



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENADORIA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E INTEGRAÇÃO ACADÊMICA
PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E EM DESENVOLVIMENTO
TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO

Jeovan Cezare Correia

RELATÓRIO PARCIAL

INICIAÇÃO CIENTÍFICA:

PIBIC CNPq (x), PIBIC CNPq Ações Afirmativas (), PIBIC UFPR TN (), PIBIC Fundação Araucária (), PIBIC Voluntária (), PIBIC Ações Afirmativas Voluntária () ou PIBIC EM.

INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO:

PIBITI CNPq (), PIBITI UFPR TN (), PIBITI Funttel ou PIBITI Voluntária).

(Período no qual esteve vinculado ao Programa: 08/2015 a 07/2016)

**Estudar os efeitos de diversas composições e formas de preparo
de propelentes sobre o impulso total de motores-foguete**

Relatório Parcial apresentado à
Coordenadoria de Iniciação
Científica e Integração Acadêmica
da Universidade Federal do
Paraná - Edital 2015/2016 (ano de
início e término do Edital).

Carlos Henrique Marchi / DEMEC

CDF-19 Validação em propulsão e aerodinâmica de foguetes / 2012001871

CURITIBA
(2016)

1	Introdução.....	3
1.1	Propelente KNSu	3
1.2	Introdução aos propelentes sólidos e aplicação	4
2	A escolha do KNSu	5
2.1	Combustão.....	5
3	Métodos e equipamentos usados.....	6
3.1	Método padrão de fabricação do motor-foguete.....	6
3.2	Variação do método-padrão usado: tamanho médio do grão de oxidante e combustível.....	9
3.3	Variação do método-padrão usado: tempo de mistura.....	11
3.4	Variação do método-padrão usado: composição de oxidante e combustível sobre o desempenho.....	12
3.5	Tempo de estocagem	12
3.6	Variação do método-padrão usado: pureza dos componentes da mistura	13
4	Resultados.....	13
4.1	Testes preliminares de Referência	13
4.2	Influência do tempo de moagem de oxidante e combustível sobre o impulso total.	14
4.2.1	Pressão interna máxima por tempo de moagem	15
4.3	Influência do tempo de mistura sobre o impulso total.....	18
4.4	Influência do tempo de estocagem sobre o desempenho.....	19
4.5	Influência da composição de oxidante e combustível sobre o desempenho	19
4.6	Efeito da pureza sobre o desempenho	21
4.7	Efeito da pureza sobre o desempenho (novos testes)	21
5	Conclusões/Considerações Finais	22
6	Referências	23

Estudar os efeitos de diversas composições e formas de preparo de propelentes sobre o impulso total de motores-foguete

Resumo

O propelente KNSu é um propelente sólido feito com um oxidante (KNO_3) e um combustível ($C_{12}H_{22}O_{11}$). Atualmente, o motor-padrão (motor usado como referência de fabricação no projeto) é feito de Krista K (fertilizante) e açúcar comum. O método padrão usado para a sua fabricação é o de prensagem a frio, em que um punção prensa o propelente até ele virar um grão-propelente. As principais vantagens são o acesso, a manuseabilidade e o custo dos materiais para a sua fabricação.

Este relatório tem como objetivo comparar as diversas características de preparo do KNSU para propelente sólido em motor-foguete. Características tais como tempo de moagem, tempo de mistura, tempo de estocagem, – que inclui outros fatores, como umidade, efeito da degradação, etc – efeito da composição dos componentes da mistura e efeito da pureza dos componentes.

O propelente sólido é muito importante na área aeroespacial e existe muita aplicação nessa área, como será visto.

A condição atual de uso, estudo e teste do propelente é tema e introdução deste relatório. Existem estudos teóricos sobre a composição da mistura de propelente KNSu, método de fabricação e outras características que serão vistas neste relatório.

Os experimentos para determinar a influência das características de fabricação do propelente foram realizados e seus resultados publicados neste relatório. Como será detalhado, o aumento do tempo de moagem e o aumento do tempo de mistura tiveram uma influencia positiva no desempenho do propelente. Um valor mais próximo de 60% de Krista K se mostrou mais eficiente para a queima enquanto outro fator como a pureza do Krista K mostrou-se inconclusivo e outra característica, o tempo de moagem, mostrou-se irrelevante.

1 Introdução

1.1 Propelente KNSu

Esse relatório tem um objetivo principal: estudar os efeitos dos métodos de fabricação do propelente KNSu para motores-foguetes através de análises empíricas e comparar os resultados com esperado pela teoria e assim encontrar o melhor método para fabricação dos mesmos.

O propelente KNSu é um propelente sólido feito com um oxidante (KNO_3) e um combustível ($C_{12}H_{22}O_{11}$). Para estes componentes são usados Krista K e açúcar comum. O método usado para a sua fabricação é o método de prensagem a frio, em que um punção prensa o propelente

até ele virar um grão-propelente. Os principais motivos para adotar estes ingredientes e este método para a sua fabricação são: boa manuseabilidade, baixo custo, acesso fácil e segurança do Krista K e do açúcar. Em contrapartida são necessárias ferramentas especiais (punção e mandril) para a prensagem do motor o que dificulta mais pela questão do custo. Dependendo do tamanho de grão também é necessária uma prensa hidráulica.

1.2 Introdução aos propelentes sólidos e aplicação

Motores a propelente sólido existem em diferentes tamanhos, variando em empuxo de 2 Newtons para mais de 4 milhões de Newtons. Na maioria dos motores, não existem partes móveis, são bem mais simples do que motores líquidos e em geral, o motor constitui a maior parte da estrutura (Sutton & Biblarz, 2001). Não é possível, também, variar ou controlar o empuxo durante o vôo. A figura 1 mostra a imagem de um motor a propelente sólido.

