




EXPERIMENTOS CON NITRATO DE AMONIO

FÓRMULAS DE PROPELENTES BASADOS EN ALUMINIO

Texto original de Richard Nakka traducido de <http://www.nakka-rocketry.net/anexp.html> por los miembros de Cosmic Research.



Contenido

1. Introducción.....	2
2. Comprender el comportamiento químico del nitrato de amonio.....	3
3. Seguridad del nitrato de amonio como oxidante de propelente.....	9
4. Fórmulas experimentales de nitrato de amonio y aluminio.....	12
4. Preparación de pastillas experimentales.....	18
5. Pruebas estáticas.....	20
Pruebas estáticas Nov 2008.....	25
6. Caracterizando el combustible A24.....	27
7. Motor J ANCP	29
Referencias.....	30

1. Introducción

Esta página web describe una serie de experimentos en curso que se han realizado en los últimos cinco años con el objetivo de desarrollar un combustible para cohetes amateurs a base de nitrato de amonio (AN) como oxidante. Los objetivos de estos experimentos incluyen el desarrollo de un combustible relativamente simple, seguro de fabricar y manejar, de bajo costo y todo a base de materiales que son relativamente fáciles de obtener. En otras palabras, un combustible considerado de alto rendimiento y óptimo para el uso en cohetaría amateur. Con respecto al rendimiento, se ha establecido un objetivo de alcanzar un impulso específico de 200 segundos.

El nitrato de amonio tiene una serie de cualidades que lo hacen particularmente atractivo para su uso como oxidante en combustibles usados en cohetaría. Es fácilmente adquirible, a la vez que barato, dado que cuenta con un consumo anual mundial promedio de unos 20 millones de toneladas, siendo empleado principalmente como fertilizante agrícola [1]. Es químicamente estable a temperatura ambiente [2], no se quema por sí mismo, y tiene muy baja sensibilidad a la fricción y a los choques [3]. La temperatura de descomposición es bastante alta (200 °C.). Su fórmula química es NH_4NO_3 , no contiene iones metálicos y se descompone cuando se calienta, formando únicamente productos gaseosos. Esto contribuye a que los productos de combustión tengan bajo peso molecular, lo que es deseable, y no sufre inherentemente de pérdidas por flujo en dos fases (partículas condensada). Estos factores proporcionan un gran potencial al nitrato amónico, dado que el impulso específico de combustibles a base de este oxidante puede llegar a ser excelente.

El nitrato de amonio tiene un par de inconvenientes. Uno de ellos está relacionado con los cambios en la fase cristalina al darse un cambio de temperatura, dado que este puede tener hasta cinco cambios de fase distintos. Uno de los cambios de fase se produce a 32 °C, lo que conlleva un aumento de volumen considerable de aproximadamente un 4%. Dado que esta temperatura está en el rango que puede ser experimentado durante el almacenamiento, esto debe ser tomado en consideración en la fabricación y almacenamiento del combustible. La exposición a ciclos repetidos de cambio de fase podría ser potencialmente perjudicial para la integridad estructural de un *grain* de combustible, dependiendo de varios factores que se analizan más adelante en este artículo. Un segundo inconveniente es la naturaleza higroscópica del nitrato de amonio. Sin embargo, como el umbral de humedad es de alrededor un 70% a temperatura

ambiente (similar a ciertos combustibles de azúcar tales como KNSB, sorbitol y nitrato potásico), esto no es necesariamente un inconveniente grave.

2. Comprender el comportamiento químico del nitrato de amonio

Uno de los primeros pasos dados para desarrollar un combustible para cohetes práctico y seguro era estudiar los informes técnicos relativos al comportamiento químico y degradación del nitrato amónico. Varias docenas de dichos informes fueron estudiados y se aprendió mucho en el proceso, lo que ayudó en la comprensión de este común, a la par que atractivo material.

Entender de química, en particular de aquella relacionada con los procesos de descomposición del nitrato amónico puro, así como la del catalizado es vital por parte del experimentador. No sólo por la necesidad evidente de mantener un estándar de seguridad, sino también para permitir un enfoque más racional con el que hacer frente a los retos asociados con el trabajo del desarrollo de este combustible.

El uso más común del nitrato amónico es como fertilizante agrícola. La designación agrícola es 35-0-0, que se refieren a la cantidad de nitrógeno, fósforo y potasio (conocido como NPK) contenida en el producto. Por ejemplo 8-8-8 significa que un fertilizante contiene 8% de nitrógeno elemental (N), 8% de fósforo elemental (P), 8% de potasio elemental (K) en peso. El nitrato amónico tiene cero por ciento de ambos fósforo y potasio, y 35% de nitrógeno. Este último valor se puede reproducir fácilmente conociendo la masa atómica de nitrógeno elemental contenida en el nitrato amónico:

$$\text{Peso molecular } NH_4NO_3 = 14 + 4(1) + 14 + 3(16) = 80 \text{ g / mol}$$

$$\text{Ratio de N en } NH_4NO_3 \text{ es } = 2(14)/80 = 0,35$$

En condiciones ambientales, el nitrato amónico es químicamente estable y puede ser almacenado en grandes cantidades sin temor de auto ignición o combustión espontánea [7]. El nitrato amónico por sí mismo no arde.

El nitrato amónico es extremadamente soluble en agua, propiedad que aumenta de forma exponencial con la temperatura. Cuando se disuelve en agua, cierta energía en forma de calor es absorbida a razón de 79 cal/gramo a temperatura ambiente. Esta propiedad es aprovechada por los "paquetes de frío instantáneo" que se venden en las farmacias para aliviar el dolor de las lesiones en tejidos blandos.

Un desafío importante que hay que superar en la utilización de nitrato amónico como oxidante es hacer frente a su tendencia natural a la auto extinción. Esta tendencia es el resultado de la gran cantidad de agua que se forma después de la descomposición, lo que ralentiza el proceso de combustión (velocidad de combustión) de tal manera que la combustión tiende a no ser sostenida.

Aunque no es directamente aplicable a la realización de la investigación sobre el combustible, resulta interesante examinar lo que sucede cuando una muestra del nitrato amónico se calienta, con el fin de comprender mejor lo que podría durante el desarrollo del combustible.

Cuando el nitrato amónico puro se calienta a un intervalo de temperatura de 169 °C a aproximadamente 200 °C, esencialmente no se produce la descomposición. Cuando se calienta aún más, al rango de 200-250 °C, se produce la siguiente reacción exotérmica (se libera calor):



De la ecuación anterior, por cada 100 gramos de nitrato amónico, se producen 45 gramos de H₂O, con los 55 gramos restantes pasando a óxido nitroso gaseoso. Esta reacción es exotérmica, liberándose 110 calorías/gramo.

Simultáneamente a esta reacción, una reacción de disociación se produce endotérmicamente (se absorbe calor) mediante la cual el nitrato amónico se descompone en amoníaco y ácido nítrico:



La combinación de estos dos factores resulta en un estado de equilibrio, un auto limitado de temperatura, siempre que el proceso de descomposición se lleve a cabo permitiendo que los productos de reacción gaseosos escapen libremente (en particular el HNO₃). Como tal, si el nitrato amónico se calienta a un ritmo moderado en aire abierto, sin confinamiento, la temperatura no puede elevarse apreciablemente más allá de su punto de fusión.

En condiciones de estado estacionario, la disociación endotérmica del nitrato amónico en NH₃ gaseoso y HNO₃ absorbe todo el calor disponible de descomposición. Por lo tanto, cuando se añade calor a un a presión atmosférica e incluso proveniente de una fuente muy caliente, la temperatura del nitrato amónico está limitada por su propia

disociación a valores en los que la tasa de descomposición es relativamente moderada. A presiones elevadas, sin embargo, la reacción de disociación se reprime y la velocidad de descomposición se acelera. [5]

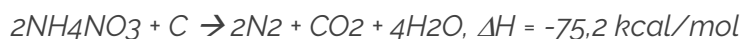
Cuando el nitrato amónico se calienta muy rápidamente, tal como ocurriría en un motor de cohete, el proceso de descomposición es notablemente diferente al de la reacción de descomposición general. Bajo tales condiciones, la descomposición es principalmente esta reacción de disociación con NH_3 y HNO_3 como los productos [10].

