

# DESARROLLO DE UN MICROMOTOR COHETE DE PROPULSANTE SÓLIDO COMPUESTO PERCLORATO DE AMONIO-EPOXI

Lucio Daniel Lafata, David P. Carrasco, Omar Macaglia, Gustavo Torresan

*Departamento Estructuras y Sistemas Propulsivos Vehículos Espaciales, Centro de Investigaciones Aplicadas, Instituto Universitario Aeronáutico, Fuerza Aérea Argentina, Av. Fuerza Aérea Argentina 6500, X5018JMX Córdoba, Argentina. Tel.: 0054 351 4435000 int 34364, [llafata@iua.edu.ar](mailto:llafata@iua.edu.ar)*

**Palabras clave:** Epoxi, Propulsante sólido, Perclorato de Amonio, Micromotor.

**RESUMEN:** El compuesto Perclorato de Amonio-Epoxi se está estudiando en la actualidad en nuestra institución para la fabricación de pequeños motores cohetes. Las ventajas en cuanto a obtención comercial del polímero, costo y facilidad en el procesamiento y repetibilidad en las propiedades termodinámicas justifican estudios más profundos para reemplazo de otros propulsores para pequeños misiles. Una herramienta fundamental para el desarrollo de estos compuestos son los micromotores experimentales. En este trabajo se muestran los principales aspectos de la fabricación de dichos micromotores y los dispositivos necesarios para los ensayos. Por último se detallan los resultados de un ensayo de este tipo de micromotor.

## 1 INTRODUCCION

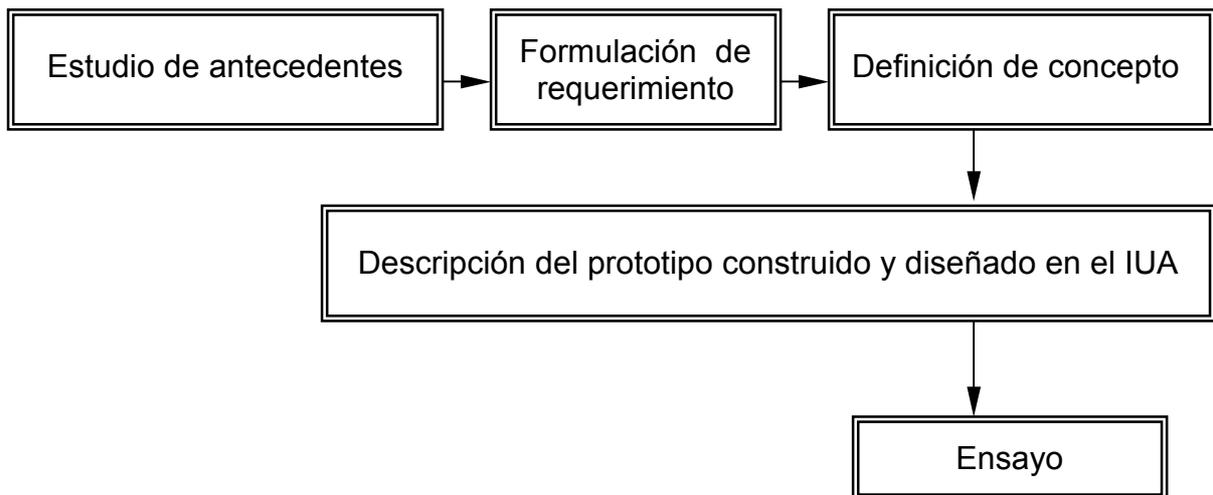
La obtención de materias primas para la fabricación de motores cohete presenta complicaciones en este momento en nuestro país. Se puede decir que la resina que se consigue más fácilmente con buenas propiedades de calidad, reproducibilidad y bajo costo es la epoxi. Es por eso que se está investigando en el CIA la posibilidad de emplearla en la fabricación de pequeños motores cohetes, iniciadores y generadoras de gas. Se han podido recolectar pocos antecedentes sobre las propiedades termodinámicas y mecánicas de estos compuestos por ello se deben investigar y determinar dichas propiedades. Esta investigación se basa en el uso de micromotores.

