



PALAVRAS CHAVES/KEY WORDS  
**AUTORES** AUTORS  
 INJEÇÃO DE GASES NA COMBUSTÃO  
 COMBUSTÃO DE PÓLVORA BASE DUPLA

AUTORIZADA POR/AUTHORIZED BY  
  
 Marco Antonio Raupp  
 Diretor Geral

AUTOR RESPONSÁVEL  
 RESPONSIBLE AUTHOR  
  
 Fernando Fachini Filho

DISTRIBUIÇÃO/DISTRIBUTION  
 INTERNA / INTERNAL  
 EXTERNA / EXTERNAL  
 RESTRITA / RESTRICTED

REVISADA POR / REVISED BY  
  
 Carlos E. S. de S. Migueis

CDU/UDC  
 541.126

DATA / DATE  
 Maio/87

TÍTULO/TITLE	PUBLICAÇÃO Nº PUBLICATION NO INPE-4180-RPE/542
	EFEITO DO GÁS INERTE NA QUEIMA DE PÓLVORA DE BASE DUPLA.
AUTORES/AUTHORSHIP	FERNANDO FACHINI FILHO WALTER GILL WILFRED RUDOLF LAMM LUCY DE ALBUQUERQUE KIMURA

ORIGEM  
 ORIGIN  
 DCP

PROJETO  
 PROJECT  
 ATDCP

Nº DE PAG.  
 NO OF PAGES  
 13

ULTIMA PAG.  
 LAST PAGE  
 07

VERSÃO  
 VERSION

Nº DE MAPAS  
 NO OF MAPS

RESUMO - NOTAS / ABSTRACT - NOTES

*Este trabalho mostra que os gases inertes monoatômicos, hélio e argônio, quando presentes na combustão de propelente sólido não alteram a velocidade de queima. Pode-se concluir então que o mecanismo controlador da queima está na fase líquida ou sólida; pois se estivesse na fase gasosa a presença desses gases teria influência na velocidade de de queima, como visto na queima de misturas gasosas combustíveis com a presença dos gases hélio e argônio.*

OBSERVAÇÕES / REMARKS

*Trabalho apresentado no I Simpósio Brasileiro de Transferência de Calor e Massa.*



ABSTRACT

*This work show non influence of the inert monatomic gases, helium and argon, on the burning rate of a solid propellant. So, it can be concluded that the control mechanism of the combustion of the solid propellant is in the liquid or solid phase of the flame. If it were in the gaseous phase, the helium and argon would have influenced the burning rate; as is observed in the combustible gaseous mixture with the presence of these gases.*

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS .....	v
1 - INTRODUÇÃO .....	1
2 - MODELO DE QUEIMA DE PROPELENTE SÓLIDO DE BASE DUPLA .....	2
3 - EXPERIMENTOS .....	3
4 - CONCLUSÃO .....	5
BIBLIOGRAFIA .....	7

٦٠

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1 - Velocidade da chama do metano em várias composições de ar ...	1
2 - Chama de pólvora de base dupla e o perfil da temperatura versus distância .....	3
3 - Esquema da bomba de queima para medir velocidade de queima de pólvora .....	4
4 - Curvas de velocidade de queima para pólvora de base dupla com a injeção do gás hélio, argônio e nitrogênio versus pressão .	5



## 1 - INTRODUÇÃO

Na década de cinquenta vários estudos experimentais foram realizados sobre o efeito da presença de gás inerte na combustão de misturas gasosas (Clingman et alii, 1953; Morgan e Kane, 1953). O experimento básico era a adição de gases inertes como o argônio, o hélio e o nitrogênio a misturas de gases combustíveis com oxigênio. As velocidades de propagação de chama dessas misturas foram observadas conforme mostra a Figura 1. Dessa figura pode-se confirmar que a presença de gás inerte em chama de mistura gasosa tem uma forte influência na velocidade de queima.