Se sabe que ciertas sustancias tienen un efecto catalítico sobre la descomposición del nitrato amónico. Agua, cloruros y cromatos son más las notables. La presencia de incluso una pequeña cantidad de agua causa que la descomposición comience a $180\text{ }^\circ\text{C}$. El amoníaco y sustancias alcalinas tales como la urea tienen un efecto inhibitor sobre la descomposición.

Los cloruros son particularmente eficaces en la aceleración de la velocidad de descomposición del nitrato amónico. Cuando es catalizada con 1% de NaCl (sal de mesa), la tasa de descomposición a $175\text{ }^\circ\text{C}$ es 1000 veces mayor que la de nitrato amónico puro. Pequeñas cantidades de cloruros (en presencia de ácido libre) pueden causar descomposición a temperaturas tan bajas como $140\text{ }^\circ\text{C}$. [5].

Aluminio en polvo añadido al nitrato amónico fundido no es reactivo, pero el zinc en polvo reacciona violentamente [8].

Cuando se calienta hasta fusión, el nitrato amónico tiende a reaccionar de forma exotérmica con sustancias orgánicas, que parecen tener un efecto catalizador. Por ejemplo, con el carbono:



Curiosamente, un combustible arma inventado en la década de 1880, el Ammonpulver, utiliza un 15% de carbón (en gran medida de carbono), combinado con un 85% de nitrato amónico. Esta mezcla se prensó en granos. Aunque resultó difícil de encender, era mucho más poderosa que la pólvora negra. Dos serios inconvenientes limitan su sentido práctico - la naturaleza higroscópica del nitrato amónico, y la tendencia de los granos a romperse debido al cambio de fase cristalina. Este último factor da lugar a un exceso de presión, y un consecuente daño resultante para el cañón de la pistola. Los

detalles específicos de los cambios de fase cristalina pura de nitrato amónico se proporcionan en la Tabla 1.

TABLA 1. FORMAS CRISTALINAS DEL NITRATO AMÓNICO, Y CAMBIOS DE VOLUMEN ASOCIADOS AL CAMBIO DE VOLUMEN.

Forma	Cristal	Rango de temperatura	Cambio de volumen
Fase V	Tetragonal	menor a -18 °C	V --> IV -3.0%
Fase IV	Rombo	-18 °C --- 32,3°C	IV --> II +3.6%
Fase III	Rombo	32,3°C---84,2°C	III --> II -1.3%
Fase II	Tetragonal	84,2°C---125,2°C	II --> I +2.1%
Fase I	Cúbica	125,2 °C ---169,6 °C	
Líquido	-	mayor a 169,6 °C	

Los primeros experimentos realizados por el autor confirmaron que el nitrato amónico mezclado únicamente con combustible-aglutinantes típicos tales como epoxi, sacarosa, poliéster, poliuretano y silicona generalmente no mantendrán la combustión. Si se incorpora una pequeña cantidad de NaCl, obtendremos un quemado sostenido, aunque muy lentamente (combustión lenta), y la temperatura de combustión baja resultante tenderá a producir cantidades voluminosas de ceniza rica en carbono.

Un exitoso motor de cohetaría amateur basado en el nitrato de amonio es la conocida fórmula "Wickman", compuesto de PSAN (nitrato amónico de fase estabilizada), polvo de magnesio, y R-45 polimérico. (composición de CP Technologies):

Propelente Wickman
 PSAN: 60%
 Mg: 20%
 Aglutinante R45HT: 20%

La clave de este propulsor es el uso de una fracción en masa significativa de un agente "térmico", magnesio. La combustión de magnesio es altamente exotérmica, y proporciona la energía térmica para conseguir que el agua liberada sea encontrada en forma de vapor, que luego reacciona con el metal de una manera auto sostenida.

Las referencias [3] y [4] discuten una serie de formulaciones para combustibles de cohetes experimentales que utilizan magnesio como un agente térmico eficaz. La inclusión de silicio elemental, en cantidades del 0,4 a 6,0%, ha sido sugerido como un potenciador del rendimiento [6].

Los inconvenientes a la utilización de magnesio como constituyente en un combustible incluyen los problemas de seguridad asociados con el manejo, el alto costo de este material (especialmente cuando las tarifas de envío de materiales peligrosos se tienen en cuenta), y la falta de fácil disponibilidad.

Después de mucha reflexión, un agente térmico alternativo bastante interesante salió a la luz. El aluminio, que tiene un mayor calor de reacción que el magnesio, fue probado entonces. La dificultad de combustionar de las partículas de aluminio se debe a la cáscara dura de óxido de aluminio (alúmina) que encierra el metal fácilmente oxidable. Los primeros intentos de simplemente mezclar el polvo de aluminio con nitrato amónico y un aglutinante fueron infructuosos. Las partículas de aluminio no se quemaron de manera satisfactoria, siendo bien protegidas por la cubierta dura de alúmina. La referencia [4] también describe intentos de utilizar aluminio en polvo, pero las formulaciones estudiadas no quemaron.

Experimentos anteriores realizados por el autor en relación con el dopaje de los propulsores a base de KN habían indicado una dificultad similar en conseguir que el aluminio combustionara. Finalmente se descubrió que la adición de una cantidad considerable de azufre ayuda a la combustión de las partículas de aluminio. Esto fue descubierto inicialmente cuando se investigó la preparación de combustible a base de caucho de silicona y KN. La adición de un 5-10% de azufre permitió estas preparaciones, consiguiendo un quemado vigoroso. Se observó un fenómeno similar cuando el combustible RNX fue dopado con aluminio. Este enfoque se intentó con nitrato amónico, sin embargo, los resultados no fueron tan exitosos. Sin embargo, se llegó a la conclusión de que el azufre ayuda a la ignición de las formulaciones experimentales de nitrato amónico y también puede servir para aumentar la eficiencia de combustión del aluminio.

Varios aditivos y diferentes aglomerantes fueron sopesados en un intento de ayudar a la reacción del aluminio con nitrato amónico. Inicialmente el poliuretano parecía ser prometedor, pero la combustión eficiente del aluminio metálico era difícil de alcanzar. Habiendo investigado docenas de artículos técnicos sobre combustión del nitrato amónico, se decidió emplear el uso de un donante de cloro, tal como el NaCl en un

principio, y más tarde el NH_4Cl . Los resultados de estos experimentos eran más prometedores. Más tarde se produjo que el ignitor pyrolant Spitfire, que contiene una cantidad apreciable de aluminio, quemó vigorosamente de manera excepcional, por alguna razón. Este pyrolant utiliza cemento de contacto a base de neopreno como aglutinante. Curiosamente, neopreno es un nombre comercial de DuPont para el polícloropreno, que tiene la fórmula química $[\text{C}_4\text{H}_5\text{Cl}]_n$ y que tiene una fracción de masa de cloro elemental de 39%. Los experimentos que siguieron emplearon cemento de contacto como aglutinante, produciendo resultados que se consideraron como un gran avance. Aunque es difícil de iniciar la combustión, una vez encendidas, estas formulaciones de ensayo quemaron de una manera muy estable con una llama muy caliente y sin la presencia de chispas blancas, que son indicativas de combustión metálica incompleta. En el aire abierto, cintas de magnesio (o virutas realizadas por corte de magnesio en el torno de metal) demostraron ser eficaces para la ignición de estas formulaciones. Una composición pirotécnica de quemado a alta temperatura, tal como la termita resultó ser un iniciador de combustión eficaz. Si se enciende con un soplete de propano estándar, las composiciones simplemente quemaban en una combustión sin llama (los denominados "combustión del cigarro").