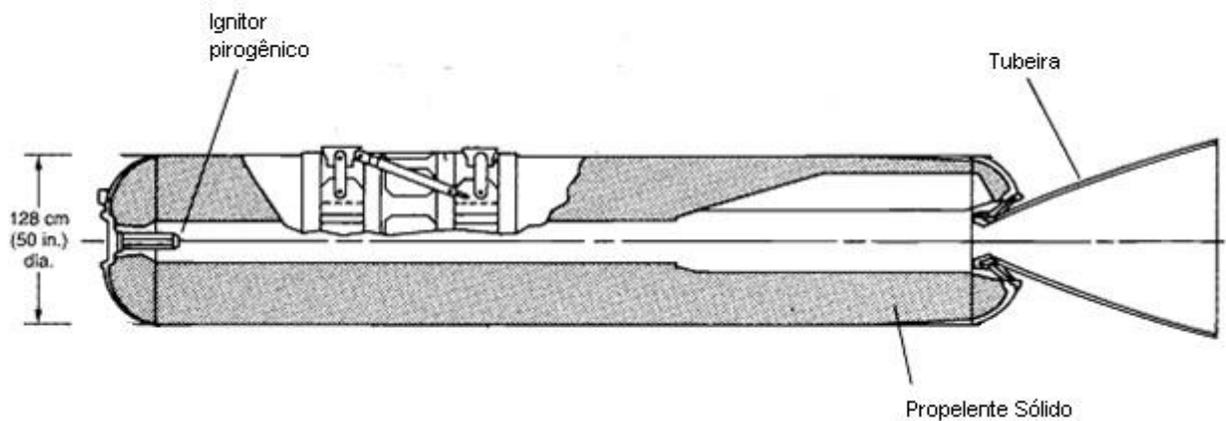


Figura 1 - Motor-foguete a propelente sólido. Fonte: Sutton, George Paul; Biblarz, Oscar. Rocket Propulsion Elements. 7. Ed.

A maior parte do veículo a propelente sólido é constituído pelo motor-foguete.

Na indústria aeroespacial, os motores a propelente sólido possuem muitas aplicações, tanto na área civil, quanto militar. Alguns exemplos são dados na tabela 1 (Sutton & Biblarz, 2001).

Tabela 1 – Aplicações de foguetes a propelente sólido

Categoria	Aplicação
Grandes impulsionadores	Veículos de lançamento espacial; estágios de descida de mísseis balísticos de longo alcance.
Motores de alta altitude	Estágio de subida de um míssil balístico de multiestágio; veículo de lançamento espacial.
Mísseis táticos	Alta aceleração; bombardeio de curto alcance; míssil antitanque.
Defesa de mísseis balísticos	Defesa contra longo e médio alcance de mísseis balísticos.

Em seguida, na tabela 2, são mostradas as características de um foguete e um míssil de propelente sólido.

Tabela 2 - Exemplos de Foguetes a propelente sólido

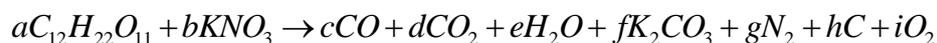
Característica	Primeiro estágio do míssil 'Minuteman' americano	Orbus-6
Empuxo máximo (kN)	896,32	105,87
Máxima pressão de câmara (Bar)	58,60	57,84
Impulso total (kNs)	4817	7,73
Composição		
NH_4ClO_4 (%)	70	68
Alumínio (%)	16	18
Outros aditivos (%)	14	14

2 A escolha do KNSu

O KNSu é um material com muitas vantagens e desvantagens. A principal vantagem é o acesso do Nitrato de potássio, através do Krista K e a sacarose, através do açúcar comum. Ele é um propelente usado por amadores da área e não é um propelente de alto desempenho. Possui alta segurança, boa manuseabilidade, não é tóxico ou corrosivo e possui baixo custo.

2.1 Combustão

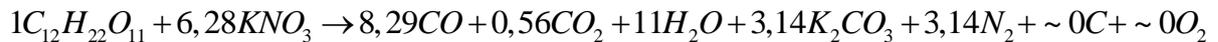
A equação de combustão assumida é baseada na reação de Nitrato de potássio com o oxigênio na decomposição da sacarose com o aquecimento. A equação assumida da combustão é:



onde os coeficientes a à i são dependentes da razão de oxidante/combustível.

A razão de oxidante/combustível definida como o padrão de teste é de 65/35 (Nakka, 1984). Ela é baseada em resultados práticos e teóricos de desempenho do propelente.

Para esta relação anterior, os coeficientes anteriores ficaram como mostrado abaixo.



As condições de testes que acabaram determinando a melhor relação de O/C (oxidante x combustível) para este propelente eram diferentes das condições feitas até então. Pressão, temperatura de chama, método de fabricação, procedência dos componentes e outras características são diferentes da literatura em que foi baseada e provavelmente causará mudanças no método até então usado.

3 Métodos e equipamentos usados

O método usado na literatura para a fabricação do grão inclui a fundição do propelente e a moldagem dele, ou seja, ele é derretido e então depositado no tubo que será o motor-foguete, com um negativo que seria a alma, como em um processo de fundição. Entretanto, por motivos de segurança foi decidido não usar este método, que envolve altas temperaturas, com um risco de combustão e explosão. Além do mais, o método atual usado tem mostrado facilidade em controlar as características de fabricação, como por exemplo, a massa. Assim, a sua repetibilidade está atendendo as expectativas.

O método que foi usado foi o de prensagem a frio. Ele é mais seguro, porém necessita de ferramentas especiais para poder ser usado. No caso, um punção que prensa o propelente até ele virar um grão-propelente, um mandril que serve de alma e uma base que se encaixa no tubo que guia o mandril e evita a saída de propelente. O motor em que é feito os testes é um tubo de PVC soldável NBR5648. A pressão máxima de trabalho possível pela norma fica algo em torno de 100 Bar e 120 Bar e como será visto, está muito acima da máxima pressão de trabalho. Portanto, a chance de romper o tubo, para este conjunto de teste, é praticamente nula. Porém a chance de ejetar a tampa, que se rompe do tubo por cisalhamento, é considerável (*mais detalhes ver tópico 4.2.1*).

3.1 Método padrão de fabricação do motor-foguete

A primeira etapa consiste em fabricar o propelente. Como pré-estabelecido, a mistura deve ser a relação de combustível/oxidante em massa de 35/65. Assim, separadamente é moída a quantidade necessária de ambos os componentes. O tempo padrão para a moagem deles é de 30s.

Depois de moído, mistura-se na proporção correta ambos. Agitam-nos por cerca de 15min. A massa padrão de mistura é de cerca de 300g, mas nos testes tem adotado o valor necessário

de massa usado para evitar desperdícios. Em cada motor é necessário 10g, assim faz o necessário para a quantidade de motores queimados em cada teste.