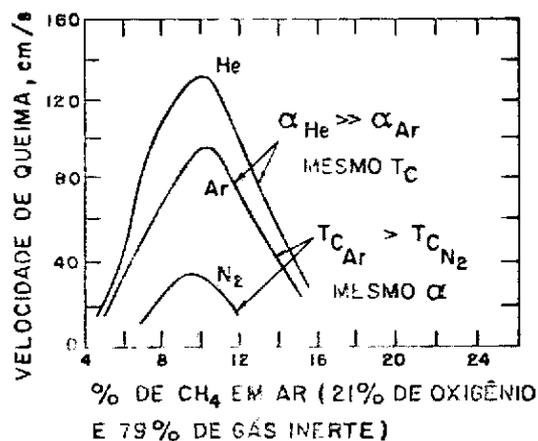


Fig. 1 - Velocidade da chama do metano em várias composições de ar.

Fonte: Clingman et alii (1953).

A explicação dada para esses resultados é que a propagação da chama é controlada pela transferência de calor da zona onde ocorre intensa reação química (consequentemente, com intensa geração de calor) para uma zona de pré-aquecimento da mistura gasosa. Considerações simplificadas para a conservação da energia (Kuo, 1986) levam à expressão:

$$v \sim \sqrt{\alpha \cdot (RR)},$$

onde  $v$  é a velocidade de propagação da chama ;  $\alpha$  é a difusividade térmica do meio;  $RR$  é a taxa de reação química, que depende fortemente da temperatura da zona de intensa reação (temperatura da chama). Comparando as curvas da Figura 1, pode-se ver que a do hélio é maior do que a do argônio em virtude de a difusividade térmica do hélio ser maior. A taxa de reação química é igual em ambas as misturas; logo, o calor liberado é o mesmo e as capacidades caloríficas são iguais, o que resulta na mesma temperatura de chama. Comparando as misturas com argônio e com nitrogênio, o efeito de baixa temperatura pode ser visto, pois a difusividade térmica é a mesma em ambas as misturas, mas a capacidade calorífica do nitrogênio é maior.

Sabendo desse efeito, pensou-se em verificar tal fenômeno na queima de propelente sólido. O interesse na queima de propelente sólido é grande, visto ser impossível, até o presente, variar a velocidade de queima conforme se deseja. Logo, o efeito da presença de gás inerte na combustão desse propelente poderia fornecer tal possibilidade. Portanto, realizou-se uma série de ensaios em bomba de queima que permite medir a velocidade de queima do propelente. Os resultados não mostraram nenhuma variação na velocidade de queima, fato que é discutido na seção final.

## 2 - MODELO DE QUEIMA DE PROPELENTE SÓLIDO DE BASE DUPLA

Um modelo com a maior aceitação divide a chama na superfície do propelente sólido em quatro zonas (Figura 2), a saber: zona espumosa, zona efervescente, zona escura e zona luminosa. A mudança da pólvora da fase sólida para a fase líquida ocorre na zona espumosa, e a mudança da fase líquida para a fase gasosa ocorre na zona efervescente. As zonas subsequentes estão na fase gasosa.

Sabe-se que o mecanismo controlador da velocidade de queima é o processo mais lento, processo esse que ocorre em uma das zonas. Se esse mecanismo estiver nas zonas gasosas, os argumentos apresentados para a chama gasosa serão válidos e a presença de gás inerte como o hélio e o argônio deverão modificar a velocidade de queima.

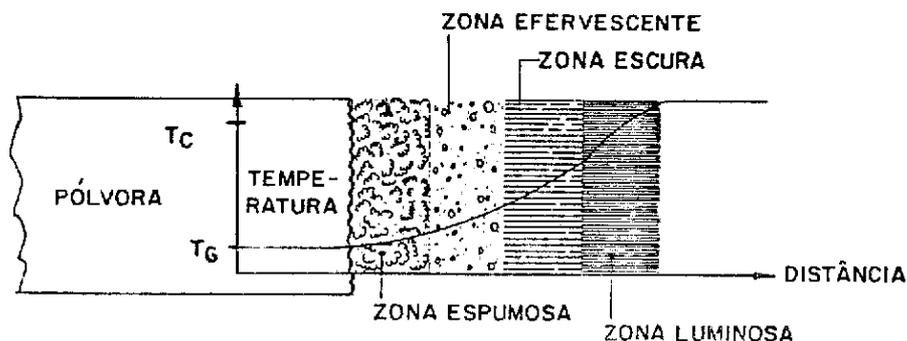


Fig. 2 - Chama de pólvora de base dupla e o perfil da temperatura versus distância.