Se encontró muy pronto en esta experimentación que un porcentaje apreciable de aluminio era esencial. Si no había suficiente aluminio, la formulación resultante no genera suficiente calor para mantener la combustión eficiente. Típicamente las formulaciones quemaron ferozmente con un contenido de aluminio en el intervalo de 15 a 25%. Se encontró que el mínimo contenido de aluminio está alrededor de 10%, dependiendo de los detalles específicos de formulación.

Aunque el nitrato amónico se considera un oxidante de "baja energía" (calor de explosión solamente de 300 a 400 calorías / gramo), cuando se utiliza con un agente térmico tal como el aluminio, el rendimiento teórico puede ser bastante impresionante. GUIPEP indica un Isp teórico para una composición de /nitrato amónico / Al / neopreno/ en el rango de 220-250 segundos a una presión de cámara de 1,000 psi. La figura 1 muestra extractos de resultados de una ejecución GUIPEP para una composición típica de "alto contenido de aluminio", basada en nitrato amónico, aluminio y neopreno (cloropreno).

```

Formulation A20                               Run using June 1988 Version of PEP,

CODE                WEIGHT    D-H  DENS    COMPOSITION
134 AMMONIUM NITRATE 64.000 -1090 0.06230 4H 2N 30
 63 ALUMINUM (PURE CRYSTALLINE) 25.000  0 0.09760 1AL
 904 SULPHUR          3.000  0 0.07300 1S
1092 CHLOROPRENE (TENTATIVE) 8.000 -2000 0.05540 4C 5H 1CL

*****CHAMBER RESULTS FOLLOW *****

T(K)  T(F)  P(ATM)  P(Psi)  ENTHALPY  ENTROPY  CP/CV    GAS  RT/V
3251. 5393.  68.02  1000.00  -85.76  216.03  1.1353  3.125  21.765

*****PERFORMANCE:  FROZEN ON FIRST LINE, SHIFTING ON SECOND LINE*****

IMPULSE  IS EX    T*    P*    C*    ISP*  OPT-EX  D-ISP    A*M  EX-T
 241.0  1.1389  3040.  39.23  4734.0          10.07  454.1  0.14717  1943.
 244.8  1.0972  3106.  39.81  4886.1  183.1  10.98  461.3  0.15190  2254.
    
```

FIGURA 1. OUTPUT DE GUIPEP PARA LA FORMULACIÓN DEL A20.

3. Seguridad del nitrato de amonio como oxidante de propelente

Tal y como se explica en la sección anterior, de la investigación del autor se deduce que el nitrato de amonio no plantea problemas de seguridad en calidad de elemento constitutivo del propelente del cohete. En este sentido, es muy similar a otro oxidante comúnmente empleado por amateurs, el nitrato de potasio (KNO_3). Como se ha señalado anteriormente, el nitrato de amonio es químicamente estable a temperatura ambiente, no se quema por sí mismo y tiene muy baja sensibilidad a la fricción y al choque. A su vez, el nitrato de amonio no es tóxico. Existe una característica particular del nitrato de amonio, sin embargo, que lo diferencia de otros oxidantes como el nitrato potásico. El nitrato de amonio es conocido por ser capaz de detonar bajo las condiciones adecuadas. Como tal, la investigación acerca del uso seguro del nitrato de amonio no sería completa sin tener en cuenta esta característica. Como mejor se describe la detonación es como una descomposición casi instantánea (generalmente se mide en microsegundos) de la masa de un material. La propagación de la descomposición se produce mediante una onda de choque con el nivel de energía suficiente. Dado que la detonación es algo que debe evitarse debido a su naturaleza destructiva, es necesario determinar si ésta pudiera ser un factor a tener en cuenta. Esto es relevante ya que una forma especial de nitrato de amonio se utiliza en tareas de voladura debido a su gran capacidad detonante. El ANFO (siglas en

inglés para *Ammonium Nitrate - Fuel Oil*) y el amonal (nitrato de amonio con polvo de aluminio) son dos ejemplos. Cabe señalar que el nitrato de amonio se usa comúnmente como agente explosivo ya que es muy barato, fácilmente disponible y seguro de manejar y transportar, requiriendo una potente carga de inicio para explotar.

Es crucial que la densidad aparente del nitrato de amonio sea baja para que éste detone. Es necesario que el material reactivo sea poroso. De esta manera, existen diminutas burbujas de aire dentro del material y, debido a una compresión adiabática causada por la onda de choque, dichas burbujas se calientan a varios miles de grados Celsius. Esto genera un frente de reacción que proporciona energía para propagar una onda de detonación. La falta de huecos suficientes (densidad aparente $> 1 \text{ g/cm}^3$), llamado "dead-packing" (literalmente, envasado muerto), imposibilita la detonación [8].

La sensibilidad a la detonación depende de varios factores, siendo la densidad aparente especialmente importante para un material de baja energía como es el nitrato de amonio. Sin la presencia de huecos (bolsas de aire), la detonación no es posible [8].

Otro criterio importante para la detonación del nitrato de amonio es el aislamiento pesado [8].

Aunque no es directamente aplicable en este caso, la forma fundida del nitrato de amonio puede soportar un considerable choque hidrodinámico sin detonar cuando no es aireado por burbujas [9]. En el intervalo de temperatura de 169°C to 190°C , en el cual la velocidad de descomposición térmica es insignificante, el nitrato de amonio es virtualmente imposible de detonar [9].

La referencia [8] describe ensayos de mezclas de nitrato de amonio, carbono y aluminio: cuando se encendió en aislamiento se produjo deflagración, pero no detonó.

El perclorato de amonio, un oxidante de uso común para cohetes profesionales, es significativamente más sensible a la detonación que el nitrato de amonio. El perclorato de amonio también se utiliza para motores comerciales de cohetes de alta potencia y es utilizado en motores experimentales por muchos aficionados a la cohetaría amateur. La referencia [7] proporciona un diámetro crítico¹ mínimo de $\frac{1}{4}$ de pulgada para el perclorato de amonio. Esto se compara con un diámetro crítico de varias pulgadas de nitrato de

¹ El diámetro crítico es una medida de la sensibilidad a la detonación y se refiere al diámetro mínimo de una masa de explosivo que puede ser detonada sin ser aislada pesadamente. Un diámetro crítico más grande que una pulgada se considera generalmente insensible.

amonio en forma de gránulos de baja densidad (la forma más sensible). Una serie de propelentes de perclorato de amonio con fórmulas similares a las aquí discutidas (por ejemplo, aquellas con un contenido de aluminio apreciable) se han probado en ambientes seguros para disipar las preocupaciones acerca de una posible detonación, tanto por la comunidad de los aficionados a los cohetes de alta potencia como por la de los cohetes experimentales durante muchos años. Curiosamente, los impulsores del Space Shuttle utilizan un propelente a base de perclorato de amonio aluminizado (Tabla 1) no muy distinto a muchas de las fórmulas de nitrato de amonio y aluminio objetos de este estudio: con la excepción del oxidante, siendo el perclorato de amonio más sensible que el nitrato de amonio.

Propelente de los impulsores del Space Shuttle

Perclorato de amonio: 69.9%

Poli butadieno: 12.04%

Agente de curado a base de epoxi: 1.96%

Polvo de aluminio: 16%

Óxido de hierro rojo: 0.07%

Esta fórmula se asemeja bastante a la de, por ejemplo, el A24 (un propelente compuesto estudiado por Richard Nakka a base de nitrato de amonio, aluminio y neopreno).

