

# Richard Nakka's Experimental Rocketry Web Site

## RNX Propelentes de composite Moldeado del Grano

Traducido por José L. Sánchez

### Apuntes Generales

El molde de grano para las cuatro configuraciones de grano más comunes aplicables al propulsor RNX se describe en este documento. Cada una de estas configuraciones es para combustión neutra o casi neutra (ver [Funcionamiento del Propulsor](#)). Estas configuraciones, ilustradas en la Figura 1, son:

1. **Cilindro sin restricción hueco**; los finales, no pueden poder ser inhibidos
2. **BATES** (cilindro hueco multisegmentado). BATES es una sigla de **B**ALLISTIC **E**VALUATION **T**EST **M**OTOR.
3. **Barra y Tubo** (cilindro concéntrico con cilindro hueco)
4. **Pseudo-finocyl** (cilindro hueco con ranuras de aleta radiales)

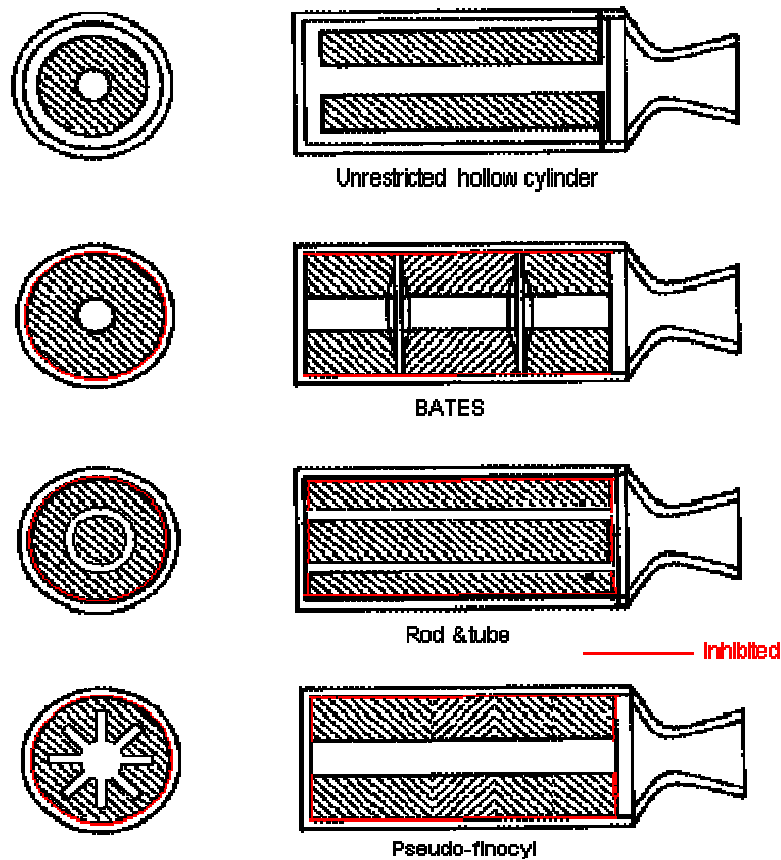


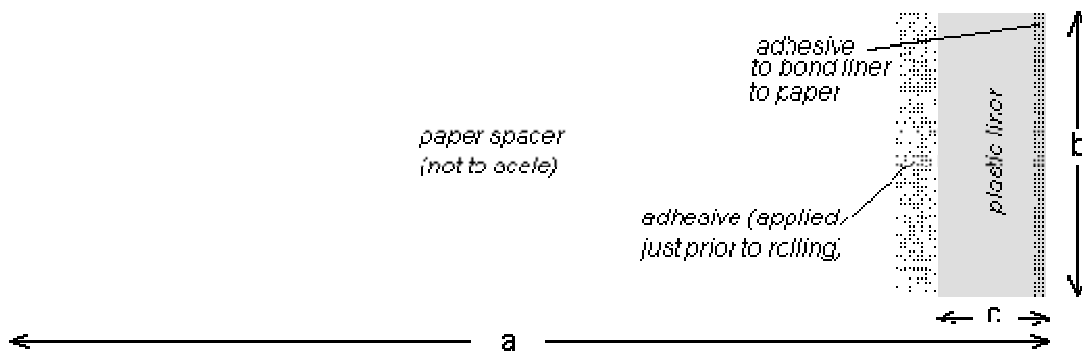
Fig. 1 Configuraciones de grano para propelentes RNX

El motor *EPOCH* normalmente utilizaba la primera configuración, un grano hueco cilíndrico con finales inhibidos. Este motor ha sido utilizado satisfactoriamente, también con un BATES o con un grano Pseudo-finocyl. El motor *PARADIGMA* utiliza la tercera configuración de grano, Un montaje de Tubo y Barra.