A segunda etapa é a etapa da prensagem até certo tamanho de grão dentro do tubo PVC. Para uma mesma quantidade de massa de propelente é usado aproximadamente o mesmo tamanho de grão. Antes da prensagem é medida a quantidade necessária de propelente e a massa dos tubos. Para melhorar a precisão da medição, é feita a subtração da massa final depois de prensado com a massa do tubo e assim tem-se a massa líquida de propelente. Deste modo, evita-se contar a massa de propelente que cai durante a prensagem ou fica preso no punção. Para prensar o propelente é preciso fixar o conjunto das ferramentas entre as placas paralelas da morsa com uma força determinada experimentalmente, como mostrada na figura 2. Esta força é empírica – normalmente no início da deformação do tubo de PVC deixa-se de girar o braço da morsa e deixa o propelente neste estado por 5 segundos e então retira o motor da morsa (ao deixar de girar a morsa a força para de aumentar).

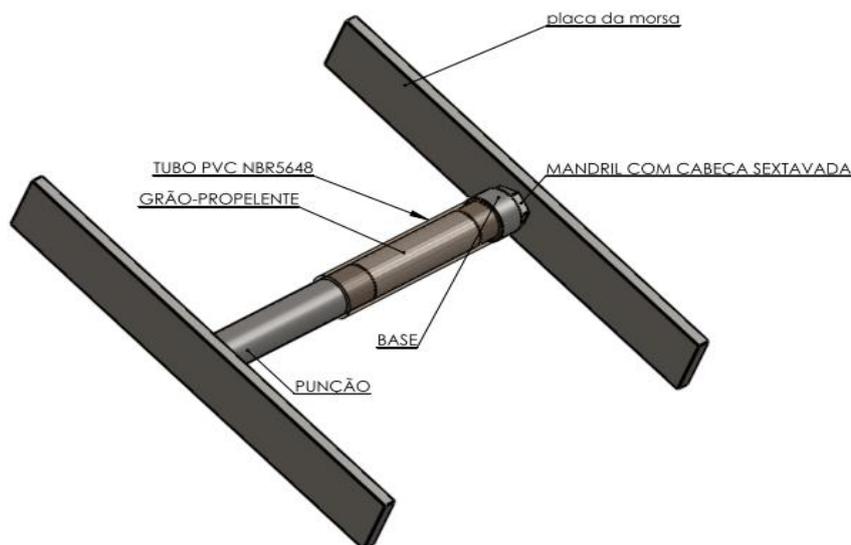


Figura 2 - Representação artística da prensagem

Dentro do mandril é encaixada a base (fig. 4). A seguir encaixa-se o tubo. Depois se coloca a quantidade necessária de propelente. A etapa seguinte é a da prensagem. A base do punção e a base da ferramenta hexagonal estão na placa da morsa, onde ele deve ser prensado. O propelente é prensado até adquirir uma massa específica necessária para ser qualificado como um grão-propelente.

Após a prensagem, uma chave inglesa (Spanner) é usada para retirar o mandril do grão propelente recém-formada.



Figura 3 - Motores Construídos

Para a medição da massa de propelente e do motor-foguete foi usado uma balança Marte AY220. Para a medição do tamanho de grão e tamanho do motor-foguete foi usado um paquímetro LeeTools com faixa de medição de até 150 mm.

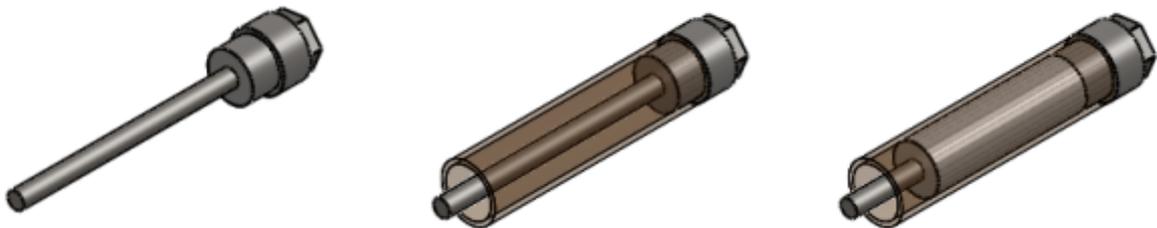


Figura 4 – Da esquerda para a direita: mandril encaixado na base, tubo PVC encaixado na base, propelente dentro do tubo PVC ainda não prensado.

O impulso total é a medida usada para comparar os efeitos das mudanças na fabricação em relação ao método padrão. Quanto maior for o impulso total, maior será o desempenho. O impulso total é o produto da força exercida sobre a célula de carga pelo tempo total de queima. Ele é uma medida essencial na área de foguetes. Para determinar o impulso total é preciso uma célula de carga para medir a força e variação desta com o tempo, como mostrado na figura 5. Então com um aplicativo que calcula a área desta relação é possível medir o impulso total durante aquele intervalo.



Figura 5 - Teste do motor-foguete. Célula de carga na direita.

Este método de prensagem empregado é denominado método de prensagem a frio e é mais seguro do que o método de fabricação fundido, pois não envolve aquecimento – o único aquecimento ocorre na retirada do negativo da alma depois de prensado, sendo que a temperatura máxima não ultrapassa os 50°C.

Devido a esta diferença no método de fabricação do grão-propelente e outras características em relação à literatura, tornou-se necessário fazer testes para determinar as melhores características nestas condições, ou seja, a condição de fabricação em que o propelente atinge o melhor desempenho. As seguintes características de fabricação devem ser testadas, pois elas influenciam em menor ou maior grau no desempenho do propelente

Quantidade de oxidante → teste do efeito da composição (tópico 4.5)

Força de prensagem → Não testado

Tamanho do grão do oxidante → teste do efeito do tempo de moagem (tópico 4.2)

tempo de mistura de propelente → teste do efeito do tempo de mistura (tópico 4.3)

Efeitos da umidade;
Efeitos da degradação com o tempo; } → efeito do tempo de estocagem (tópico 4.4)

Efeito da pureza do oxidante (KNO_3)

e do combustível $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ → teste do efeito da pureza (tópico 4.6 e 4.7)

3.2 Variação do método-padrão usado: tamanho médio do grão de oxidante e combustível

A diminuição do tamanho médio de grão de oxidante e combustível ocorre quando o tempo de moagem aumenta (Sutton, 2001). Assim, foram testados vários tempos de moagem diferentes para todas as outras características padrão. A diminuição do tamanho médio de grão aumenta a

taxa de queima e o impulso total final. Portanto é de se esperar que o aumento do tempo de moagem aumente o impulso total e assim, o desempenho do propelente.

O procedimento de fabricação foi igual ao padrão exceto pelo tempo de moagem ter sido maior.

Na tabela 3 há alguns dados médios de massa de propelente, massa total, tamanho de grão e massa específica para este teste em específico e suas respectivas repetibilidades.