Propelente A24

Nitrato de amonio: 68%

Neopreno: 11%

Polvo de aluminio: 17%

Sulfuro: 4%

Siguiendo el razonamiento anterior, se considera que el potencial para la detonación no es un factor determinante cuando el nitrato de amonio se emplea como oxidante en propelentes para motores de cohetes sólidos, tal y como se describe en los experimentos llevados a cabo en esta investigación.

Otra posible preocupación que se ha tratado se refiere a la seguridad al comprimir fórmulas de nitrato de amonio bajo presión hidráulica. Esta técnica se utiliza para formar las pastillas de propelente para pruebas de motor. La referencia [3] describe la fabricación de pastillas utilizadas en la investigación de la velocidad de combustión de mezclas de

nitrate de amonio y TNT cuando se comprime el polvo resultante de la mezcla a una presión de 0.2 GPa (29000 psi).

4. Fórmulas experimentales de nitrato de amonio y aluminio

Hasta la fecha, 33 fórmulas diferentes se han experimentado con varios grados de diligencia. En casos menos rigurosos, se preparó un pequeño lote de muestra de una fórmula dada y se quemó al aire libre para evaluar cualitativamente sus características de combustión. Si esto sugería un comportamiento de combustión insatisfactorio, no se realizaba ninguna experimentación adicional. Para las fórmulas más prometedoras, se produjeron pastillas de propelente que se probaron en motores de cohete. Asimismo, para dichas fórmulas también se obtuvieron curvas de la presión de cámara y del empuje de encendidas estáticas con el fin de evaluar los parámetros clave tales como el impulso específico y la velocidad característica.

Las primeras fórmulas empleaban poliuretano o epoxi como aglutinante. Ambos probaron ser muy insatisfactorios por varias razones. Fórmulas posteriores empleaban neopreno como aglutinante, el cual resultó ser adecuado. Una lista completa de las 33 fórmulas, incluyendo detalles pertinentes se proporciona en la Tabla 2.

TABLA 2. LISTA DETALLADA DE LAS FORMULAS "A".

Fecha: mes/año	Etiqueta	Porcentajes de la fórmula						Aglutinante	Aglutinante	Notas	Notas libreta de combustión
		AN	Azúfre	Aluminio	Carbón	NaCl					
	A1	65	8	6	2	2	17	Poliuretano	2,7	Quemado frío. Destellos ocasionales indican la combustión de aluminio.	
	A2	63	8	9	1	2	17	Poliuretano	2,7		
06-abr	A3	59	8	12	1	2	18	Poliuretano	2,7	Quemado frío. Chisporroteo ocasional.	
06-abr	A4	59	8	12	1		20	Poliuretano	2,7		

06-abr	A5	55	10	12	2	2	19	Poliuretano	2,7	Quemado frio. Chisporroteo ocasional.
06-abr	A6	50	14	17	2		17	Poliuretano	2,7	
06-abr	A7	45	14	22	3	1	15	Poliuretano	2,7	Buena encendida, quema bien, mucho calor.
06-abr	A8	44	14	21	1	2	18	Poliuretano	2,7	
06-abr	A9	41	15	24		2	18	Poliuretano	2,7	Buena encendida, quema extremadamente caliente en el frente de llama, gases naranjas, poco ruido o humo, velocidad de combustión decente.
06-abr	A10	38	16	26		2	18	Poliuretano	2,7	
06-abr	A11	49	14	22	0,5	0,5	14	Poliuretano	2,7	
06-abr	A12	43	14	22	2	1	17,5	Epoxi	3,4,6	
06-abr	A13	44	14	21	1		19	Poliuretano	2,5,6,7	
06-abr	A14	41	15	24		2	18	CC	8,9,16	Enciende pronto y quema vigorosamente. Llama muy brillante y estable
06-abr	A15	48	14	20			18	CC	8, 10	Quema similar al A14 pero aparentemente más rápido.
11-may	A16	41	15	24			20	CC	8,11	
03-may	A17	55		24			21	CC	8	Difícil de encender, pero quema bien, llama caliente y brillante.
05-may	A18	67		25			8	Neopreno	8	

05-may	A19	58		25			17	Neopreno/ Epoxi	12	Difícil de encender, pero arde bien.
05-may	A20	64	3	25			8	Neopreno	13,15,16,17,18	Bastante difícil de encender, quema muy bien y bastante rápido.
05-may	A21	58		24			18	Neopreno/ Poliuretano	14	Difícil de encender. Apenas quema con una llama naranja brillante.
05-may	A22	54	3	25			18	Neopreno/ Poliuretano	14	
06-may	A23	67	3	20			10	Neopreno	17,18	
05-jul	A24	68	4	17			11	Neopreno	17, 20	Ignición inconsistente (fácil o bastante difícil). Quema intensamente con un residuo blanco crujiente.
05-jul	A25	70	4	15			11	Neopreno		
07-jul	A26	67		20			10	Neopreno	17,19,20	Enciende fácilmente. Quema muy bien sin chispas de aluminio.
07-jul	A27	74	5	11			10	Neopreno		Más difícil de encender, pero quema muy bien.
07-jul	A28	78	5	7			10	Neopreno		Ignición fallida. Arde.
11-jul	A29	75	4	12			9	Neopreno	20	
11-jul	A30	68	5	17			10	Neopreno		
11-jul	A31	70		18			12	Neopreno		
11-jul	A32	71		18			11	Neopreno	17, 20	

11-jul	A33	68, 5		17,5			14	Neopreno		Difícil de encender (tiende a arder), pero quema bien.
--------	-----	----------	--	------	--	--	----	----------	--	--------------------------------------------------------

Notas

[1] Todas las muestras fueron encendidas al aire libre y empleando virutas de magnesio.

[2] La A1-A9 se dejó secar durante toda la noche a 30 grados Celsius, después fue introducida en el horno a 65 grados durante media hora. Mostraba roturas o bultos.

[3] + 0.5 MgSO₄

[4] East Systems, proporción 5 a 1.

[5] + 1.0 KCl

[6] Pastillas producidas para motores. Ambos fallaron.

[7] El poliuretano era de la calidad de un adhesivo, a una parte tuvo que secársele la humedad.

[8] Cemento de contacto LePages TiteBond (21-26% de neopreno).

[9] 8 pastillas producidas para motores. Uno se encendió con una quema poderosa pero inestable. Dos quemaron bien. El 2 produjo un CATO.

[10] 2 pastillas producidas para motores. Una produjo un CATO y la otra quemó bien.

[11] 2 pastillas producidas para motores. Ambos CATO.

[12] 7% de neopreno y 10% de epoxi.

[13] Velocidad de combustión de una hebra medida: 0.84 mm/s.

[14] 7% de neopreno y 11% de poliuretano.

[15] Velocidad de combustión de una hebra medida: 3.93 mm/s; 2.08 mm/s.

[16] Muestra quemada en un calorímetro: 7.07 kJ/g (ambas).

[17] Pastillas producidas para motores mediante apisonamiento hidráulico.

[18] Resultados de la encendida estática:

a. A20-A1 se encendió bien y se obtuvieron los datos para elaborar una curva de presión.

b. A20-A3 no encendió.

c. A23-A4 encendió bien y se obtuvieron los datos para elaborar una curva de presión.

d. A23-A5 no encendió.

e. A23-A6 encendió bien y se obtuvieron los datos para elaborar una curva de presión.

[19] +3% de cloruro amónico.

[20] Resultados de encendida estática de pastillas producidas para motor:

a. A26-A1: el motor se encendió, autoextinguiéndose poco después.

b. A26-A2: parecido al A26-A1.

c. A24-A2: parecido al A26-A1.

d. A24-A3: se encendió rápido, se produjo un pico y luego produjo un empuje intenso. No se elaboró una curva de presión debido al bloqueo.

e. A24-A4: Parecido al A26-A1.

f. A29-A1: Parecido al A26-A1.

g. A24-AB1: Se encendió bien. Curvas de presión y empuje obtenidas.

h. A32-B1: Encendida lenta, muchas chispas. Curvas de presión y empuje obtenidas.

