

Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Estudo de correlações em ensaios de velocidade de queima de propelente sólido compósito.

Bolsista: Gustavo Kiyomitsu Shimabukuro

Orientador(a): Luciene Dias Villar

Período a que se refere o relatório: agosto de 2013 a julho de 2014

Resumo

A determinação da velocidade de queima (V_b) para formulações de propelente sólido compósito constitui-se em um importante parâmetro de caracterização desse material. Tal parâmetro está relacionado com a pressão na câmara de combustão (P) por meio da equação $V_b = a \cdot P^n$, em que, a é uma constante e, n é o expoente de pressão. A determinação dessas constantes é realizada em ensaios de queima em Bomba Crawford e em banco de provas utilizando motores de pequena escala, denominados motores-teste. O presente projeto teve como objetivo analisar dados históricos de formulações de propelente compósito, correlacionando os parâmetros de velocidade de queima (a e n) entre os métodos de ensaio citados, de modo a quantificar as incertezas desses ensaios, e também a influência de fatores como a temperatura ambiente e envelhecimento natural na velocidade de queima.

1. Introdução

Os propelentes estudados foram do tipo compósitos (mistura heterogênea de combustível, oxidante, plastificante, agente de cura e catalisadores) de duas formulações, PSC01 e PSC02, sendo a principal diferença entre eles a presença do catalisador de queima óxido de ferro no PSC02, o que lhe confere maior velocidade de queima.^(1, 2)

Sendo a velocidade de queima (V_b) relacionada com a pressão na câmara de combustão (P) por meio da equação empírica $V_b = a \cdot P^n$, em que, a constante a é função da temperatura e, n está relacionado a estabilidade da queima, estes parâmetros são obtidos por meio de ensaios

de queima em Bomba Crawford (BC), usados para medidas de velocidade de queima, e ensaios em pequenos motores de avaliação balística, denominados motores-teste (MT).⁽¹⁾

Neste contexto, o trabalho teve como objetivo analisar e comparar os ensaios BC e MT, a fim de avaliar as correlações estatísticas entre os parâmetros a , n e V_b de ambos os ensaios, bem como a influência da temperatura ambiente e do tempo de envelhecimento.

2. Material e métodos

Foram utilizados dados disponíveis em relatórios de ensaio de motor-teste e Bomba Crawford, para levantamento de valores de a , n e V_b dos propelentes PSC01 e PSC02. Para o PSC01 foram compilados dados desde 2001 até 2012 e, para o PSC02, desde 2007 até 2012.

Após a coleta dos dados, apresentados no relatório parcial, iniciou-se um tratamento estatístico dos mesmos, com o auxílio dos programas Microsoft Excel[®] e OriginLab[®], para correlacionar os parâmetros dos ensaios de queima (BC e MT) por meio da comparação entre médias e da determinação dos intervalos de confiança.

Primeiramente foi verificado a normalidade dos dados de V_b , a e n de ambos os ensaios e formulações, tendo-se aplicado o teste de Shapiro-Wilk,⁽³⁾ no qual o p-valor deve ser maior que o nível de significância adotado ($\alpha = 0,05$) para uma distribuição normal. As médias provenientes de distribuição normal foram comparadas ou tiveram seus respectivos intervalos de confiança calculados. Para os dados que não apresentaram distribuição normal, foram calculadas os valores médios e desvios padrão. Além do teste de normalidade, a homogeneidade de variâncias foi também verificada pelo teste de Hartley,⁽³⁾ antes de se aplicar a comparação de médias, a fim de avaliar qual método a ser aplicado para a comparação de médias.

Adicionalmente foram estudados o efeito da temperatura ambiente e o efeito do envelhecimento natural (tempo de estocagem das amostras de propelente) sobre os parâmetros a , n e V_b para ambos os ensaios e formulações, tendo-se determinado o intervalo de confiança da correlação linear entre os parâmetros estudados.

3. Resultados

3.1 Teste de normalidade

As Figuras 1 e 2 apresentam a distribuição dos valores de a , n e V_b para os propelentes PSC01 e PSC02, respectivamente, obtidos a partir de ensaios em BC e em MT.