El presente trabajo describe el diseño, construcción, ensayos y formulaciones de un micromotor para probar distintos compuestos de PCA-epoxi. Estas pruebas se utilizarán para diseñar un pequeño motor destinado a un sistema de control de actitud utilizando cohetes vernier. También se proyecta utilizarlo en iniciadores de motores cohetes de mediano calibre.

## 2 . METODOLOGÍA PARA LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DEL MICROMOTOR DE PROPULSANTE COMPUESTO EPOXI-PERCLORATO.

La metodología aplicada se describe a continuación.

Diagrama de flujo del desarrollo



### 3 ESTUDIO DE ANTECEDENTES

Teniendo en cuenta los antecedentes y experiencia en micromotores utilizados en la calificación de los cohetes (Alacrán y Cóndor) se diseñó un micromotor en el cual se probaron diversos tipos de formulaciones y configuraciones (estrella, tobera, opérculo)

### 4 FORMULACIÓN DE REQUERIMIENTO

Para el micromotor y la bomba de prueba se establecieron los siguientes requerimientos para su diseño, desarrollo y ensayos:

- Diseño a partir de elementos y materiales disponibles o de uso comercial.
- Todos los elementos a utilizar deben estar sujetos a normas.
- Dispositivo que no se inicie, desarme, o degrade ante ambientes de vibraciones y/o choques.
- Dimensiones y geometría compatibles con el banco de ensayos disponible en el IUA.

## 5 DEFINICIÓN DE CONCEPTO

Aplicando un criterio de diseño basado en experiencias y usando soluciones tecnológicas similares a la de los micromotores citados en el punto 3, se elaboró un diseño con algunas modificaciones con respecto de sus antecesores. Si bien existían antecedentes (micromotores de ensayo PCA-PVC, PCA-CTPB, PCA-HTPB), se debieron efectuar algunos cambios debido a que el colado de los compuestos PCA\_Epoxi es muy diferente al de los propulsores anteriormente citados. Cuando se encaró este proyecto, las restricciones en cuanto a materias primas eran muy severas, por lo tanto se debió pensar en varias alternativas basándose en los siguientes conceptos.

- Propulsante confeccionado en base a resina epoxi con Perclorato de Amonio.
- Micromotor metálico con protección térmica interna
- Se consideraron distintos tipos de estrellas y espesores de opérculo (configuraciones).
- Diseño del tren de fuego mediante ensayos, búsqueda y procesamiento de información a partir de inflamadores eléctricos existentes y variando las cargas pirotécnicas.
- Distribución interna de los elementos del micromotor se diseñó de acuerdo a experiencia precedente.

## 6. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO CONSTRUIDO Y DISEÑADO EN EL IUA.

El desarrollo fue efectuado según la metodología clásica de diseño, construcción de prototipo y ensayo. Cuando se consideró necesario se efectuaron correcciones. Se seleccionó la configuración más promisoría y se implementaron rediseños para introducir mejoras. Esta secuencia, que está en un todo de acuerdo con la metodología descripta.

## 7. DESCRIPCIÓN DEL MICROMOTOR

Tubo metálico con protección térmica

Acondicionamiento y/o adaptación de los elementos de colado.

Formulación, mezclado, colado y curado del micromotor

Desmolde, extracción del noyo/estrella y alistamiento del micromotor.

Integración del micromotor con bomba de prueba.

Instalación de la bomba de prueba en dispositivo de ensayo.