CC: cemento de contacto.

PU: Poliuretano

Neo: Neopreno

Desde un punto de vista práctico, el uso de neopreno como aglutinante plantea un desafío. A diferencia del epoxi, que es un sistema de dos componentes que aglutina sin necesidad de disolventes, el neopreno no está disponible como un sistema de dos partes. El neopreno utilizado en todas las fórmulas investigadas fue producido a partir de cemento de contacto de venta al pequeño consumidor. La ficha de datos de seguridad para el cemento de contacto utilizado para estos experimentos (LePage Pres-Tite) sólo indica los ingredientes peligrosos para la salud:

PELIGRO

Aguarrás, alifático ligero, 30-60

Óxido de magnesio, 1-5

2-Butanona, 10-30

Tolueno, 10-30

El neopreno no se considera peligroso por los estándares de la OSHA (siglas en inglés para *Occupational Safety and Health Administration*) y por lo tanto no se indica en la ficha de datos de seguridad.

Basándose en esta bastante amplia gama de ingredientes cuyos porcentajes han sido listados, el contenido de neopreno se encuentra en un generoso rango de entre 0% y 49%. Para obtener un valor más útil, las mediciones reales fueron tomadas pesando una muestra de cemento de contacto, permitiendo que los disolventes volátiles se evaporaran, y a continuación, se volvió a pesar la muestra. Para un contenedor fresco, se encontró que el contenido era del 21%. En contenedores parcialmente agotados se halló un mayor contenido de neopreno hasta un porcentaje máximo del 25% medido para una lata casi vacía. Esto era de esperar, ya que el disolvente es muy volátil y se pierde con el tiempo, especialmente después de repetidas aperturas del contenedor. Este análisis en particular desprecia la presencia de cualquier otra sustancia no volátil, tal como el óxido de magnesio, pero proporciona un valor suficientemente preciso para la experimentación llevada a cabo.

Todo el nitrato de potasio empleado en esta serie de experimentos fue en forma de gránulos comprados al por menor en forma de "paquetes fríos instantáneos". El producto era de color blanco puro y no tenía ningún signo visible de impurezas. Curiosamente, el coste de del nitrato de amonio fue bastante bajo. Cada paquete frío solía contener dos bolsas (una de nitrato de amonio y otra de agua, en bolsas separadas) haciendo un total de 250 gramos, por un coste de \$ 1-2 CAD (= \$ 1-2 USD) por paquete (dependiendo en qué tienda se compró).

El polvo de aluminio empleado para todos los experimentos se atomizó hasta conseguir un grado de pigmento. Fue comprado a West System 420 a un coste de 20 dólares por libra. Las escamas de aluminio obtenidas de la "pintura de aluminio" son otra fuente potencial de aluminio. La pintura de aluminio de calidad comercial contiene, en términos de masa, entre 20% y 25% de aluminio metálico.

4. Preparación de pastillas experimentales

Los primeros intentos en producir pastillas para pruebas involucraron el uso de una mínima cantidad de cemento como aglutinante (binder). Se mezclaban todos los ingredientes bien, y se comprimía la mezcla, similar a la textura de la masilla, en un molde de cartón, donde se dejaban secar a una temperatura moderadamente elevada. Debido a que un porcentaje considerable del cemento de contacto son solventes volátiles, la pastilla resultante quedaba inevitablemente con pequeños poros. Esto suponía una desventaja potencial, pero dicha técnica se consideró viable por lo menos para pruebas iniciales. Ya que las formulaciones de AN/Al son difíciles de encender, se vio que, aunque los gases de combustión ardientes se filtraran a través de los pequeños poros, el material no se encendía. Aún su difícil ignición, combinado con una combustión errática, no obstante, los resultados fueron alentadores. El método fue dejado en desuso en poco tiempo debido al largo tiempo que se debía dejar la pastilla secar. Se encontró que (pesando regularmente) se requerían semanas para conseguir una pastilla libre de solventes.

Después de reflexionar sobre diferentes maneras de quitar el solvente en una manera eficiente, se encontró que la manera más efectiva era expulsar los solventes previamente a hacer la pastilla. Una vez completamente seco, que solo tardaría unas horas si se calienta moderadamente, se halló que, rompiendo el material seco en pequeños gránulos, y después comprimiéndolos, una pastilla sorprendentemente robusta resultó. Este método básico se ha utilizado para la preparación de todas las pastillas subsecuentes. Un proceso típico se describe a continuación.

El AN tal y como se haya obtenido (comprimido a gránulos) primero se calienta en un horno precalentado a 65-95°C durante 2 o más horas. El AN luego es molido a un polvo muy fino utilizando un molinillo de café eléctrico (típicamente durante 40-50s por cada 50g). El AN seco, azufre y aluminio se pesan y se ponen juntos en un Tupperware de plástico. Es una práctica convencional que se evite combinar nitratos y polvo de aluminio entre la comunidad pirotécnica. Por mi propia experiencia, por eso, AN seco y Al no tienen tendencia a reaccionar (por ejemplo, ningún olor a amonio fue detectado nunca). No obstante, precauciones fueron tomadas para asegurar la seguridad del proceso, como preparar pequeños lotes y minimizando el tiempo de almacenamiento. Posiblemente para mayores lotes, el polvo de aluminio se podría mezclar con el contacto de cemento líquido en vez de con el AN. La adición de una pequeña cantidad de ácido bórico en la

mezcla pulverizada también eliminaría la posibilidad de la formación de amidas peligrosas. Desde una perspectiva práctica, considerando la dificultad de la ignición de estas formulaciones de AN, se cree que hay muy bajas posibilidades de un peligro real de una combustión espontánea.

Para mejorar la mezcla de AN y aluminio, una docena o más de bolas deformadas de vidrio de acuario fueron añadidas en un molino de rotación. Se deja mezclar 2 o más horas, dependiendo del tamaño del bote.

La masa requerida del cemento de contacto es pesada en un bol desechable de polietileno. Para un pote nuevo de cemento de contacto, que tiene una fracción másica de 0.21, la cantidad de cemento de contacto se puede obtener multiplicando la cantidad requerida de neopreno por la fracción másica:

$$\text{Masa de cemento de contacto} = \text{masa neopreno requerida} * 1/0,21$$

La mezcla pulverizada es añadida, de poco en poco, al cemento de contacto. La mezcla resultante es esparcida en una bandeja de horno forrada con papel de pergamino para su secado. El solvente se deja secar a una temperatura moderadamente elevada durante por lo menos 24 horas. El resultado es un producto algo flexible que se puede romper en pequeños trozos. Una muestra de este material se quema típicamente para evaluar cualitativamente su combustión. Para su ignición, una tira de magnesio o un pequeño grupo de virutas de magnesio es usado.

El siguiente paso es moler los pequeños trozos a granos bastos. Se consigue utilizando un molino de café eléctrico y un tamiz para tamizar las piezas grandes que no han sido molidas para volverlas a moler.

Los gránulos son entonces almacenados en un contenedor cerrado o en una bolsa de polietileno junto a un desecante como cloruro de calcio contenido entre algodón.

Las pastillas se hacen entonces utilizando una prensa hidráulica y moldes adecuados. Para un motor que tiene la pastilla incrustada, el molde es el mismo casing (o cámara de combustión). Por unas razones, se considera que incrustar la pastilla era una práctica aceptable. Las pruebas indican que el módulo elástico de la pastilla era suficientemente bajo, y que la tensión de rotura era suficientemente alta, que dando un esfuerzo a la pastilla sería aceptable para las pastillas con un pequeño diámetro (<32mm). El combustible se haría o bien comprimiendo hidráulicamente directamente en el motor

casing después de añadir los gránulos, o bien los gránulos serían comprimidos hidráulicamente en un molde, extraídos, y después comprimidos en el motor casing.