Para PSC01, o teste de normalidade de Shapiro-Wilk resultou em distribuição normal para todos os parâmetros (a , n e V_b), ao contrário do que aconteceu para motor-teste que não apresentou distribuição normal para parâmetro algum (Figura 1), impossibilitando a comparação de médias entre esses ensaios. Intervalos de confiança, utilizando a distribuição t e com 95% de confiança, foram calculados para os parâmetros de BC e, a média e desvio padrão para os parâmetros de MT (Tabela 1). Embora não se possa fazer uma comparação entre as médias dos parâmetros, foi observado que os valores médios foram muito próximos. Apenas o valor de a do MT não se encontra dentro do IC de BC.

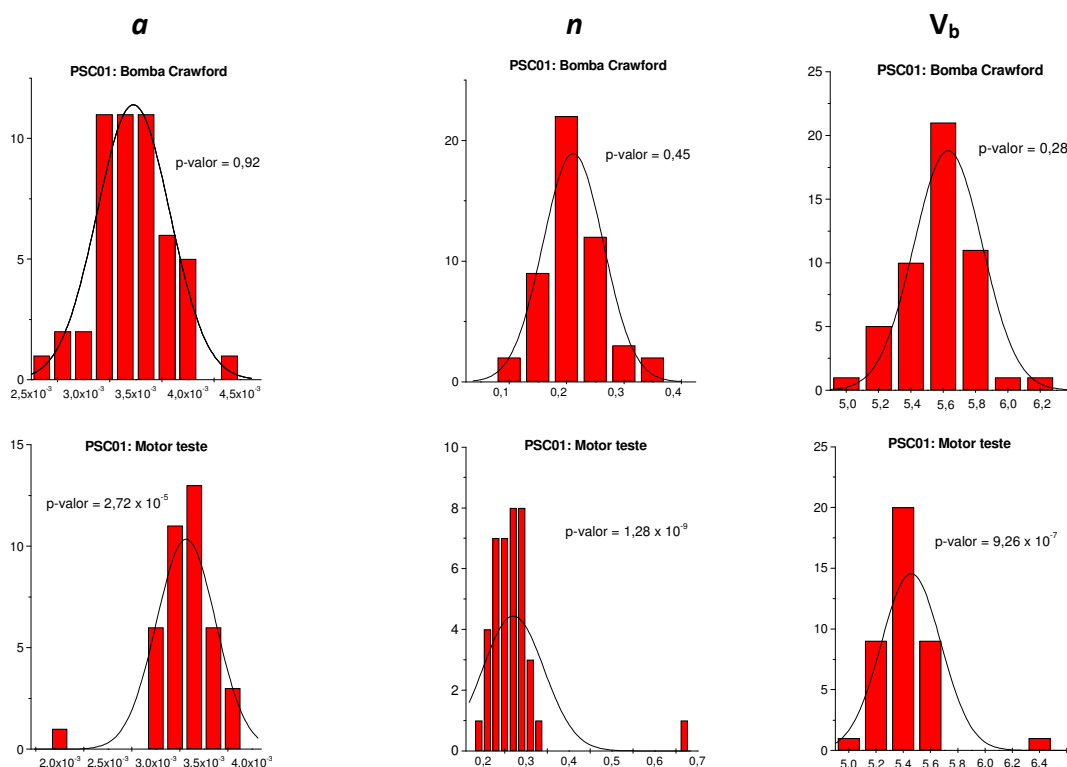


Figura 1. Distribuição de valores de a , n e V_b para PSC01 para os ensaios de BC e MT.