Ensayo

### 7.1 Preparación del tubo con la protección térmica

El tubo utilizado es de acero AISI 4130 cuyo diámetro interior de 59mm y Exterior de 62mm  $\pm 0.1$ mm.



foto1 tubo sin protección térmica



foto2 tubo con protección térmica



foto3 tubo con PT y propulsante

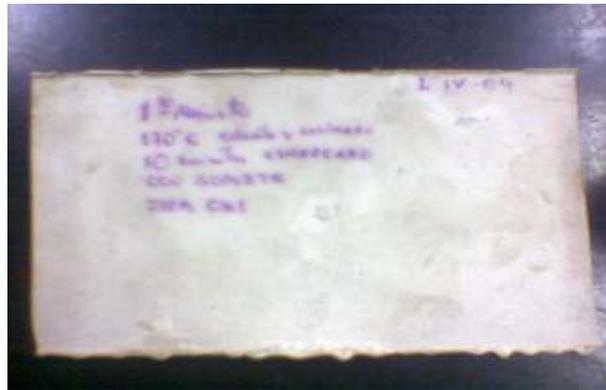
Para la aplicación de la protección térmica (PT) o camisa inhibidora en el tubo de acero se debe seguir distintos pasos e implementar diversos dispositivos. Esta Protección fue construye en Policloruro de Vinilo (PVC) en la Planta Piloto del CIA.

### 7.1.2 Aplicación de la Protección Térmica

La PT de resultados mas promisorios es la que se elaboro de la siguiente manera: En una primera etapa se debe preparar el plastisol 100/60 (100 partes de PVC -policloruro de vinilo-, 60 partes de DOP -dioctil phtalato-) con una carga del 1% de Dióxido de Titanio, foto 4. Para la aplicación de la misma se coloca el tubo, previamente enarenado dentro del horno a 170° el tiempo necesario para que se ecualicen las temperaturas, luego se extrae del horno y se procede a llenar el tubo hasta el ras con la preparación de plastisol, se lo deja reposar por aproximadamente 30 segundos y se descarga el exceso quedando pegada una fina capa sobre este, luego se introduce en el horno el tubo manteniendo esa temperatura durante 10 minutos para lograr así el curado del polimero. La foto 5 muestra una protección térmica extraída del tubo una vez curada a los fines de evaluar sus propiedades y decidir si se utilizará como camisa inhibidora.



**foto4** Mezclado del plastisol y colocación en tubo



**foto5** Muestra de protección térmica para calificar



**foto 6** Curado y acondicionamiento de la PT



**foto7** Tubos acondicionados

### 7.2 Acondicionamiento de los elementos de colado.

Una vez aplicada la PT en el tubo micromotor se puede realizar el colado del propulsante en su interior, para ello se debe tener en cuenta el preparado de ciertos elementos y herramientas tales como: probeta para el colado (foto 8). Cámara de colado con vibradora y con bomba de

vacío (foto 9), conductos e implementos por donde pasara el propulsante (foto10) , accesorios para el enfriamiento de la mezcla durante el proceso del colado (foto11).



**foto8** Probeta de colado completa



**foto9** Cámara de vibrado y vacío



**foto10** Cañerías colado propulsante al micromotor



**foto11** Termo con la mezcla propulsante enfriada

El teflonado de todos los elementos de colado que estén en contacto con el propulsante es de vital importancia, para que luego del curado se pueda desmoldar con facilidad evitando de esta manera someterlo a tracción y compresión y no correr riesgos de fractura o desgarre de material propulsante (foto12).



**foto12** Placa base

Estrella con vástago

Anillo rebase

Separador

Cierre superior

### 7.3 Formulación, mezclado y colado del micromotor.

Una vez que se tienen los elementos anteriormente descritos se procede a la confección del micromotor de resina epoxi-perclorato. En este caso y teniendo en cuenta varias formulaciones y ensayos se decidió por el amasado y llenado de un propulsante según la siguiente formulación.