### 3 - EXPERIMENTOS

Uma verificação do efeito dos gases hélio e argônio em combustão de propelente sólido foi feita através de testes com a injeção desses gases na câmara de combustão de um motor foguete (Fachini e Gill, 1986). Observaram-se aumentos na pressão e, conseqüentemente, no empuxo da ordem de três vezes, o que seria devido ao aumento da velocidade de queima da pólvora. Não se obteve repetibilidade nos testes, o que sugeriu novos experimentos em bomba de queima para medir a velocidade de queima na presença desses gases.

A bomba de queima (Figura 3) consiste em uma câmara de combustão, na qual se queimam bastões de pólvora de 100mm de comprimento e 10mm de diâmetro. A câmara tem um orifício para escape dos gases e um orifício para a injeção de gás para manter a pressão desejada durante a queima. A injeção de gás é feita na parte inferior da câmara e a linha de alimentação é formada de cilindros de gás e de uma válvula reguladora de pressão interna da câmara de combustão. Dois sensores ópticos, que registram a passagem da frente de chama, estão instalados na câmara. A determinação da velocidade média de queima é feita pela divisão da distância entre sensores (80mm) pelo tempo levado para que a frente de chama passe pelos sensores.

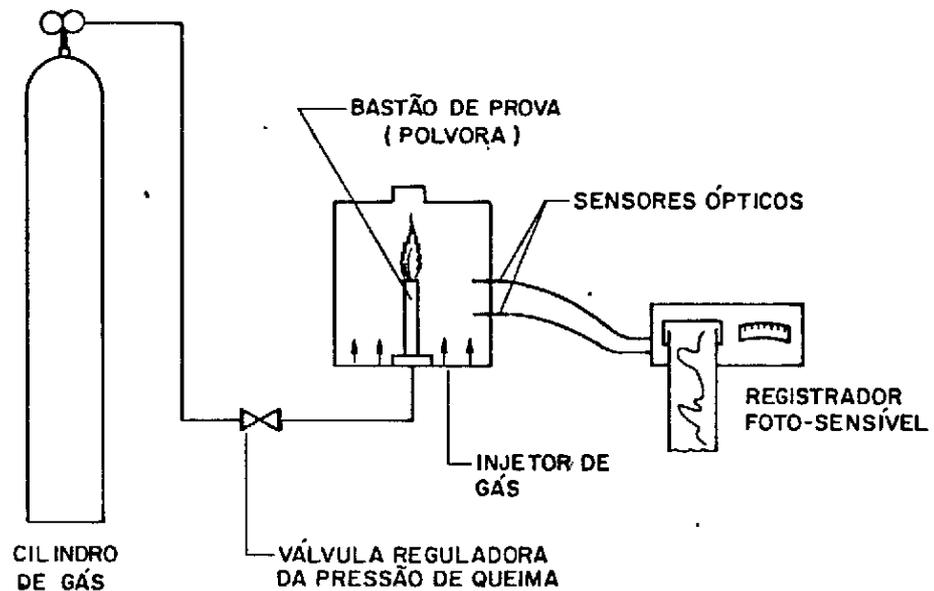


Fig. 3 - Esquema da bomba de queima para medir velocidade de queima de pólvora.