La masa de gránulos requerida sería pesada. Utilizando una cuchara, una cucharada de gránulos son insertados al molde. Los gránulos son compactados un poco utilizando una pieza cilíndrica y golpeándolo suavemente con un martillo pesado. Estos pasos se repiten hasta llenar el molde de gránulos. La prensa hidráulica se utiliza a continuación para comprimirla a alta presión. La cantidad de fuerza se determina a prueba y error hasta que se llega a un 95-98% de la densidad teórica de dicha formulación. La densidad que se consigue es determinada pesando el molde antes y después de cargarlo para obtener la masa de la pastilla, que es dividida entre el volumen que ocupa.

La pastilla producida por la prensa hidráulica se halla que tienen una tensión de rotura apreciable. Hasta el día de hoy, ninguna medida de la tensión de rotura se ha llevado a cabo, aunque las pruebas indican que una pastilla bien comprimida resulta tener una gran resistencia a la ruptura. Se cree que la propiedad asociada con la adhesión del cemento de contacto juega un rol importante. El cemento de contacto normalmente se utiliza aplicando una capa del cemento a dos superficies para unirlos. Se dejan secar y cuando las superficies se comprimen, ocurre una adhesión instantánea. Un mecanismo similar se cree que ocurre cuando el combustible que contiene neopreno es comprimido. La tensión de rotura del neopreno es alta, del orden de 1000 lb/sq.in.



FIGURA 2. PASTILLAS DE LA FÓRMULA A20.

5. Pruebas estáticas

Un número de pruebas estáticas se han llevado a cabo con las formulaciones más prometedoras. Las primeras dos pastillas fueron producidas con las formulaciones A12 y A13. Motores desechables de PVC fueron construidos para cada uno. Las dos pastillas tenían un core cilíndrico con 4 ranuras radiales. Los posteriores tenían una configuración

de "8-slotted pseudo-finocyl". El propósito era para tener mayor área de combustión y facilitar la ignición. Una prueba estática se llevó a cabo en junio de 2004, aunque los dos motores no se encendieron. Los ignitores estaban cargados de 2g de termita de aluminio/óxido férrico con un iniciador Spitfire.

La siguiente formulación que fue utilizada fue la A14, que fue probada en noviembre de 2004. Se fabricaron ocho motores desechables de PVC. De estos, 5 se encendieron y de estos 3 funcionaron de una manera prometedora. No se tomaron medidas. Los motores anteriores utilizaban toberas de cemento hidráulico. Sufrían de una gran erosión y se sustituyeron por grafito. Motores posteriores utilizaron un método sin fijaciones para retener las clausuras calentando el PVC.



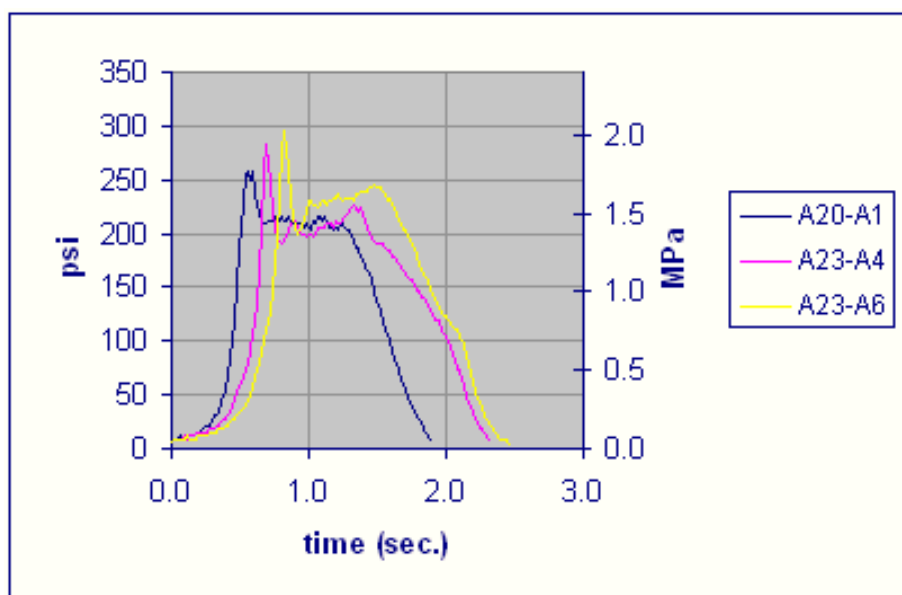
FIGURA 3. ENCENDIDA ESTÁTICA DE UN A14-A1, MAYO DE 2005. MOTOR DE UN SOLO USO DE PVC CON UNA TOBERA DE CEMENTO HIDRÁULICO.

Formulaciones de A15 y A16 también fueron probadas en motores PVC. De estas formulaciones, dos pastillas fueron producidas. 3 explotaron y una funcionó. No se tomaron medidas.



FIGURA 4. MOTORES DE PVC (IZQUIERDA) Y MOTORES DE ALUMINIO (DERECHA) EMPLEADOS EN UN TEST DE IGNICIÓN DE FÓRMULAS DE NITRATO DE AMONIO. LOS MOTORES DE ALUMINIO DE 25 MM DE DIÁMETRO SE USARON CON CIERTAS FÓRMULAS EMPEZANDO POR EL A20.

El método de fabricación de pastillas fue modificado a partir de las A20. En vez de utilizar un aglutinante "mojado", las pastillas eran "secas" fabricadas con la compresión hidráulica. Estos motores también eran diferentes, utilizando casings de aluminio de 25mm de grosor y toberas de grafito. Los resultados de las pruebas fueron más exitosos. Las formulaciones que fueron exitosas con un buen rendimiento fueron A20, A23 y A24. Se intentaron dos veces pastillas sin azufre de A26. En ambos casos, se encendió, pero se apagó él mismo después de poco tiempo. Un resultado similar ocurrió con una formulación de poco aluminio (12%), la A29. Otra formulación sin azufre, A32, se encendió correctamente.



Motor	Grain mass		Throat dia. inches	Throat area in ²	sum pressure psig	c-star	
	grams	lbs				ft/sec	m/sec
A20-A1	33.49	0.0738	0.206	0.0333	14278	3455	1053
A23-A4	36.65	0.0808	0.206	0.0333	17073	3776	1151
A23-A6	35.79	0.0789	0.207	0.0337	18384	4204	1281

FIGURA 5. CURVAS DE PRESIÓN DE CÁMARA DE LOS TEST DE IGNICIÓN DE JULIO DE 2007.

Pruebas estáticas de mayor motor (38mm) con pastillas incrustadas fueron llevadas a cabo en mayo de 2008, donde se tomaron medidas de presión y thrust. Se probaron la formulación más prometedora, A24, y la libre de azufre, A32. La combustión del A32 fue mediocre, produciendo muchas chispas blancas, indicativo de una combustión incompleta. Se vio reflejado en un *ts* mucho menor (145s) comparado con el A24, que dio 196s. Se erosionó la tobera de grafito en ambos casos. El diámetro de la garganta del A24-B1 pasó de 5.9mm a 6.2mm, un incremento del 5%. El del A32-B1, de 5.9mm a 7.5mm, un incremento del 27%. El efecto de la erosión se ve afectado en los gráficos de rendimiento: la presión decae mientras el empuje aumenta.

El A24-B1 sufrió quemaduras del casing cerca de la tobera después de 1.4s. Una examinación posterior a la prueba indicó que fue debido a que las pastillas (4 en total) tenían distintas densidades, y la más cercana a la tobera quemó primero. Las densidades relativas eran (de la punta hasta la tobera) 0,98; 0,95; 0,95; 0,92. Cuando quemó la pastilla cercana a la tobera, una bajada de presión causó que las pastillas que quedaban se auto-apagaran.