Combustible: Resina epoxi.	30	%
Reductor: Aluminio en polvo diámetro promedio 7 micrones.	11	%
Estabilizador de Combustión: Cromato de Bario.	2	%
Catalizador de Combustión: Óxido Férrico.	1	%
Ligante del Oxidante al catalizador: Epon	1	%
Oxidante: Perclorato de Amonio.	55	%

Con respecto a la Granulometría del Perclorato de Amonio (PCA) la que se utilizó es la siguiente:

80 Micrones	50 %
200 Micrones	30 %
400 Micrones	20 %

Como se trata de una resina epoxi, a medida que se va agregando y mezclando los componentes se debe mantener a baja temperatura el recipiente donde se realiza la mezcla ya que el tiempo de curado se ve reducido drásticamente cuando esta tiene carga. Lo ultimo en agregar en el amasado del propulsante es el agente de curado.

#### 7.3.1 Introducción de la mezcla preparada.

La formulación preparada y permanentemente mezclada se vierte lo más rápido en el dispositivo confeccionado a tal fin, tratando de mantenerla a la menor temperatura posible para evitar el curado del propulsante dentro del sistema de colado y inevitable taponamiento (foto13 y 14).



foto13 Conductos para introducción mezcla



foto14 Micromotor después del colado

### 7.3.2 Vibrado y vacío.

Mientras se hace el colado de la mezcla esta cae al molde en una cama vibradora mientras se le hace vacío. El vacío y vibrado continua durante unos 10 minutos a los fines de evitar burbujas de aire en el propulsante y zonas sin rellenar en el tubo.

### 7.3.3 Cierre, anclaje final y curado.

Terminado el vacío y el vibrado en la cámara de colado se saca el micromotor de la cámara y se le coloca el anillo de rebase (tapa superior del molde de colado) y se introduce la estrella o noyo que seleccionado anteriormente quedando armado foto 14. Realizados los pasos anteriores, el molde armado queda como se puede ver en la fotos 15 y 16, sobresale por los agujeros de rebase el propulsante que se colocó de más con el propósito de asegurar que no queden espacios sin material preparado. Se debe esperar 24 horas a una temperatura de 20° C a 25° C para el curado total de la mezcla propulsante.



foto15 Micromotor curado



foto16 Rebase del propulsante

## 7.4 Desmolde y extracción de la estrella/noyo

Los pasos a seguir para el desmolde del propulsante son los siguientes

### 7.4.1 Corte

Después de transcurrido el tiempo de curado, se procederá al desmolde, hay que tener en cuenta que se trata de una resina epoxi y que estas suelen tener una gran adhesión a las superficies, las piezas tratadas con teflón disminuyen este agarre pero no obstante la tarea de retirar los elementos como la estrella no es fácil y se debe tener extremo cuidado. En el desmolde se debe poner atención en dos factores importantes, proteger la integridad del grano y no provocar una iniciación de este (para ello se debe trabajar con material antichispa foto 17). La estrella se retira ejerciendo presión sobre la misma con una prensa foto 18.



foto17 Corte del propulsante



foto18 Extracción del noyo con prensa

#### 7.4.2 Arreglos de la superficie.

Luego de la extracción del noyo/estrella (de los cuales se confeccionaron y ensayaron varios tipos) se hacen los arreglos necesarios a la superficie de quemado ya que esta podría estar inhibida por la presencia de teflón y/o los agentes desmoldantes usados en la etapa de colado y que provocarían una iniciación defectuosa del propulsante. Para evitar esto se procede al lijado de estas superficies con el cuidado necesario ya que se trata de una mezcla pirotécnica. (fotos 19 y 20).



foto19 Extracción noyo cilíndrico



foto20 Extracción noyo estrella

### 7.4.3 Control radiográfico.

Para realizar un control del amasado se deben radiografiar los micromotores, a los fines de detectar poros o grietas. (foto21 y 22). Aquí se puede apreciar distintas configuraciones de noyos/estrellas.



Foto21 Radiografía Tubos con estrella y cilíndrica



foto22 Tubo con rosca y noyo cilíndrico y sin noyo

### 7.5 Procedimientos e Integración del micromotor en Bomba de Prueba.

Para integrar el micromotor para realizar el ensayo correspondiente se debe tener en cuenta y completar los siguientes procedimientos.