Tabela 3 - Valores iniciais para o teste do tempo de moagem

Característica	Média	Repetibilidade/Média
Massa de propelente (g)	10,04	1,97%
Comp. Grão (mm)	35,37	6,78%
Massa total (g)	40,55	4,43%
Massa específica (kg/m ³)	1495,24	7,17%

Para o cálculo da repetibilidade toma o conjunto de dados e calcula-se o seu desvio padrão amostral.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad \text{Eq. 1}$$

Onde s é o desvio padrão amostral, x_i são os valores individuais da característica que está sendo medida o desvio padrão, \bar{x} é a média do conjunto e n é o número de amostras.

A repetibilidade seria dada pela equação 2.

$$Re = s \times t \quad \text{Eq. 2}$$

Onde t é o coeficiente t de student, que varia em relação à probabilidade da indicação estar dentro de certo valor em uma distribuição gaussiana e com o número de graus de liberdade (número de indicações menos um).

Para um número infinito de medições, $t=2$. Mas para um número finito, $t>2$. Assim para 12 medições e com uma probabilidade de 95,45%, $t=2,255$. Para 3 medições, $t=4,527$ (Albertazzi; Sousa) e assim por diante, sendo necessário modificar o valor t de student nos cálculos sempre que o número de medições mudar.

A indicação da tabela da repetibilidade dividido pela média é um número adimensional e mostra o quanto é necessário acrescentar e diminuir da média para garantir com uma certeza de 95,45% o valor real do experimento.

Assim, valores altos de repetibilidade/média é indesejável.

Estes foram alguns dados necessários obtidos antes do teste estático para verificar a influência do tempo de moagem com o impulso total. Foi variado o tempo de moagem e depois feito o teste estático de 12 motores.

Os motores testados foram os seguintes:

- Três motores cujos oxidantes e combustíveis, antes da mistura do mesmo, possuem tempo de moagem de 15s e exceto por isso, possuem fabricação idêntica à padrão;
- Três motores cujos oxidantes e combustíveis, antes da mistura do mesmo, possuem tempo de moagem de 30s, ou seja, fabricação idêntica à padrão;
- Três motores cujos oxidantes e combustíveis, antes da mistura do mesmo, possuem tempo de moagem de 60s e exceto por isso, possuem fabricação idêntica à padrão;
- Três motores cujos oxidantes e combustíveis, antes da mistura do mesmo, possuem tempo de moagem de 120s e exceto por isso, possuem fabricação idêntica à padrão;

O propelente foi feito na hora, exceto o propelente para os motores cuja fabricação era idêntica à padrão.

3.3 Variação do método-padrão usado: tempo de mistura

O tempo de mistura aumenta a velocidade de difusão das moléculas do oxidante e do combustível na medida em que homogeneiza a mistura e aumenta a área total de contato entre os dois ingredientes (Callister, 2001). O tamanho de grão também melhora a difusão e conseqüentemente o desempenho do propelente.

Os valores de massa de propelente, massa total, comprimento de grão e massa específica estão na tabela 4.

Tabela 4 - Valores para o teste do tempo de mistura

Característica	Média	Repetibilidade/Média
Massa de propelente (g)	10,00	1,09%
Comp. Grão (mm)	35,23	7,12%
Massa total (g)	42,20	3,28%
Massa específica (kg/m ³)	1495,78	7,37%

Os motores testados foram os seguintes:

- Três motores cujos tempos de mistura foram de 5 min e exceto por isso, possuem fabricação idêntica à padrão;
- Três motores cujos tempos de mistura foram de 15 min e por isso, possuem fabricação idêntica à padrão;
- Três motores cujos tempos de mistura foram de 45 min e exceto por isso, possuem fabricação idêntica à padrão;
- Três motores cujos tempos de mistura foram de 135 min e exceto por isso, possuem fabricação idêntica à padrão;

O propelente necessário para todos os motores foi feito na hora, em um ambiente sem controle de umidade ou temperatura. Porém depois de prensado é feito o controle de umidade.

3.4 Variação do método-padrão usado: composição de oxidante e combustível sobre o desempenho

Como já citado, a relação entre oxidante (KNO_3) e combustível ($C_{12}H_{22}O_{11}$) é determinado experimentalmente na literatura, mas ele fica próximo da estequiométrica. Porém, na literatura o método de fabricação e o grau de pureza dos componentes da mistura são diferentes dos usados neste projeto. Assim, a fabricação do propelente fica muito mais empírica e isso inclui a composição da mistura para a formação do propelente. Na tabela 5 estão as medidas dos motores referentes à este teste.

Tabela 5 - Valores para o teste do efeito da composição

Característica	Média	Repetibilidade/Média
Massa de propelente (g)	10,09	4,36%
Comp. Grão (mm)	35,96	5,04%
Massa total (g)	39,41	7,68%
Massa específica (kg/m ³)	1478	5,77%

Os motores testados foram os seguintes:

- Três motores com 65% de (KNO_3).
- Três motores com 60% de (KNO_3).
- Três motores com 55% de (KNO_3).
- Três motores com 70% de (KNO_3).
- Três motores com 75% de (KNO_3).
- Três motores com 80% de (KNO_3).

Todos os motores foram feitos entre os dias 28/04 e 04/05 e os testes em 05/05.

3.5 Tempo de estocagem

Foi notado que testes feitos com propelentes antigo e novo davam diferentes resultados. A umidade, a oxidação espontânea do propelente, entre outros fatores poderiam influenciar o desempenho do da queima do propelente. Então, foram feitos então testes para comparar o efeito destes fatores, usando apenas a variação de tempo de estocagem para motores fabricados no mesmo dia.

Na tabela estão as características dos motores antes da queima.

Tabela 6 - Valores para o teste do tempo de estocagem

Característica	Média	Repetibilidade/Média
Massa de propelente (g)	10,05	2%
Comp. Grão (mm)	35,00	0%
Massa total (g)	41,50	2%
Massa específica (kg/m ³)	1511	2%

Os motores testados foram os seguintes:

- 21 motores padrões (*ver tópico 3.1*)

Todos os motores foram fabricados no dia 30/3 e testados em diferentes datas (*ver resultados em 4.4*).

3.6 Variação do método-padrão usado: pureza dos componentes da mistura

Foi usado como procedimentos padrão, Krista K e açúcar comum, ou seja, KNO₃ e sacarose não purificada. Na literatura, é usado nitrato de potássio e sacarose purificados. Com o aumento da pureza das substâncias, a quantidade de (KNO₃) e (C₁₂H₂₂O₁₁) da mistura aumenta e assim o desempenho do propelente aumenta. Para confirmar isso, foram testados 12 motores, 6 com (KNO₃) e (C₁₂H₂₂O₁₁) purificados e outros 6 padrões (não purificados).