Para simplificar el sistema de moldeo, **la cubierta de motor** se puede utilizar como molde hembra para todas estas configuraciones.

### Grano Cilindrico sin inhibidor

Este tipo de grano primero puede ser moldeado como **un cilindro sólido** y posteriormente **taladrado** después de que el propulsor haya curado. O bien, incluir en el molde un vastago con las dimensiones del taladro principal. Moldeo como un cilindro sólido es el procedimiento más simple tanto para la fabricación del molde como para el llenado del propelente propulsor. Para ambos, la cubierta del motor sirve como el molde hembra. Puesto que es necesaria cierta holgura para permitir el flujo de los gases de combustión que son generados sobre la superficie exterior del grano, el diámetro del mismo es ligeramente menor que la cubierta. Para el motor *EPOCH*, esta holgura es 0.090 pulgadas (2.3mm) en todo el contorno. Para ello, **un espaciador** realizado de cartulina fina o de papel grueso es bastante eficaz para reducir el diámetro a modo de molde. He usado un papel de (FM - 260) de 0.018 pulgadas (0.5mm) de grosor, con 5 capas de este papel se obtiene el grosor de 0.090 pulgadas (5 x 0.018 = 0.090). Para impedir que la mezcla del propulsor impregne el espaciador, se incluirá una hoja **de plástico** fino durante el enrollado del espaciador en el lado que estará en contacto con el propulsor. El tipo de plástico más adecuado parece ser película de poliéster, ya que tiene la rigidez adecuada y se adapta bien al papel. La hoja de polietileno es también adecuada, pero su inherente flexibilidad tiende a causar algunas dificultades, pues no se adapta muy bien al papel. El tubo de plástico debería ser pegado al espaciador con pegamento de barra", **sólo en un borde** (aprox. 1 cm), como se ilustra en la Fig. 2.



La Fig. 2 – Molde espaciador y film de plastico.

La dimensión "b" debe ser 0.1" (2 mm) más larga que la cubierta del motor. Las dimensiones "a" y "c" pueden ser estimadas así:

$$a = \frac{\pi}{4} (D_{ci} + D_{go}) \left( \frac{D_{ci} - D_{go}}{t} - 2 \right)$$

$$c = \pi D_{go}$$

donde  $D_{ci}$  = el diámetro interior de la cubierta,  $D_{go}$  = el diámetro externo del grano, y la  $t$  = el grosor del papel.

El espaciador se fabrica enrollando fuertemente y con cuidado la hoja de papel alrededor de un mandril del mismo diámetro que el del grano terminado. Como mandril puede servir cualquier tubo rígido o la barra sólida, y puede ser de madera, plástico o metal. Si se dispone de un mandril con el diámetro ligeramente menor que el requerido, se puede aumentar el mismo mediante el liado de sucesivas capas de papel hasta obtener el diámetro final.

Antes de la operación de enrollado, se aplicará pegamento de barra como se muestra en la Fig.2. Debe tener cuidado y enrollar el papel uniformemente (los bordes permanecerán alineados). Una desalineación leve es aceptable, ya que los bordes pueden ser ajustados más tarde si es necesario. El espaciador enrollado, con el mandril en su interior, se introduce en la cubierta. Deberá dejar curar al pegamento totalmente antes de quitar el mandril (½ hora o más).

La cubierta después tiene que ser montada, usando una unión temporal adhesiva, en **una base** de madera, como se ilustra en la Fig.3. La base es un cuadrado que debe ser ¼ de pulgada (6 mm) mayor que el diámetro de la cubierta en todo su contorno. La base no debería ser mayor de dicha medida, ya que de otra manera el esfuerzo a la que se somete durante la operación de llenado puede provocar el desprendimiento de la misma de forma inoportuna.. La unión temporal se hace aplicando cola en caliente (polietileno) y formando un filete generoso alrededor de la unión de la cubierta y la base. Como es importante que esta unión no falle durante la operación de llenado, en primer lugar la cubierta debería ser limpiada con isopropanol o laca (fina), precalentada usando una pistola de calor o secador. Esta unión más tarde se cortará utilizando un cutter o un cuchillo de punta aguda