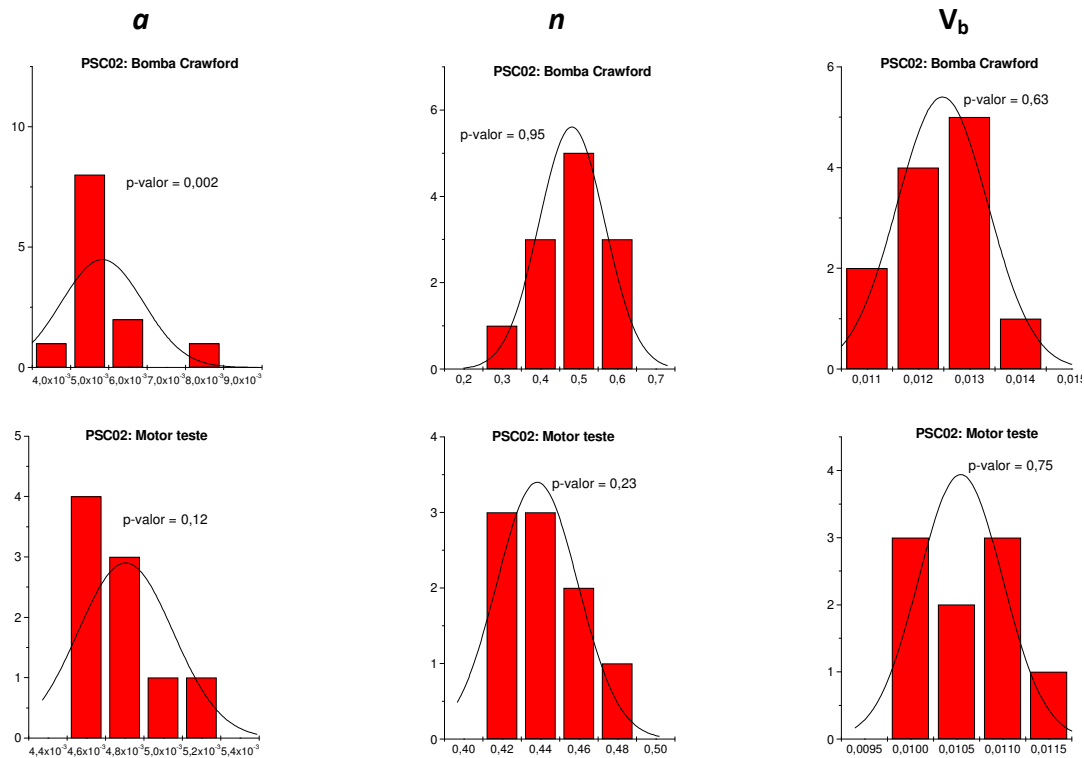


Figura 2. Distribuição de valores de a , n e V_b para PSC02 para os ensaios de BC e MT.

Tabela 1. Valor médio, desvio padrão e intervalo de confiança para a , n e V_b para PSC01.

Parâmetro	p-valor	Média	Desvio padrão	IC[μ]95%
Bomba Crawford				
V_b	0,28	0,0055	0,0002	$0,0054 \leq \mu \leq 0,0056$
a	0,92	0,0035	0,0003	$0,0033 \leq \mu \leq 0,0035$
n	0,45	0,26	0,05	$0,25 \leq \mu \leq 0,28$
Motor teste				
V_b	9,3E-7	0,0054	0,0002	---
a	2,7E-5	0,0033	0,0003	---
n	1,3E-9	0,27	0,07	---

Para PSC02, o parâmetro a do ensaio em BC não apresentou distribuição normal (Figura 2), sendo assim, foi calculado a média e desvio padrão e para o ensaio em MT foi determinado o intervalo de confiança (Tabela 2).

Tabela 2. Valor médio, desvio padrão e intervalo de confiança para parâmetro a do PSC02.

Ensaio	p-valor	Média	Desvio padrão	IC[μ]95%
BC	0,0019	5E-3	1E-3	---
MT	0,12	4,8E-4	0,0002	$0,0046 \leq \mu \leq 0,0050$

3.2 Comparação entre médias

Aplicando-se o teste de Hartley, obteve-se $F_{\text{calc}} \geq F_{\text{tab}}$ (Tabela 3), concluindo que o teste de comparação de médias a ser usado é o de variâncias diferentes.

Tabela 3. Teste de Hartley para parâmetros n e V_b para PSC-02.

Parâmetro	F_{tabelado}	$F_{\text{calculado}}$	
V_b	3,315	7,87E6	$F_{\text{calc}} \geq F_{\text{tab}}$
n	3,315	16,33	$F_{\text{calc}} \geq F_{\text{tab}}$

O teste de comparação entre médias é baseado na estatística t , em que calculamos um valor de t_{calc} (Equação 1) e comparamos com um valor de t_{tab} .

$$t_{\text{calc}} = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (1)$$

Em que, \bar{x} , média; s^2 , variância; n , número de dados; índices 1 e 2, ensaios BC e MT, respectivamente. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros n e V_b do PSC02. Para o parâmetro n , como $-t_{\text{tab}} < t_{\text{calc}} < +t_{\text{tab}}$, não há evidências de que as médias sejam diferentes. Para o parâmetro V_b , como $t_{\text{calc}} > +t_{\text{tab}}$, as médias são estatisticamente diferentes.

Tabela 4. Comparação entre médias para n e V_b do propelente PSC02.