Na tabela estão as características dos motores antes da queima.

Tabela 7 - Valores para o teste da pureza

Característica	Média	Repetibilidade/Média
Massa de propelente (g)	9,93	5%
Comp. Grão (mm)	36	0%
Massa total (g)	41,40	8%
Massa específica (kg/m ³)	1451,7	5%

Todos os motores fabricados em 08/06/16 e testados em 09/06/2016. As características de fabricação dos motores foram iguais ao do motor-padrão, exceto a pureza dos componentes.

4 Resultados

4.1 Testes preliminares de Referência

Foram feitos 8 testes preliminares de acordo com o procedimento padrão como uma referência de impulso total e também para garantir um comprimento de tampa e tubeira mínimo.

Comprimentos foram variados de 25 a 10 mm. Em todos os testes a tampa e a tubeira resistiram. Na tabela 8 há valores médios de massa de propelente, massa específica e impulso total.

Tabela 8 - Resultados dos testes preliminares

	Média	Repetibilidade/Média	Erro*
Impulso total (Ns)	6,509	18,1%	1,5
Massa de propelente(g)	10,120	3,6%	0,47
Massa específica (kg/m ³)	1524,218	5,8%	99

*Valor maior menos o valor menor nos testes.

4.2 Influência do tempo de moagem de oxidante e combustível sobre o impulso total

Depois de construído os motores eles foram testados, como pode ser visto na fig. 5. Uma célula de carga mediu a força deles, conforme ele queimava e os produtos da combustão saíam pela sua tubeira.

Os resultados para o teste que variava o tamanho médio de grão estão na tabela 9.

Tabela 9 - Resultado do teste do tempo de moagem

Tempo de moagem	Impulso total Médio	Erro	Repetibilidade/Média	Aumento em relação à Referência*
15s	7,70	0,33	10,13%	+5%
30s	7,33	0,42	14,03%	Referência
60s	7,90	-	-	+8%
120s	8,47	0,71	26,85%	+16%

*Referência: tempo de estocagem de 16 dias.

Conforme o tempo de moagem aumenta o mesmo ocorre com o impulso total. Para o tempo de moagem de 30s ele diminuiu, mas isto se deve ao efeito de má conservação do propelente, já que não foi feito na mesma data que os demais e não foi guardado no antimofa, que retira a umidade do ambiente. De fato, ele foi feito há mais de duas semanas do teste e isto causou a perda do desempenho.

A comparação entre a referência e estes valores mostra um aumento em todos os casos. Mas as condições em que foram fabricados foram diferentes. De fato, entre a fabricação do propelente e o teste nos primeiros testes, houve um tempo de mais de três semanas e assim o propelente pode ter acumulado umidade.

Na figura 6 é possível ver este efeito, excluindo da análise o tempo de moagem de 30s, de modo a excluir os efeitos de umidade do propelente.

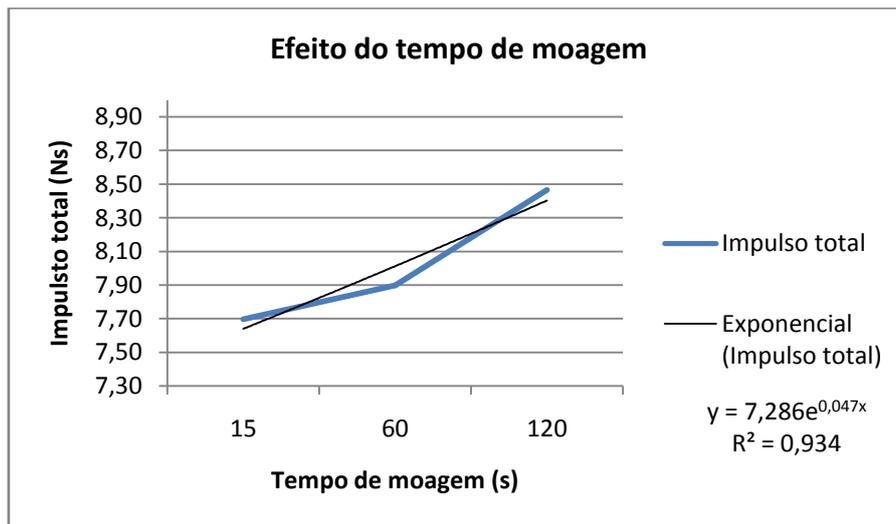


Figura 6 - Efeito do tempo de moagem

Ou seja, houve aumento de cerca de 16% no impulso total em relação ao impulso correspondente ao menor tempo de moagem.

Um número maior de testes deve ser feito para confirmar a tendência da melhora do desempenho do propelente com a diminuição do tamanho de grão e qual o limite desta melhora.

Um obstáculo para melhorar os dados destes testes tinha sido a resistência do motor. A resistência do motor tinha sido definida para certa pressão interna, que foi aumentada por causa da diminuição do tamanho de grão. Assim, muitos testes falharam, pois a tampa do motor ejetou, despressurizando o motor e conseqüentemente anulando o empuxo instantâneo. Assim, para o tempo de moagem de 60s, por exemplo, não há dados de repetibilidade, pois apenas um dos três motores não ejetou a tampa. Para o tempo de moagem de 120 s, um motor falhou e assim a repetibilidade ficou grande, tornando incerta a precisão do experimento. Porém, o menor resultado para este tempo de moagem ficou acima dos demais mínimos dos impulsos totais para outros tempos de moagem, então parece certo dizer que o impulso total está aumentando conforme o tamanho de grão diminui.

4.2.1 Pressão interna máxima por tempo de moagem

A tampa é o lugar crítico para as falhas, já que possuem um comprimento menor. Para este conjunto de testes, a tubeira possuía sempre 25 mm e a tampa possui 20 mm, pois um conjunto de testes preliminares com vários tamanhos de tampas e tubeiras foram feitos e foi visto que esse valor atendia muito bem. Porém devido à melhora nas propriedades do propelente, já neste primeiro teste a tampa ejetou para tamanhos menores de grão do que a média usada. Assim, é importante estimar uma pressão interna no motor e estimar a tensão máxima que ocorreu na falha e a tensão de falha da adesão entre a tampa e o PVC. Na tabela 10 estão listados os valores de pressão máxima por tempo de moagem, juntamente com a sua repetibilidade.

