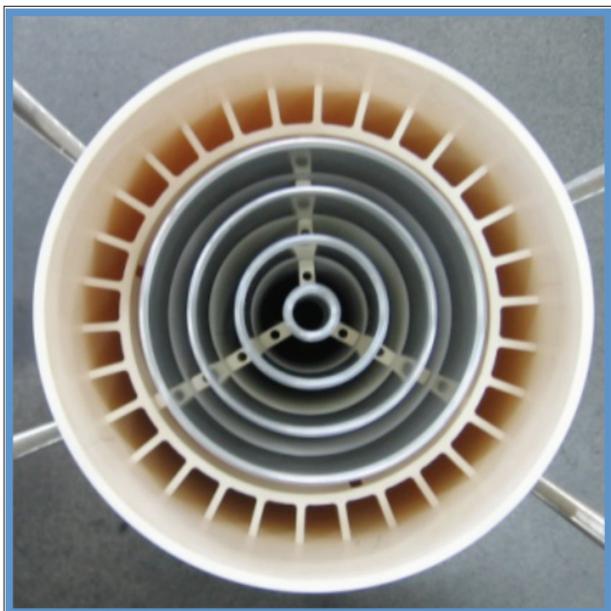


Figura 10. Cavidades da coleta de líquido (SILVA, 2009).

Assim, para a análise dos resultados obtidos no presente estudo, são considerados os seguintes casos:

Experimento 1: Uma primeira configuração do dispositivo de ensaio é montada com um cilindro posicionado na camada 5, possibilitando a separação do líquido aspergido pelos injetores periféricos em 50%.

Experimento 2: Para o segundo experimento, o cilindro empregado na condição anterior é substituído por uma aba cônica que permite a coleta do líquido, o qual escoo pela parede interna do dispositivo.

Os valores obtidos para o Experimento 1, plotados em gráfico que representa o escoamento na parede da câmara de combustão, apresentam o comportamento mostrado na Fig. 11.

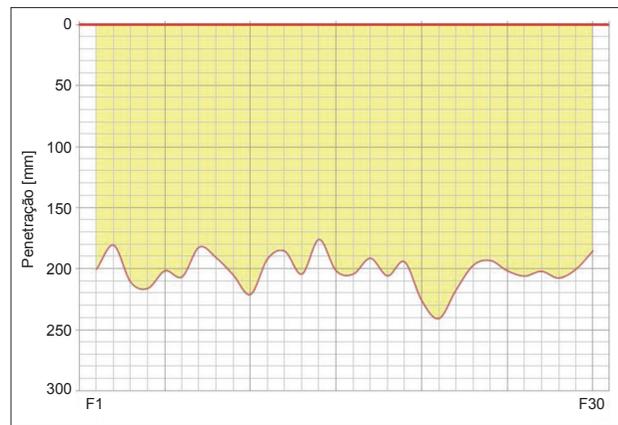


Figura 11. Penetração do filme de resfriamento - Experimento 1 (Silva, 2009).

Para os ensaios que utilizam a aba cônica para captação exclusiva do líquido que escoo pela parede (Experimento 2), os resultados obtidos também estão apresentados em forma de vazões mássicas nas posições para coleta de líquido, apresentando o comportamento mostrado na Fig. 12.

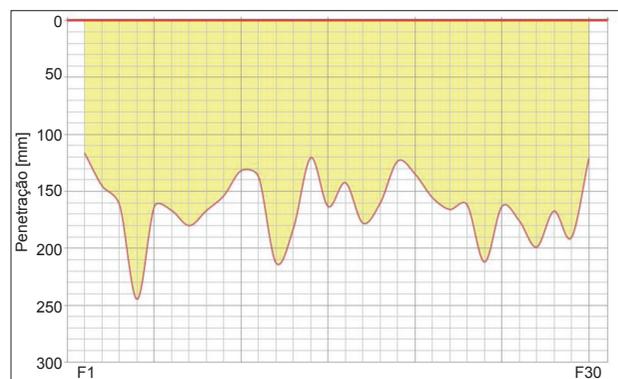


Figura 12. Penetração do filme de resfriamento - 2 (SILVA, 2009).

A Tabela 3 reúne os resultados do percentual de vazão mássica média no filme de resfriamento com relação à vazão mássica total da câmara de combustão, as vazões mássicas médias no filme de resfriamento e a penetração média do filme de resfriamento para os dois casos analisados neste estudo.

Tabela 3. Resumo dos resultados.

Casos	Percentual da vazão mássica [%]	Vazão mássica filme resfriamento [g/s]	Penetração do filme resfriamento [mm]
1	11,3	711	210
2	9,00	564	183

Fonte: Elaborado pelo autor.

CONCLUSÕES

A presente investigação apresenta uma análise preliminar do funcionamento de um motor em fase de concepção, com ênfase nos parâmetros que mais afetam a temperatura e a geração de calor. Inicialmente, tinha-se como objetivo que o motor em questão fosse o L75, porém devido a limitações das instalações de teste do IAE, optou-se por considerar uma versão limitada do L75. Esta versão estudada mantém as mesmas dimensões da câmara de combustão (que são idênticas às do já existente L15), porém, com o sistema de injeção diferente, o que implica numa degradação de seu desempenho, no que diz respeito ao empuxo gerado.

A realização dos ensaios para a investigação do filme de resfriamento confirma que os valores limites recomendados pelos especialistas russos, com relação à vazão mássica na formação do filme de resfriamento, fornecem um valor de penetração suficiente para o comprimento da câmara de combustão do motor L75. Entretanto, os valores adquiridos nos ensaios demonstram que esses podem ser refinados para as aplicações específicas a que se destinam.

O procedimento de ensaio se mostrou viável para aplicação no desenvolvimento de outros motores que possam surgir no âmbito do IAE. Porém, outros aspectos se mostraram

relevantes na qualidade dos dados analisados, como, por exemplo, a qualidade da manufatura dos componentes do sistema de mistura, principalmente dos injetores.

O desenvolvimento do dispositivo de ensaio, para um motor que não requer desempenho elevado e de baixo empuxo, permitiu acumular conhecimento de projeto que será útil na concepção de dispositivos mais complexos, de maior desempenho e empuxo.

Para motores de maior porte, a vazão mássica certamente excederá a capacidade do dispositivo, sendo necessária a construção de um dispositivo dedicado para cada motor.

REFERÊNCIAS

Agência Espacial Brasileira, 2005, “Programa Nacional de Atividades Espaciais: PNAE/Agência Espacial Brasileira”, Brasília, AEB.

Sutton, G.P.A., 1986, “Rocket propulsion elements”, New York, John Wiley & Sons.

Huzel, D.K.;Huang, D.H., 1992, “Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engines”, Washington, AIAA, Process in Aeronautics and Astronautics, v. 147.

National Aeronautics and Space Administration, 1972, “Liquid rocket engine fluid-cooled combustion chambers”, Ohio, NASA.

Kessaev, K., 2006, “Theory and calculation of liquid propellant rocket engines in: Fundamental course in engine design”, São José dos Campos, CTA/IAE.

Raznjevic, K., 1976, “Handbook of thermodynamic tables and charts”, Washington, Hemisphere Pub.

Silva, L.A., 2009, “Investigação da Distribuição do Film Cooling em um Motor Foguete a Propelente Líquido de 75 kN de Empuxo”, São José dos Campos, ITA, dissertação de mestrado.