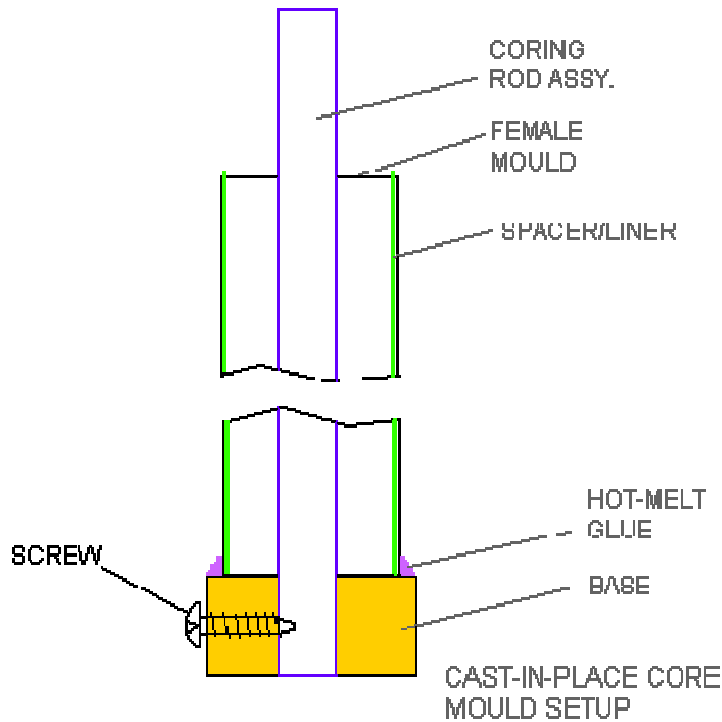


En el ultimo paso debe pegar tres o cuatro tiras de cinta adhesiva estrecha en el extremo superior del molde forrando con la misma la parte superior e interior del separador según se muestra en la Fig.3. Estas tiras de cinta tienen una función importante, ya que impiden que el espaciador sea expulsado por encima del molde durante la operación de llenado, debido a la presión "hidráulica" que es desarrollada (aprendí esta lección a fuerza de sinsabores).

La base mostrada en la Fig. 3 es para un grano que tendrá un corazón taladrado. Para el método **de la aguja de taladrado inserta en el molde**, la base debería ser más gruesa, y tener **un agujero central** taladrado para la aguja.

El diámetro del agujero debería ser tal que la aguja entre apretada. Un tornillo de rosca madera se roscará transversalmente en la base para

impedir que la aguja se desplace durante la operación de llenado. Se realizará un pequeño taladro en el lugar apropiado de la aguja donde el tornillo interactúa con la misma. El molde se ajustará aplicando calor a la cola hasta para ablandarla y conseguir situar concéntricamente ambos elementos. (ver dibujo).



A diferencia con los propulsores a base de azúcar, una simple capa de lubricado de la barra principal **no** impedirá al propulsor de epoxi adherirse a la misma, no importa como sea de gruesa la capa (otra lección que aprendí a fuerza de sinsabores). Después de muchas pruebas y errores, desarrollé una técnica muy eficaz para retirar la barra principal. La barra deberá ser cubierta **con una sola capa** de papel de escribir, asegurando la unión con cinta adhesiva cello. La longitud del papel debería ser unos centímetros más larga que la longitud de grano. La anchura del papel puede ser calculada como  $w = \pi D_c$  donde  $D_c$  es el diámetro de la barra. Con cinta adhesiva Scotch cubrimos completamente de forma helicoidal la capa de papel que cubre la barra. El mejor procedimiento es cubrirlo con dos tiras separadas. La primera capa deja un hueco que es cubierto por el segundo enrollamiento, como se ve en la Fig. 4.



Fig. 4 – Primer devanado de cinta adhesiva en forma helicoidal

La cinta y el papel se ajustan a la base y al extremo inferior de la barra. Después de que el grano haya curado, la barra se extrae deslizando fácilmente de la manga de papel. La cinta también se extrae fácilmente del núcleo del grano simplemente tirando de un extremo. Como la cinta scotch tiene una gran fuerza (más de 150 libras por estiramiento), la extracción de la misma está asegurada. La experiencia me ha demostrado que la extracción de la cinta requiere poco esfuerzo ya que esta no se pega al epoxi.

Dos métodos alternativos para este tipo de grano me han sido sugeridos recientemente por mi amigo Roman. El primero, que ha sido probado y ha funcionado bien, consiste en cubrir la barra metálica que taladra el núcleo con una funda de vinilo. El epoxi no se adhiere al vinilo, y dada su flexibilidad fácilmente se extrae del grano después de sacar primero la barra metálica. Para facilitar la extracción, la barra es lubricada con la grasa. Este método se ilustra en la Fig. 5.