Tabela 10 - Resultado da pressão máxima do teste de tempo de moagem

Tempo de moagem	Pressão Máx (Bar) - Média	Repetibilidade/Média
15s	10,72	13,59%
60s	14,74	22,11%
120s	20,87	123,30%

Se o número de Machi, determinado for maior que 1, então calcula-se o fluxo de massa, a velocidade de ejeção e a pressão na garganta. Se for menor que 1, apenas o fluxo de massa e a velocidade de ejeção e a pressão na garganta é assumida como a ambiente. Então com os valores de empuxo (força gerada) acha-se a pressão em cada ponto. Calcula-se a equação da pressão de estagnação pela equação 3, onde F é o empuxo, \dot{m} é o fluxo de massa, v_e é a velocidade do gás que deixa a tubeira, e p_e é a pressão que deixa a tubeira, p_{amb} é a pressão ambiente, A_e é a área da saída dos gases que deixam a tubeira

$$F = \dot{m}v_e + (p_e - p_{amb})A_e \quad \text{Eq. 3}$$

A figura 7 mostra a tendência de aumento da pressão com o tempo de moagem.

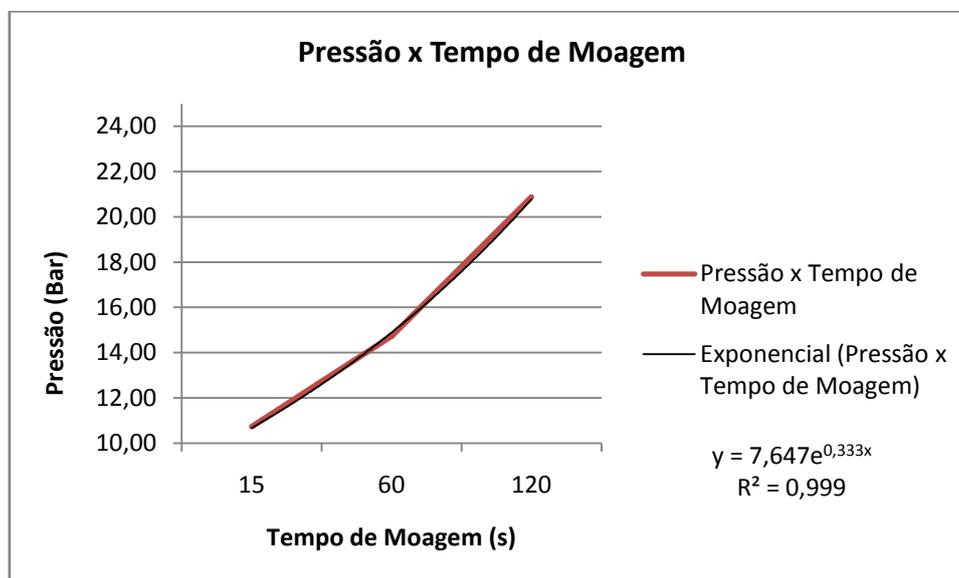


Figura 7 - Relação entre pressão e tempo de moagem

Apesar do último conjunto de testes ter uma média de pressão máxima de 20,87 Bar com uma falha entre três motores, a sua repetibilidade está muito alta para considerar alguma coisa. Nos três motores que foi testado o tempo de moagem de 60s, apenas um falhou. Assim parece razoável dizer que a tampa resiste a uma pressão interna de cerca de 15 Bar.

Como a pressão aplicada sobre a face da tampa deve ser resistida apenas pela tensão de cisalhamento e esta está distribuída sobre a superfície do cilindro da tampa, então a área de distribuição da carga está localizada na área $A = \pi DL$, onde L é o comprimento da tampa D é o seu diâmetro.

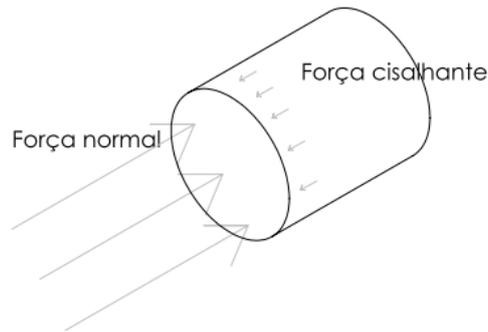


Figura 8 - Equilíbrio de forças na tampa

Pela distribuição e equilíbrio de carga atuante na tampa, existe uma força normal causada pela pressão normal e uma força se contrapondo causada pela tensão cisalhante (τ_{cis}), como mostrado na figura 8. Esta é a força necessária para manter a tampa lá.

Como a força cisalhante deve ser a mesma da força normal e supõe-se a pressão máxima normal (P_n) de 1,5 MPa, então,

$$\begin{aligned}
 P_n A_n &= \tau_{cis} A_{cis} \\
 \tau_{cis \max} &= P_n \frac{A_n}{A_{cis}} \\
 &= \frac{P_n \pi D^2}{4 \pi D L} \\
 &= \frac{P_n D}{4 L}
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 4}$$

onde A_n é a área normal da tampa e A_{cis} , a área lateral da tampa. Assim, substituindo os valores para achar a tensão de cisalhamento máximo,

$$\begin{aligned}
 \tau &= \frac{P_n D}{4 L} \\
 \tau &= \frac{1,5 \times 16,8}{4 \times 20} = 0,315 MPa
 \end{aligned}$$

do mesmo modo, para achar o valor do comprimento de tampa necessário, dado a tensão de cisalhamento da tampa, manipula-se a equação 1,

$$L = \frac{P_n D}{4\tau} \quad \text{Eq. 5}$$

por facilidade, é achada uma equação empírica que torna mais direto achar o comprimento de tampa no futuro dado a pressão normal:

$$L = \frac{P_n D}{4\tau} = \frac{P_n \times 16,8}{4 \times 0,315}$$

$$L_{\min}(P_n) = 13,33P_n \quad \text{Eq. 6}$$

sendo L dado em mm e P_n em MPa.

4.3 Influência do tempo de mistura sobre o impulso total

Depois dos testes para determinar a influência do tamanho do grão, foi feito um teste para determinar a influência do tempo de mistura. Assim, seguindo o mesmo procedimento padrão exceto para este caso, como explicado na seção 3.3, foi testado os motores, exatamente como explicado na seção anterior. A tabela 11 mostra os valores médios de impulso total e o aumento em relação à referência para cada tempo de mistura.