Efetuuou-se uma sêrie de ensaios utilizando um propelente de base dupla, o mesmo propelente que foi utilizado nos ensaios do motor foguete. Foram feitos 21 ensaios, o propelente foi queimado na presença dos gases hêlio (6 ensaios), argônio (6 ensaios) e nitrogênio (9 ensaios) com a finalidade de levantar curvas de velocidade de queima contra pressão.

Os resultados estão representados na Figura 4, onde se pode verificar que a presença dos gases inertes não influem de uma maneira perceptível. As diferenças das regressões, apresentadas na Figura 4, podem ser explicadas claramente pelo espalhamento dos dados.

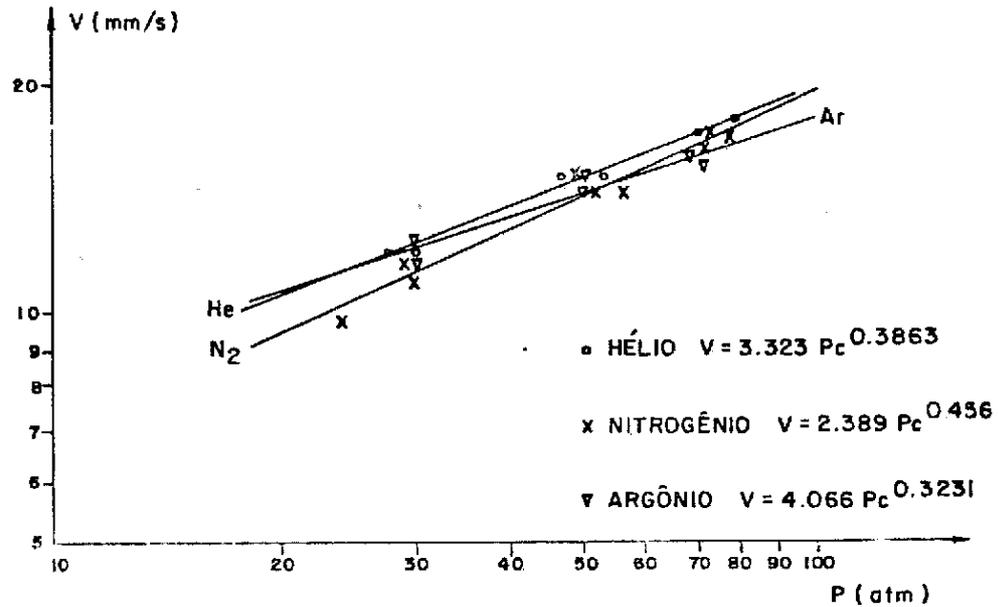


Fig. 4 - Curvas de velocidade de queima para pólvora de base dupla com a injeção do gás hélio, argônio e nitrogênio versus pressão.

#### 4 - CONCLUSÃO

Dos resultados obtidos na bomba de queima, pode-se concluir que o mecanismo controlador da velocidade de queima reside nas fases condensadas.

Tal conclusão indica que o aumento da velocidade de queima nos testes em motor foguete não ocorreu pela transferência de calor. Têm-se duas outras prováveis explicações: a) A injeção de gás na câmara de combustão criaria vórtices que seriam carregados pelo fluxo dos gases de combustão até a garganta da tubeira, o que causaria a redução da área de descarga dos gases, aumentaria a pressão da câmara que, por sua vez, aumentaria a velocidade de queima com uma nova elevação da pressão da câmara. Esse processo ocorreria até que o motor foguete encontrasse um novo ponto estável de operação. b) Com a injeção dos gases hélio e argônio, poder-se-ia alterar o balanço entre os processos térmicos e o difusivo da chama. Sabe-se (Sivashinky, 1985) que quando o número de Lewis ( $Le = \alpha/D$ , onde  $D$  é o coeficiente de difusão) do meio reativo é maior que ou igual a um, a chama é estável e se propaga na forma plana; quando  $Le$  é menor do que um, a chama é instá

vel e se propaga em forma irregular. O resultado dessa forma irregular na superfície do propelente sólido seria um aumento na área de queima, e dentro do motor foguete seria um aumento de pressão, assim o processo acima citado repete-se.