#### 7.5.1 Descripción del iniciador, carga pirotécnica, armado y colocación del iniciador para el micromotor.

El cuerpo contenedor de la carga pirotécnica que le confiere el encendido al micromotor lo llamamos iniciador, (vista lateral del mismo en (foto23)). El iniciador desarrollado para este micromotor consta de dos cámaras en las que se alojan distintos materiales pirotécnicos: La cámara inferior (a) está ubicada en la parte interior de la rosca, es decir en el sector izquierdo y la cámara superior (b) es el sector derecho o delantero, tiene 8 orificios laterales de 4 mm c/u. Estas cámaras están separados entre sí por una pared de 5 mm de espesor que a la vez se comunican por 9 orificios de 1mm c/u (foto24). La tapa principal de la carga pirotécnica posee tres agujeros de 6 mm c/u igualmente espaciados por donde salen longitudinalmente los gases incandescentes recorriendo el canal principal del micromotor.



foto23 Sector (a) Sector (b) Tapa



foto24 Separación de cámaras Tapa

#### 7.5.2 Carga pirotécnica del iniciador.

La descripción cualitativa y cuantitativa de los componentes de la carga pirotécnica con la cual se realizaron varios encendidos del tren de fuego es la siguiente: En la cámara inferior (a) los componentes son:

Pólvora de Aluminio tipo MI9	1,0 gr
Pólvora tipo 3f	1,5 gr

En la cámara superior (b) los componentes son los siguientes:

Pastillas tipo 2B	2,0 gr
-------------------	--------

Estas pastillas fueron realizadas en Planta piloto del I.U.A. de acuerdo con: "Desarrollo de Pastillas Tipo IIB y Granos Tipo VII según Normas M.I.L. P46994B". "Documento: N° DOS 1220IE 01". (foto25).



foto25 Cámara inf. (a) con 3f y MI9

Pastillas tipo 2B y separadores

Tapa

### 7.5.3 Llenado de la cámara inferior (a) del iniciador.

Para el armado completo del iniciador se coloca primero en la cámara (a) un separador (film de polietileno de 5 micrones) tapando los 9 orificios que comunican ambas cámaras. Con la colocación del mismo se evita el pasaje de la carga pirotécnica de una cámara a la otra. Luego se introduce el tren de fuego del iniciador con los componentes indicados en 7.5.2 para la cámara (a). Luego se hermetiza (cubriendo) con un trozo del mismo film de polietileno y se adhiere a la base con resina epoxi con la precaución de que el adhesivo no obstruya la rosca del iniciador esto se puede apreciar en la foto anterior.

### 7.5.4 Llenado de la cámara superior (b) del iniciador.

Los orificios de salida de gases laterales de la cámara superior (b), se tapan internamente con el film de polietileno mencionado y se procede a colocar la carga de pastillas tipo 2B indicadas en el punto 7.5.2. y foto 25

Una vez introducida las pastillas se procede a colocar, como relleno del volumen sobrante de la cámara superior (b), poliestireno expandido de media densidad. Posteriormente una plancha de 2mm de espesor de poliuretano.

### 7.5.5 Colocación del iniciador.

Una vez armado por completo el iniciador del micromotor y colocado en el cabezal como se puede apreciar en la foto26 junto al tubo micromotor con el propulsante resina epoxi-perclorato terminado según punto 7.4 se procede al armado del conjunto según se muestra en las fotos 27 y 28.



foto26 Cabezal con iniciador. Micro



foto27 Colocando



foto28 Micromotor colocado en cabezal

### 7.5.6 Preparación y colocación de las cabeza de encendido

Las cabezas de encendido o inflamadores (dos en paralelo en este caso) son poteados con resina epoxi y colocados en un pasamuros foto 29. Una vez curada la resina y haber medido la resistencia siendo aproximadamente 2,1 Ohm cada uno y 1,2 Ohm en paralelo respectivamente (fotos 30 y 31)



foto29 Pasamuro con inflamadores



foto30 Resistencia 1 inflamador



foto31 Resistencia 2 inflamadores.