Tabela 11 - Resultado do Impulso total variando o tempo de mistura

Tempo de mistura (min)	Impulso total – Média (Ns)	Erro (Ns)	Repetibilidade/Média	Aumento em relação à Referência
5	7,03	0,12	4,14%	-1%
15	7,11	0,91	32,42%	referência
45	7,25	0,77	24,96%	+2%
135	7,28	0,54	16,80%	+2%

Devido à alta repetibilidade é difícil confirmar a tendência de aumento do impulso total. Além do mais o tempo de mistura é alto e dificilmente é feito em menos de um dia. Por causa disso, o tempo de degradação do propelente e o efeito da umidade devem ser negativos o suficiente para anular os ganhos pelo aumento do tempo da mistura. Mais testes deverão ser feitos para confirmar ou refutar esta hipótese. Na figura 9 é possível ver a tendência de aumento do impulso total com o tempo de mistura mais claramente.

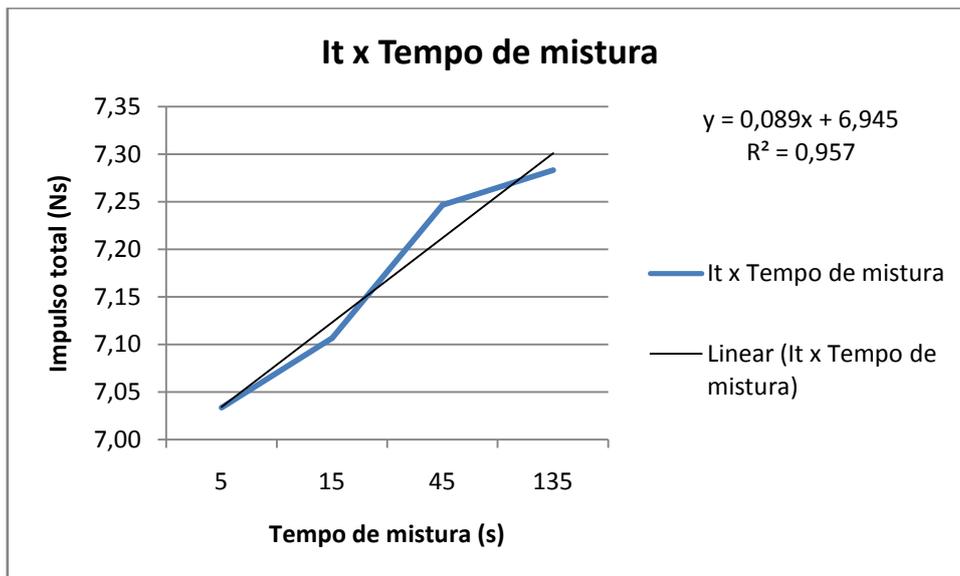


Figura 9 - Impulso total em função do tempo de mistura

4.4 Influência do tempo de estocagem sobre o desempenho

Paralelamente a todos os testes feitos anteriormente, foram feitos testes para determinar se o tempo de estocagem dos motores era relevante. Foram realizados até a data de elaboração deste relatório 12 testes nas datas de 15/04/16, 05/05/16, 09/06/2016, 16/07/2016, e em cada data foram realizados 3 testes (dados dos motores em tópico 3.5).. Todos os motores foram estocados em um ambiente com pouca umidade e todos mantiveram a sua integridade original. Na tabela 12 estão os resultados dos testes feitos até o momento.

Tabela 12 Resultados da influencia do tempo de estocagem

Tempo de estocagem (dias)	Impulso total – Média (Ns)	Erro (Ns)	Repetibilidade/Média	Aumento em relação à Referência
16	6,58	0,23	9%	Referência
36	6,62	0,78	26%	0,6%
71	6,31	0,31	11%	-4%
108	6,59	0,30	11%	0,2%

Houve pouca ou nenhuma diferença em relação ao teste com menos dias de estocagem. Assim, é razoável supor que não existe influência devido à degradação do propelente com o tempo, se o ambiente tiver a umidade controlada, como foi o caso dos testes.

4.5 Influência da composição de oxidante e combustível sobre o desempenho

Para determinar a influencia da composição da mistura, foram feitos 18 testes, em grupos de 3 motores, cada grupo contendo uma composição diferente. Todas as demais características dos motores são iguais a do motor-padrão. Na tabela 13 estão os resultados dos testes.

Tabela 13 - Resultado do Impulso total variando o tempo de mistura

%Krista K	Impulso total – Média (Ns)	Erro (Ns)	Repetibilidade/Média	Aumento em relação à Referência*
65	6,54	0,51	18%	Referência
60	6,62	1,02	37%	1%
55	5,68	0,62	25%	-13%
70	3,09	1,67	140%	-53%
75	0	-	-	-
80	0	-	-	-

*referência: 65% de Krista K

Como pode ser visto, para misturas acima de 70% de (KNO_3) a combustão não ocorre. Fazendo uma interpolação polinomial de grau 2, conforme visto na figura 10 , pode ser visto que o valor máximo pode ocorrer entre os valores 60 e 65%, não 65% como pensado anteriormente.

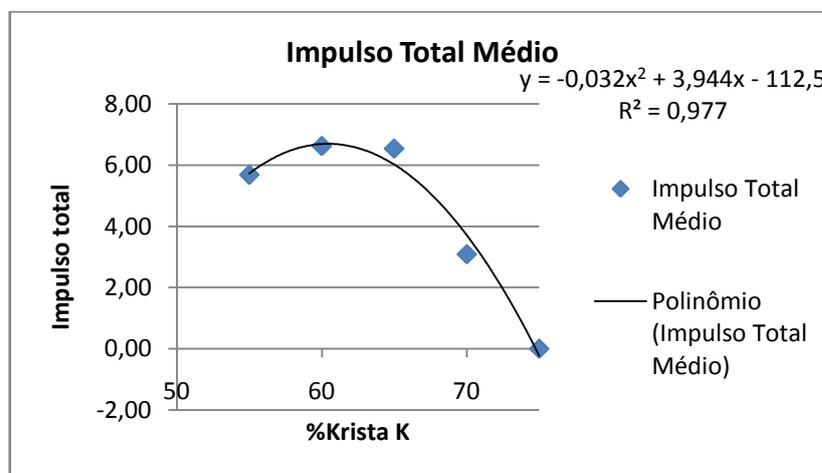


Figura 10 Efeito da composição no desempenho

Para achar o valor máximo pela equação do ajuste de curvas, é feito a derivada em relação à porcentagem de Krista K. Assim:

$$\frac{dy}{dx} = -0,064x + 3,944 = 0$$

Assim, o valor de x é.

$$x = \frac{3,944}{0,064} = 61,6$$

Pela relação, o melhor valor de Krista K nas aplicações se aproxima mais de 60% do que o usado anteriormente (65%).