FIGURA 6. ENSAMBLAJES DE TOBERAS Y TAPAS PARA UN MOTOR DE 38 MM: IGNICIONES ESTÁTICAS DE A24-B1 Y A32-B1.

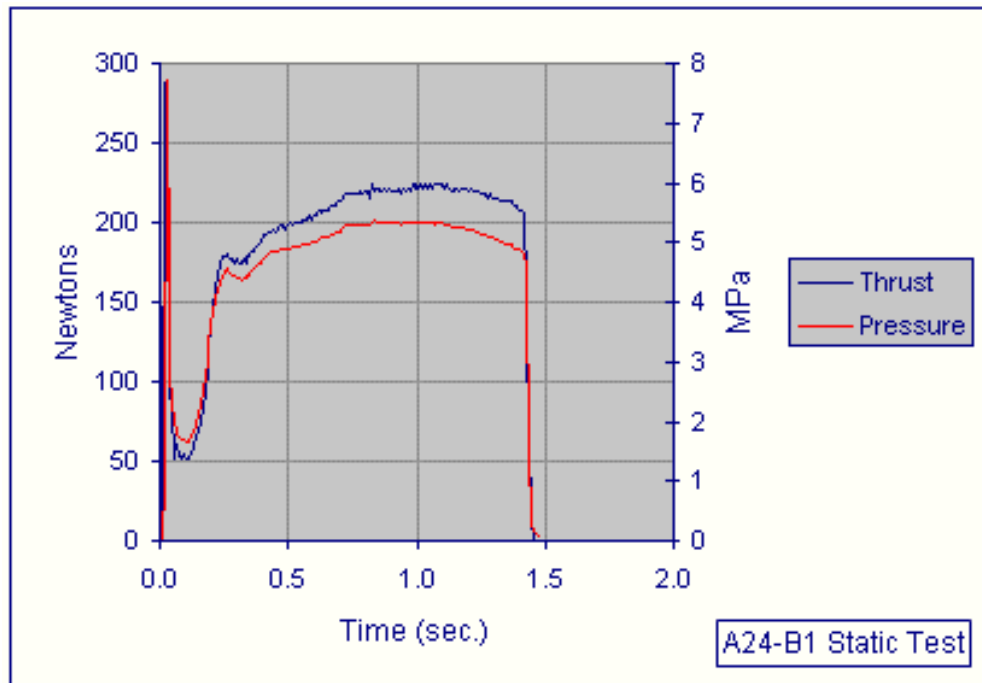


FIGURA 7. CURVAS DE PRESIÓN DE CÁMARA DEL TEST DE IGNICIÓN DE MAYO DE 2008.



FIGURA 8. IGNICIONES DE MOTORES A24-A3 (NOVIEMBRE DE 2007) Y A24-B1 (MAYO DE 2008).



FIGURA 9. RESTOS DE UN SEGMENTO DE PASTILLA DESPUÉS DE AUTO EXTINGUIRSE (IZQUIERDA). UN MOTOR A24-B1 SECCIONADO CON RESTOS DE PASTILLAS.

Pruebas estáticas Nov 2008

Tres motores A24-B, similares a los probados el mayo de 2008, fueron fabricados con el objetivo de caracterizar la formulación A24. De interés particular fue la variación de la velocidad de combustión con la presión de cámara. La formulación A24 parecía la más prometedora entre las formulaciones anteriores basado en las pruebas estáticas. Un total de 12 pastillas fueron hechas utilizando una prensa de 20 toneladas. El resultado fueron pastillas de unos 50g con una densidad relativa del 97-99% de la ideal. Cada motor tiene cuatro segmentos unidos entre ellos con silicona. Las dos puntas de la pastilla única fueron inhibidas y selladas a las paredes de la cámara de combustión. De esta manera, el área de combustión se restringía al centro, resultando en un Kn progresivo. Estos 3 motores fueron designados como se muestra en la Tabla 3. Todos los 3 motores fueron encendidos con termina Cuo/Mg contenida en una bolsa de polietileno, iniciado eléctricamente con un cable de nicromo.

TABLA 3. PARÁMETROS DE MOTOR PARA TRES DE LOS TESTS DEL 22 DE NOVIEMBRE.

Designación	Propelente	Masa de propelente (g)	Ratio de densidad medio	Rango de Kn [1]
A24-B2	A24	196.4	0.980	247-454
A24-B3	A24	191.5	0.978	361-661
A24-B4	A24	193.9	0.980	468-857

[1] Basado en el tamaño inicial de la gola.

Las pruebas estáticas fueron llevadas a cabo el 23 de nov de 2008. El A24-B2 tardó en encenderse, a pesar que la termita se encendiera bien. A24-B3 fue completamente

nominal. El tercero, con el mayor Kn, sufrió una quemadura a través de la cámara de aluminio hacia el final de la combustión, pero por lo demás fue bien. Datos del empuje y presión se recolectaron en la Tabla 4:

TABLA 4. DATOS DE RENDIMIENTO DEL MOTOR DE LOS TRES LANZAMIENTOS DEL 22 DE NOVIEMBRE.

Nombre del test	Fecha	Impulso total (N*s)	Impulso específico (s)	c* (m/s)	c*/c*ideal	Coeficiente de empuje medio	Ratio de expansión Inicial/Final	Diámetro de la gola Inicial/Final (mm)
A24-B2	Nov.2 3, 2008	329	171	122 6	.90	1.37	4.6/ 4.2	7.19/ 7.52
A24-B3	Nov.2 3, 2008	398	212	138 7	1.00	1.49	7.0/ 5.9	5.97/ 6.50
A24-B4	Nov.2 3, 2008	315*	207	136 2	.99	1.49	7.9/ 7.2	5.21/ 5.44



FIGURA 10. PASTILLAS DE PROPELENTE A24 PARA TESTS ESTÁTICOS. IGNICIÓN DEL MOTOR A24-B3.

Los números de rendimiento del A24-B2, en términos de Is y c*, fueron relativamente bajos comparados con los otros dos. La razón por esto se ve claro al ver el vídeo (abajo). El comienzo fue muy lento, es más, el ignitor casi ni encendió la pastilla. El bajo Kn sin

duda contribuyó a dificultar la encendida. Por eso, una gran cantidad de combustible se gastó al comienzo cuando el motor estaba aún generando mayor presión.

A24-B3 y A24-B4 cogieron presión rápidamente. La combustión fue siempre estable e impresionante. Debido a la quemadura a través de la cámara al final de la combustión del B4, algo de I_s potencial se perdió. Cuando el motor fue abierto después de la combustión, 38,5g de combustible se halló sin quemar. El valor del I_s y c^* que se muestra está basado en la cantidad real de combustible quemado.

Se puede ver que de la Tabla 4 que la ratio de c^* entregado e ideal es particularmente alta. Es poco posible que esto represente el rendimiento real. El valor real de c^* , que fue determinado por GUIPEP, utiliza una aproximación del neopreno utilizando el cloropreno.

6. Caracterizando el combustible A24

Basado en el éxito de las pruebas estáticas de la formulación A24, esta composición se puede considerar un combustible de cohete viable. De este modo, se le llamará "combustible" en vez de "formulación" a partir de ahora. Los resultados de las últimas pruebas estáticas, en particular la A24-B3, permitió que se pudiera caracterizar el combustible. La velocidad de quemada en función de la presión de cámara fue determinada con el método descrito en la página de "Burn Rate Determination from a Pressure-time Trace".