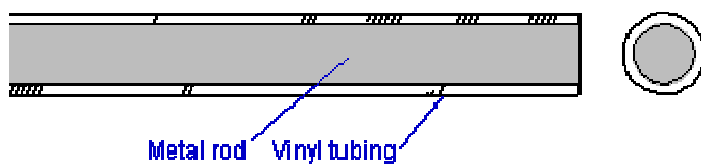


Fig. 5 Mandril forrado con funda de vinilo.

Otro método alternativo sugerido por Roman (actualmente no probado) es usar un mandril que consiste en una barra metálica bañada en cera fundida de parafina. La cera forma una superficie de no vinculación sobre la barra. Para extraer la barra después de la cura del grano evidentemente, puede ser hecha simplemente calentando el grano a una temperatura por encima del punto de fusión de la parafina. La barra debería deslizarse hacia fuera con poco esfuerzo. El residuo de cera tendría que ser limpiado a fondo de la superficie del corazón del propulsor para asegurar la ignición. Esto puede ser realizado mediante disolventes minerales, IPA, o solvente similar. Esta técnica también puede ser útil para formas de mandril más complejas, como *el de estrella o pseudo-finocyl*.

### **Grano BATES.**

El grano BATES es similar al grano hueco cilíndrico descrito anteriormente, con tres excepciones claves. Una, la superficie externa del grano es inhibida. Dos, la configuración del BATES consiste en dos o más segmentos. Tres, la combustión se produce no sólo en la superficie principal, sino también en los finales de cada segmento. El número de segmentos y la longitud de los mismos se eligen para proporcionar un perfil casi neutro Kn durante toda la combustión. Un tratamiento más cuidadoso de la configuración de grano BATES puede verse en el [ROCKET MOTOR DESIGN CHART](#) página para los propulsores a base de azúcar.

*El molde fabricado para ello*, debe ser igual o ligeramente más largo que la longitud del grano deseada. Este molde se puede hacer de la misma tubería que la cubierta de motor. En vez de usar un espaciador, se necesita **un tubo inhibidor** que cabe de modo similar dentro de la cubierta. El propulsor será introducido en este tubo, quedando íntimamente unido al mismo cuando esté definitivamente curado. Para fabricar fácilmente el tubo

inhibidor, el molde debería ser sólo un poco mas largo que la longitud de grano deseado. El corazón puede ser **taladrado** después de la curación, o mediante la inclusión en el molde de un vastago para la realización del taladro central. La Fig. 6 muestra a la hembra del molde, el tubo inhibidor, y el vastago central, así como el molde montado listo para la carga del propulsor.



Fig. 6 -- Componentes del molde para el grano BATES

A continuación se sugiere un método para fabricar el tubo inhibidor con una hoja de papel, de un grosor de 0.020" (½mm).

- Corte el papel a la medida con una anchura suplementaria de 1 cm para superponer la costura. La anchura ( $b$  en la Fig. 2) puede ser calculada como  $b = \pi D_i + b_0$  donde  $D_i$  es el diámetro interno del molde y  $b_0$  es el traslapo. La longitud,  $a$ , debería ser 0.1" (2 mm) más larga que el molde hembra.
- Utrilice un mandril que será de un diámetro inferior al del molde, lie de cartulina alrededor del mismo para "preformar" el tubo (procure no hacer pliegues).
- Inserte el tubo preformado en el molde. Abra el tubo preformado y aliselo contra las paredes internas del molde y con la utilización de un lápiz, marque la posición de la costura (haga esto a ambos extremos).
- Quite el tubo, aliselo con cuidado, y dibuje una línea que una las dos señales de lápiz. Esta línea define la costura de superposición.
- Aplique una capa generosa de pegamento en barra en la costura.
- Inserte de nuevo el tubo en el molde, abralo fuerte contra las paredes de molde, y aplique presión en la costura pegada.
- Inserte en el tubo un rodillo, y en una superficie firme plana (por ejemplo un tablero presione sobre el mismo y muevalo de adelante a atrás, como se ilustrada en la Fig. 7. Esto tiene dos objetivos: pegar la costura, y abrir el tubo firmemente contra paredes de molde.
- Deje secar la cola antes del retirarlo del molde. Si la costura no se ha pegado completamente en el borde, poga un poco mas de cola y asegure la unión, mientras seca la cola, con cinta adhesiva..