Parâmetro	Ensaio	Média	s^2	n	$t_{\text{calculado}}$	t_{tabelado}	Comparação
n	BC	0,48	7,29E-3	12	1,70	2,11	$-t_{\text{tab}} < t_{\text{calc}} < +t_{\text{tab}}$
	MT	0,44	4,47E-4	9			
V_b	BC	0,0125	7,86E-7	12	6,72	2,11	$t_{\text{calc}} > +t_{\text{tab}}$
	MT	0,0105	2,08E-7	9			

3.3 Influência da temperatura e tempo de envelhecimento

A rigor, o estudo de correlações deve ser aplicado a dados com distribuição normal, porém como apresentado anteriormente (Figuras 1 e 2) isso não ocorreu para todos os conjuntos de dados. Ainda assim, as correlações foram calculadas, para que se obtivesse uma análise de tendência, atendendo à proposta inicial do projeto.

A Figura 3 apresenta as correlações dos parâmetros a e V_b com T_{amb} para os propelentes PSC01 e PSC02. O parâmetro a do ensaio em BC para PSC01 apresentou uma correlação significativa ($r=+0,4460$), o que indica maior sensibilidade à T_{amb} em relação ao motor-teste. Os parâmetros a e V_b do ensaio em BC para PSC02 apresentaram correlações ligeiramente positivas, sendo que V_b apresentou maior valor de correlação linear. Os ensaios em MT não apresentaram correlações significativas com a temperatura ambiente (T_{amb}).

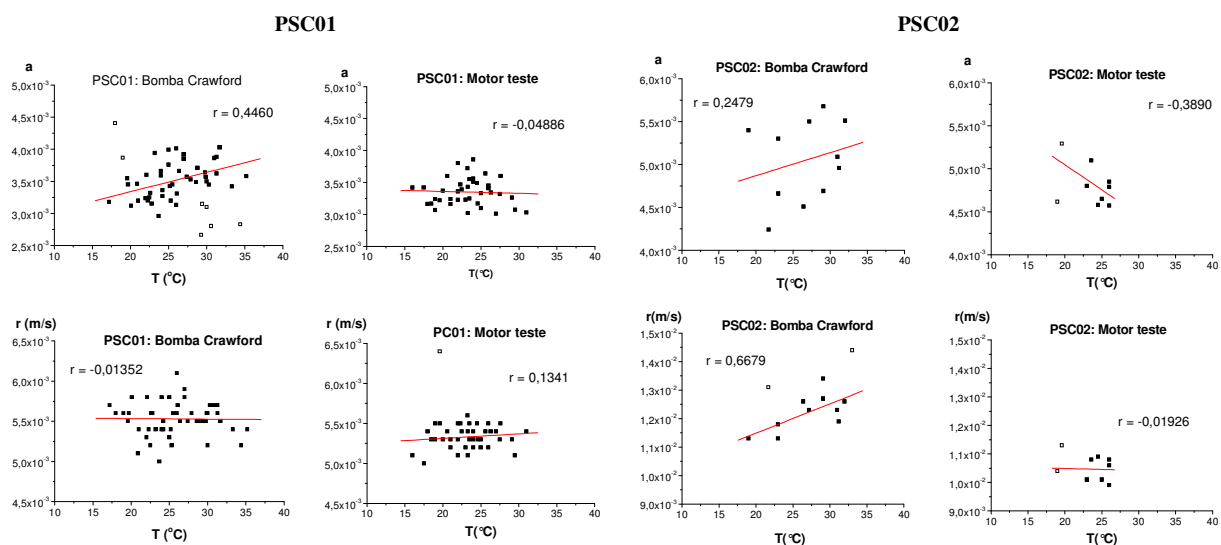


Figura 3. Correlação linear entre parâmetros a e V_b com a temperatura ambiente (T_{amb}).

A Figura 4 apresenta as correlações dos parâmetros a , n e V_b com o tempo de estocagem dos corpos-de-prova, à temperatura ambiente, para os propelentes PSC01 e PSC02. A partir dos valores de r , observou-se que o tempo de estocagem teve pouca influência sobre os parâmetros da equação da velocidade de queima, para ambas as formulações.

4. Conclusões

Apesar da compilação de dados de um período de mais de dez anos para PSC01 (2001 – 2012) e de seis anos para PSC02 (2007 – 2012), a ausência de distribuição normal para parte dos dados dificultou a aplicação dos testes estatísticos comumente empregados para comparação entre médias e determinação de correlações. Um estudo envolvendo ferramentas estatísticas mais avançadas demandaria maior tempo, estando fora do escopo deste projeto. Apesar disso, foi possível inferir tendências para os ensaios estudados.