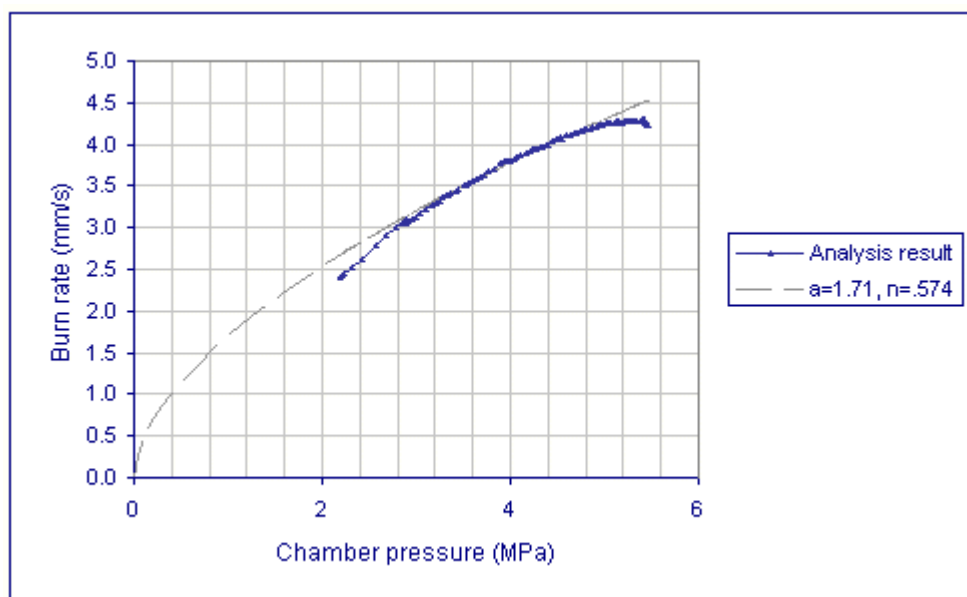


Figura 11 – Resultados de análisis de quemada

En la figura, la línea discontinua representa el mejor ajuste de una curva del estilo $r=aP^n$. En esta ecuación, r es la velocidad de combustión, a el coeficiente de presión, y n el exponente de presión. Se puede ver que esta curva es lejana de tener un ajuste perfecto, no obstante, sí que sigue la curva del análisis bastante bien durante la mayor parte del rango. El método del análisis asume que la pastilla quema (radialmente hacia fuera del grosor de la pastilla) de una manera completamente uniforme. Es más, la curva de presión medida muestra que, durante el "tail-off" (final de combustión), la presión tiende a mantenerse constante en vez de caer. Esto indica que la pastilla no quemó de manera uniforme. Para nuestro caso, los valores de a y n se considerarán suficientemente precisos. Fue confirmado al poner dichos valores en SRM.XLS con las propiedades mostradas en Tabla 5 y 6.

Parametro	MPa, mm/sec	PSI, inch/sec
a	1.71	0.00387
n	0.574	0.574

Tabla 5

Parameter	units	value	reference
mass density, ideal	gram/cc	1.765	calculated
ratio of specific heat, 2-phase	-	1.05	estimated
ratio of specific heats, mixture	-	1.166	GUIPEP
effective molecular wt, products	kg/kmol	28.8	GUIPEP
combustion temperature	K.	2688	GUIPEP
combustion efficiency	-	0.99	static test
nozzle efficiency	-	0.92	estimated

Tabla 6. Parámetros utilizados en SRM.XLS.

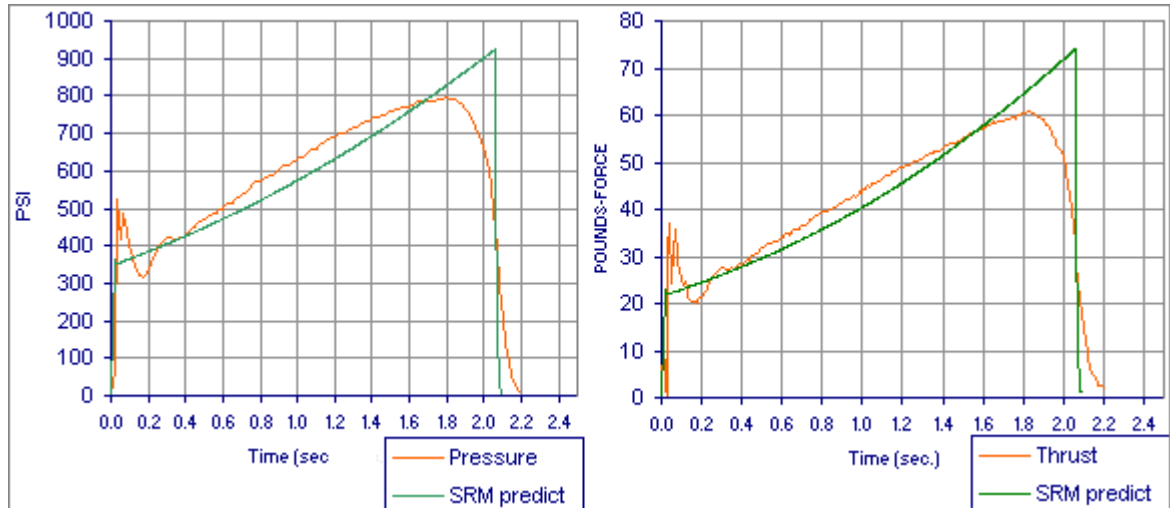


Figura 12. Comparación de la presión real y las predicciones de SRM.

7. Motor J ANCP

Después del éxito de las pruebas de los motores A24-B, y su posterior caracterización del combustible, se decidió construir y probar un motor bastante mayor. El objetivo del diseño era producir un motor J que podría ser utilizado para lanzar un cohete posteriormente. Esencialmente, el motor A24-C es una versión grande del A24-B con la capacidad de 500g de combustible. El motor es de 51mm de diámetro, comparado con los 38mm de las series B. El impulso de diseño se eligió que fueran 1000Ns. El motor fue diseñado, construido y probado exitosamente en 2010. A pesar de tener un ignitor demasiado pequeño, que redujo la eficiencia del motor, el resultado fue impresionante.



Referencias

- [1] A Review of the Global Fertilizer Use by Product, by K.G. Soh , International Fertilizer Industry Association, Paris
- [2] Nitric Acid and Fertilizer Nitrates, edited by Cornelius Keleti, Marcel Dekker Inc. (Ch.11, Properties of Ammonium Nitrate, K.D.Shah and A.G. Roberts, Imperial Chemical Industries PLC, England)
- [3] Combustion of Ammonium Nitrate-Based Compositions, Metal-Containing and Water-Impregnated Compounds, B.N. Kondrikov, V.E.Annikov & V.Yu. Egorshv, Journal of Propulsion and Power, Vol.15, No.6. Nov-Dec. 1999
- [4] U.S. Patent 5,076,868 "High Performance, Low Cost Solid Propellant Compositions Producing Halogen-free Exhaust", Dec.31, 1991.
- [5] Ammonium Nitrate Decomposition by Heat, A Literature Review, Donald R. Thomas, August 3, 1995.
- [6] U.S. Patent 5,500,061 "Silicon as high performance fuel additive for Ammonium Nitrate Propellant formulations, March, 1994/1996.
- [7] Hazards of Chemical Rockets and Propellant Handbook, CPIA Publication No.194 (1972)
- [8] Shock Initiation Characteristics of Ammonium Nitrate, A.King, A.Bauer, The Department of Mining Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, 1980.
- [9] Critical Shock Initiation Parameters for Molten Ammonium Nitrate, A.King, A.Bauer, The Department of Mining Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, 1979.
- [10] The Gasification of Solid Ammonium Nitrate, W.H.Andersen, K.W.Bills, A.O.Dekker,E.Mishuck, G.Moe & R.D.Schultz, Jet Propulsion Journal, Dec.1958.