Fig.7 Rodillo para pegar la costura del inhibidor

### Grano de Barra y Tubo

La configuración de grano de Barra y Tubo, como se muestra en la Fig. 1, consiste en dos granos separados, que juntos forman una asamblea concéntrica. Hay un número de ventajas significativas en esta configuración.

- Como es un hueco cilíndrico sin inhibición, el perfil Kn es **completamente neutro** (el área de combustión permanece constante). La configuración del BATES, es casi neutra.
- **La carga volumétrica** es excelente, mejor que cualquiera de las otras configuraciones.
- El grano "de Tubo" sirve como **un aislador termal**, protegiendo completamente a la cubierta de la exposición a gases de combustión calientes. Como tal, una cubierta de aleación de aluminio puede ser empleada sin la necesidad de aislamiento termal. Otras configuraciones exponen la cubierta al calor de la combustión, sobre todo la configuración sin inhibición Cilíndrica Hueca.

Aunque estas ventajas sean sustanciales, el grano de Barra y Tubo es mas adecuado para motores grandes (por ejemplo de la clase J y superiores) debido sobre todo a la mayor complejidad de fabricación del grano y de los utiles necesarios.

El util de moldeado es similar a los usados para otras dos configuraciones. El util del núcleo, sin embargo, es un elemento adicional. Este es un molde para grano de Barra. La fig. 8 ilustra el aparato de moldeado hecho para el motor Clase J **PARADIGMA**.



Fig. 8 Componentes del molde Barra y Tubo

La siguiente serie de fotos ilustra varios componentes del sistema de moldeo de Barra y Tubo:



El inhibidor se hace esencialmente de la misma manera que "el espaciador" requerido para el grano sin inhibición Cilíndrico Hueco, usando un mandril para hacer rodar el tubo. Este método es más conveniente que el descrito para el tubo inhibidor del BATES, ya que se construye con doble grosor de papel como medida conservadora. El mandril es visible en el fondo de la foto.



El molde del grano de la barra central se cubre de una sólo capa de papel, envuelta con cinta cello. El tubo de aleación de aluminio que forma este componente se monta también en la base.



En la fotografía es visible un disco inhibidor de cartulina en el extremo del molde de *Grano de Tubo*



Detalle del mecanizado de la base en aleación de aluminio, que es sujeta a la cubierta del motor que sirve como el molde hembra. La base también asegura firmemente el molde del grano de Barra.





Corte de los discos inhibidores de los extremos en cartulina 0.030" (de 0.75 mm).



El tubo inhibidor se desliza muy bien en el molde hembra (cubierta).