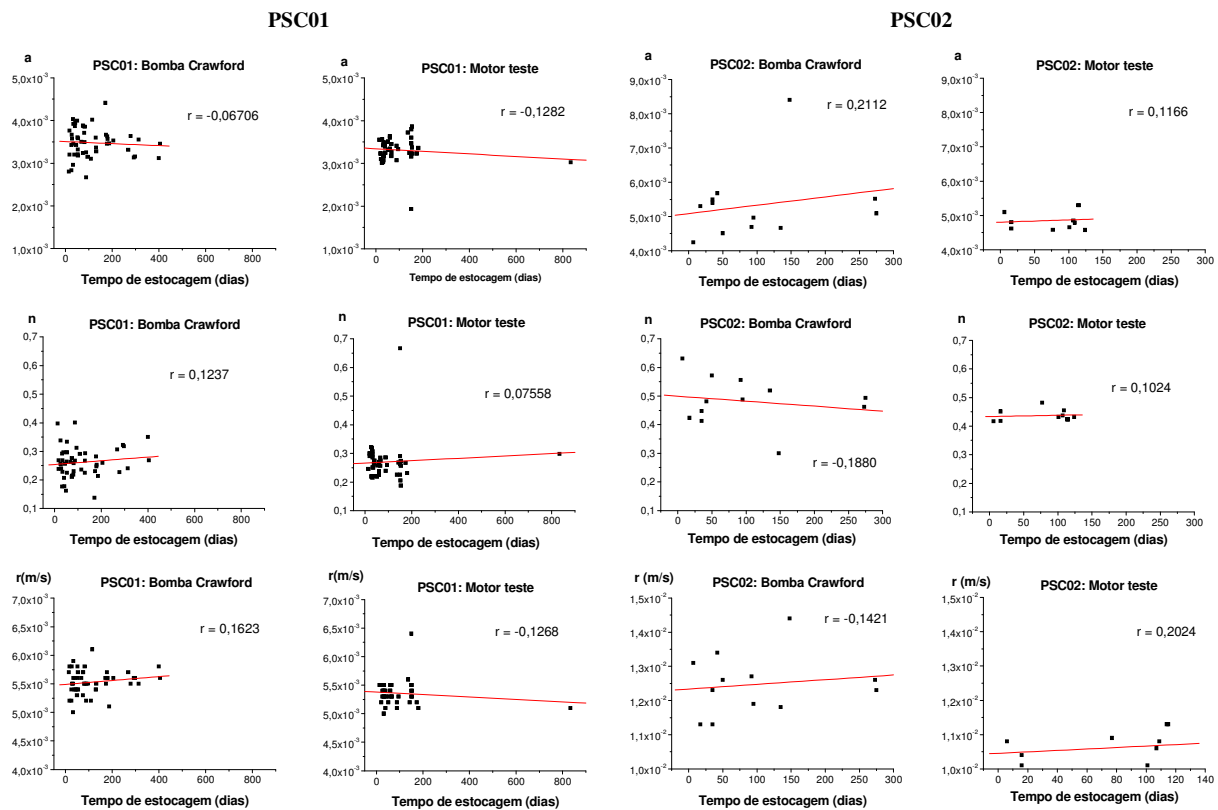


Figura 4. Correlação linear entre parâmetros a , n e V_b com o tempo de estocagem.

Dentre essas tendências destaca-se que, apesar da não possibilidade de comparação entre os ensaios BC e MT para PSC01, as médias apresentadas resultaram bem próximas, o que indica não haver diferença significativa entre eles. Para PSC02, a comparação entre médias não mostrou diferença significativa para o parâmetro n , apenas para V_b . A temperatura não apresentou influência significativa para os ensaios em motores-teste, mas apresentou para Bomba Crawford, sendo o parâmetro a mais sensível para PSC01 e V_b para o PSC02. O envelhecimento natural também não mostrou influência para os ensaios estudados, o que se constitui em uma vantagem para o desempenho do propelente.

Referências

1. CORRÊA, William Stanisce, **Estudo da sensibilidade térmica dos propelentes sólidos compostos do tipo HTPB/AP/AL**. 2005. 115f. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.
2. REZENDE, L.C. **Envelhecimento de propelente composto à base de polibutadieno líquido hidroxilado**. 2001. Tese - UNICAMP, Instituto de Química.
3. RODRIGUES, M.I.; IEMMA, A.F. **Planejamento de Experimentos e Otimização de Processo**. 2 ed. Campinas: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009. 358 p.