4.6 Efeito da pureza sobre o desempenho

Foram feitos 12 testes para determinar o efeito da pureza sobre o desempenho. A referência de comparação entre os testes serão os resultados dos motores padrões sem a pureza, ou seja, fabricados com Krista K e açúcar comum.

Na tabela 13 estão os resultados, junta com suas repetibilidades, erros (valor do impulso total do melhor motor menos o valor do impulso total do pior motor) nos testes, valores médios e aumento ou diminuição em relação à referência.

Tabela 14 - Resultados dos testes para o efeito da pureza

Pureza	Impulso total – Média (Ns)	Erro (Ns)	Repetibilidade/Média*	Aumento em relação à Referência
Alta	6,36	2	31%	-15%
Baixa*	7,52	0,38	5%	Referência

*Um motor apresentou problemas no teste e não foi considerado na análise. Para o cálculo da repetibilidade o respectivo de t de student para 4 graus de liberdade foi usado, diferente para o de alta pureza, em que foi usado 5 graus de liberdade, pois os 6 testes funcionaram bem e todos foram considerados na análise.

Como o resultado foi diferente do esperado, outro teste teve de ser feito. É possível que outros fatores tiveram efeitos nos resultados. Como foi citado no tópico 3.6, as características de fabricação dos motores foram iguais ao do motor-padrão, exceto a pureza. Porém, a granularidade dos componentes da mistura eram maiores na pureza mais baixa, e esta característica provavelmente influencia e muito no desempenho da queima. Outro teste para determinar esta influencia deveria ser determinada para saber a real dimensão do aumento ou da queda de desempenho com o aumento da pureza.

4.7 Efeito da pureza sobre o desempenho (novos testes)

Foram feitos novos testes para determinar a real influencia da pureza no desempenho e mantendo as outras características em relação ao motor-padrão intactas (incluindo a granularidade). Isso é extremamente difícil, pois não se pode saber exatamente o nível de granularidade, exceto por uma comparação visual.

Então foram feitos novos testes para confirmar esta hipótese da influencia da granularidade. O tempo de moagem do açúcar purificado foi de 52s e do KNO₃ purificado foi de 85s. Exceto dois

testes de 12 não falharam e assim as análises se tornaram inviáveis. Um possível motivo seria o de ter excedido a pressão máxima suportada pela tampa, que é de 15 bar, pois com um tempo de moagem maior é de se esperar que melhore o desempenho do propelente e conseqüentemente aumente a pressão de trabalho dos motores.

5 Conclusões/Considerações Finais

Foram feitos, no total, 95 testes, sendo os oitos primeiros para determinar o tamanho de tampa.

Os testes confirmaram a relação entre o tamanho de grão e o desempenho do propelente. Um tamanho de grão menor (maior granularidade) melhora a difusão entre as moléculas, ajuda a homogeneizar a mistura, aumenta a taxa de queima (acelera a queima) e conseqüentemente aumenta o impulso total e o desempenho do propelente. Também aumenta a pressão interna em conseqüência do aumento da taxa de queima e assim, uma estrutura mais resistente é necessária, principalmente na tampa do motor.

Os testes relativo à influencia do tempo de mistura parece indicar uma leve tendência de aumento do desempenho. Porém, o tempo de mistura é bem maior do que o tempo de moagem, que teve uma melhora significativa em relação ao tempo de moagem padrão. Assim, entre um ou outro, é melhor aumentar o tempo de moagem, já que o desempenho aumenta mais neste do que naquele. Deve-se atentar que um tempo de mistura alto pode aumentar a degradação sofrida pelo propelente na medida em que uma grande quantidade de testes com um grande tempo de mistura dificilmente pode ser feita em poucos dias, levando talvez mais de uma semana e com isso, aumenta o tempo de contato do propelente com o ambiente, que leva ao aumento da umidade. Assim, não é recomendado aumentar muito o tempo de mistura e o tempo entre fazer o propelente e prensá-lo.

O tempo de estocagem, apesar de contrariar o último relatório, não teve influência no desempenho do propelente se os motores forem mantidos em um ambiente com baixa umidade, como foi o caso.

A composição do propelente foi outra surpresa, pois se verificou que houve uma leve melhora ao mudar para 60% a quantidade em massa de Krista K (KNO_3) na mistura do propelente. Fazendo um ajuste de curvas, foi achado um valor de 62% de KNO_3 para um desempenho ótimo.

Para os testes relativos à pureza não se pode chegar a conclusão alguma, pois apesar de ter variado a pureza dos componentes da mistura o nível de granularidade foi maior do que em relação aos componentes de baixa pureza, o que fez com que este último tivesse um desempenho maior no mesmo teste.

Todos os testes só puderam ser comparados em relação aos motores do mesmo teste, pois muitos fatores podem mudar na fabricação de um mesmo motor em diferentes dias. Um exemplo é a granularidade dos componentes (a Krista K ou o açúcar comum podem ter granularidades iniciais diferentes em cada lote), a umidade do ambiente, a pressão ambiente ou mesmo a habilidade do fabricante, que pode variar de um dia para o outro. Portanto, resultados pareceram razoáveis se comparados em um mesmo lote de fabricação (mesmo conjunto de testes).

Apesar de ter dado ênfase nos resultados dos testes, é preciso notar que a repetibilidade e erros de todos os testes são altos. Se forem levados com rigor, na grande maioria dos testes, as médias dos impulsos totais estão dentro da faixa de erros para diferentes características de fabricação. O que se observa são tendências para levar adiante idéias de melhoria na fabricação dos propelentes. Novos testes devem ser feitos e confirmar os resultados (os mesmos testes com mais graus de liberdade e conseqüentemente uma menor incerteza padrão).

6 Referências

- Albertazzi, A. G. Jr.; Sousa, A. R. Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial, 1. Ed. São Paulo: Manole, 2008.
- Callister; W. D. *Fundamentals of Material Science and Engineering*. 5. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001, Chapter 6, Diffusion.
- Nakka, R. A. *Solid Propellant Rocket Motor, Design and Testing*. April, 1984. A Thesis presented to Department of Mechanical Engineering to the University of Manitoba.
- Sutton, G.P.; Biblarz, O. *Rocket Propulsion Elements*. 7. ed., New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.