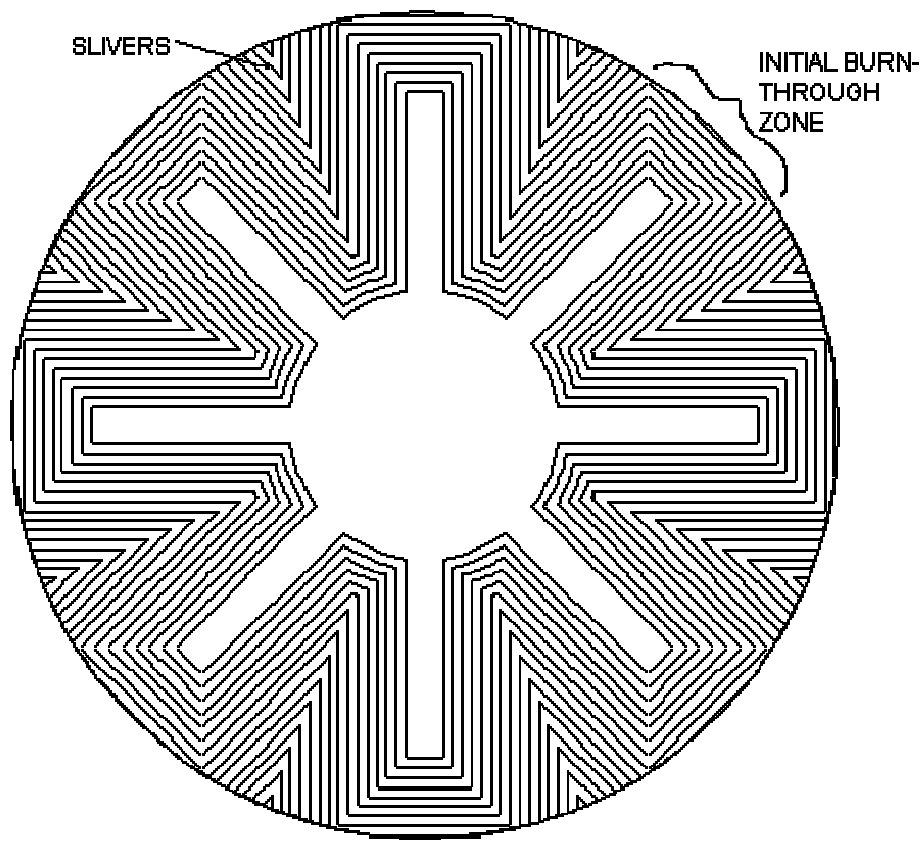


El molde montado, con las tiras de cinta aplicadas al tubo inhibidor y espaciador para mantener estos durante la operación de llenado.

### Grano Pseudo-finocyl

El Pseudo-finocyl (PFC) es la configuración de grano presentada en la Fig.1, consiste en un grano hueco cilíndrico, con la superficie externa inhibida y unas ranuras parecidas a aletas que se extienden radialmente en el corazón circular central. Observe que una verdadera geometría de grano finocyl es tridimensional. El corte transversal varía a lo largo del grano, teniendo un corazón circular únicamente en el extremo anterior. Las aletas se ponen radialmente hacia el final del grano. Una geometría Pseudo-finocyl es bidimensional, cuando tiene el mismo corte transversal en todas las partes de la longitud del grano.

- A diferencia de otras geometrías de grano presentadas anteriormente, el perfil del  $Kn$  de los PFC puede variar enormemente dependiendo de la geometría particular de las aletas y el corazón. Se han de tener en cuenta cinco variables geométricas del grano, radio principal, anchura de aleta, profundidad de la misma, y número de ellas. Como tal, es posible conseguir un perfil  $Kn$  casi neutro. El perfil PFC también puede ser adaptado para satisfacer objetivos particulares, como combustión regresiva para conseguir un alto empuje inicial. Es también posible tener un perfil que lentamente disminuye al final de la combustión. Esto es ideal para producir humo de rastreo o seguimiento.



GEOMETRIC SURFACE REGRESSION PROFILES

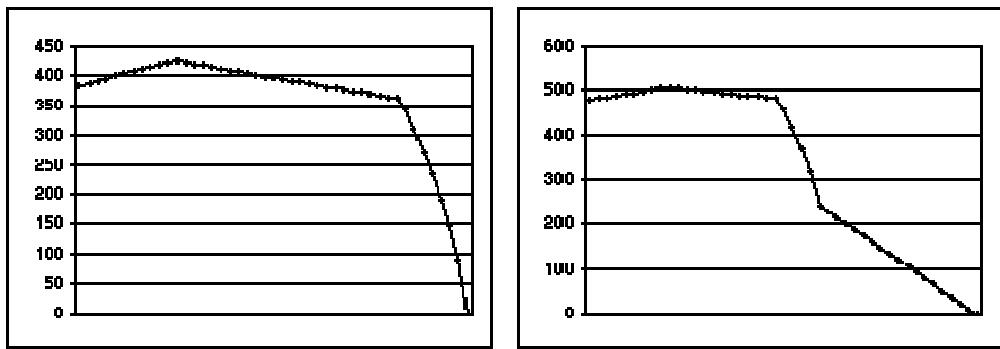


Fig.8 - Tablas que ilustran un ejemplo de  $Kn$  versus *regresión superficial* que es posible con una configuración de grano PFC. A la izquierda, una combustión aproximadamente neutra. A la derecha, una combustión neutra seguida de un decaimiento gradual.

Estas tablas han sido realizadas con la Hoja de cálculo de Excel. [PFC-BURN](#)

- **La carga volumétrica** va de bien a excelente.
- Al igual que con el grano de Barra y Tubo, el inhibidor sirve como **un aislador termal**, protegiendo la cubierta de la exposición a gases de combustión calientes. Sin embargo, el inhibidor debe ser más robusto, dado que la mayor exposición del inhibidor a gases de combustión calientes ocurre en la zona donde se quema primero el propulsor (proximo a las puntas de las aletas).

El molde para el grano PFC es idéntico al BATES. Las aletas del corazón puede ser moldeadas con el empleo de un mandril adecuado. Sin embargo, he realizado algo similar taladrando el corazón y cortando las ranuras de las aletas. Esta técnica se detallada en la sección sobre Terminación del Grano.