Dado o presente nível de conhecimento é impossível determinar qual das duas explicações é válida. Assim apresenta-se esse trabalho na expectativa de despertar o interesse da comunidade científica.

## BIBLIOGRAFIA

- CLINGMAN, W.H.; BROKAM, R.S.; PEASR, R.N. Burning velocities of methane with nitrogen-oxygen, argon-oxygen, and helium-oxygen mixtures. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMBUSTION, 4, Cambridge, Massachusetts, Sept. 1-5, 1953. Proceedings Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 1953, p. 310-313.
- FACHINI FILHO, F.; GILL, W. Modulação de empuxo para motor foguete a propelente sólido. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA, 3, São Paulo, 1986. Anais. São Paulo, maio 12-15, 1986.
- KUO, K.K.Y. *Principles of combustion*. New York, John Wiley & Sons, 1986. p. 298-314.
- MORGAN, G.H.; KANE, W.R. Some effects of inert diluents on flame speeds and temperatures. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMBUSTION, 4., Cambridge, Massachusetts, Sept. 1-5, 1953. Proceedings. Cambridge, Massachusetts Institute of Technology, 1953. p. 315-320.
- SIVASHINSKY, G.I. *Instabilities pattern formation, and turbulence in flame*; Notas de aulas dadas no Laboratório Nacional de Computação. Rio de Janeiro, 1985. Apostila.

**PROPOSTA PARA PUBLICAÇÃO**

DATA  
 28.04.87

IDENTIFICAÇÃO	TÍTULO	
	EFEITO DO GÁS INERTE NA QUEIMA DE PÓLVORA DE BASE DUPLA	
	AUTORIA Fernando Fachini Filho Walter Gill Wilfred Rudolf Lamm Lucy de Albuquerque Kimura	PROJETO/PROGRAMA ATDCP <hr/> DIVISÃO <hr/> DEPARTAMENTO DCP
DIVULGAÇÃO <input checked="" type="checkbox"/> EXTERNA <input type="checkbox"/> INTERNA    MEIO: I Simposio Brasileiro de Transferência de Calor e Massa.		COM 9 (RPE)

REVISÃO TÉCNICA	REVISOR TÉCNICO	APROVADO: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input type="checkbox"/> VER VERSO		APROVAÇÕES
	RECEBI EM: 26/5/87    REVISADO EM: 26/5/87 OBSERVAÇÕES: <input checked="" type="checkbox"/> NÃO HÁ <input type="checkbox"/> VER VERSO DEVOLVI EM: 26/5/87    ASSINATURA	DATA    CHEFE    DIVISÃO 28.04.87 <i>[Assinatura]</i>	APROVADO: <input checked="" type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO <input type="checkbox"/> VER VERSO DATA    CHEFE DEPARTAMENTO	

REVISÃO DE LINGUAGEM	Nº: 97    PRIORIDADE: 1    DATA: 29.4.87	DATILOGRAFIA
	REVISADO <input type="checkbox"/> COM <input type="checkbox"/> SEM    CORREÇÕES POR: <i>[Assinatura]</i> <input type="checkbox"/> VER VERSO DATA    ASSINATURA	

PARECER		DATA	RESPONSÁVEL/PROGRAMA
FAVORÁVEL: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	VER VERSO		

EM CONDIÇÕES DE PUBLICAÇÃO EM: 26/05/87    *[Assinatura]*  
 AUTOR RESPONSÁVEL

AUTORIZO A PUBLICAÇÃO: <input type="checkbox"/> SIM <input type="checkbox"/> NÃO	
DIVULGAÇÃO <input type="checkbox"/> INTERNA <input type="checkbox"/> EXTERNA	MEIO: _____
OBSERVAÇÕES: _____	
DATA	DIRETOR

SEC	PUBLICAÇÃO: _____ PÁGINAS: _____ ÚLTIMA PÁGINA: _____
	CÓPIAS: _____ TIPO: _____ PREÇO: _____