### 7.6 Instalación de la bomba de prueba en dispositivo de ensayo

A continuación y a los fines de realizar el ensayo para evaluar el comportamiento del propulsante en base a resina Epoxi /Perclorato de amonio se traslada el dispositivo al banco de ensayo. El ensayo se puede realizar de dos maneras:

#### 7.6.1 Ensayo de encendido del micromotor sin tobera.

Para realizar un ensayo a los fines de hacer pruebas de encendido, continuidad de combustión, tipo de combustión, y alcance de la llama sin obtención de datos como son la presión y empuje se procede de la siguiente manera: Se instala el en el banco de ensayos el dispositivo armado según punto 7.5.5 Es decir el micromotor con su correspondiente cabezal, pasamuros e iniciadores de forma vertical como se observa en la foto 32.

#### 7.6.2 Ensayo de encendido dentro de la Cámara de volumen Simulado (CVS)

Si se desea obtener datos de la presión generada por el iniciador y del micromotor se armará el dispositivo de ensayo como lo indica la foto 33.

Este ensayo es para medir la presión obtenida dentro del iniciador y dentro del micromotor para de esta manera empezar a corregir los parámetros que se desean obtener



foto32 Ensayo vertical de llama



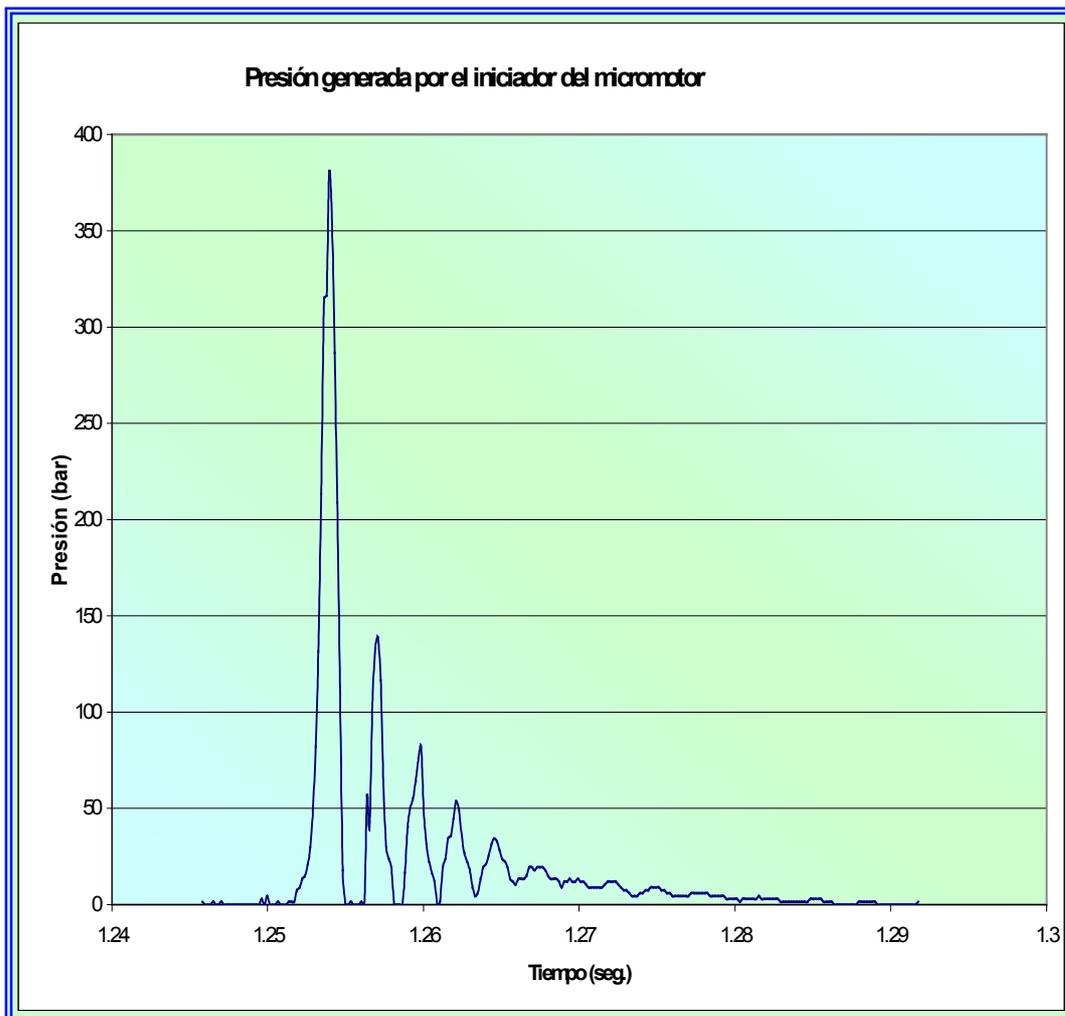
foto33 Colocación en CVS

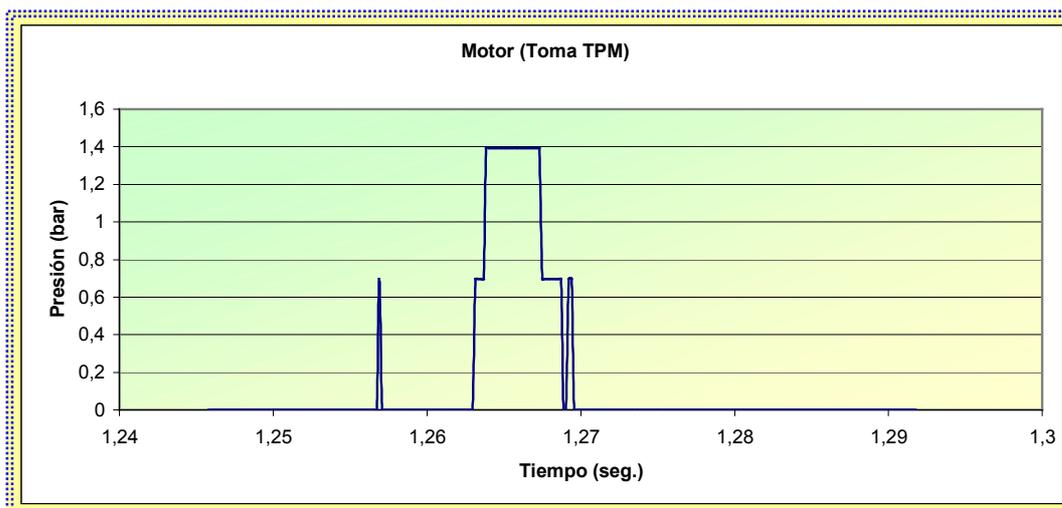


foto34 Colocado CVS listo para ensayo

## 7.7 Ensayo

Cumplimentados los pasos anteriores se procede a la ejecución del ensayo, se adjunta uno de los ensayos más representativos donde se puede apreciar los datos relevados en las planillas y gráficos.





### Planillas de ensayos de datos cargados y obtenidos

Los datos obtenidos:

Hora	12:20:20	*
Intervalo	0,00017 [seg]	*
Calibr. presión	170,59 170,59 [Bar]	*
Ident.Motor	1er colad/ Vibra/ Vac CVS 24-06-05 C/Toma TPI y TPM	#
Número amasado Grano	6° epoxi CLM (O3 Fe2/ Al/ Cl O4(NH4). CrO4Ba)	#
Fecha amasado Grano	17-Dic-04	#
Superficie Quemado	6200 (mm2)	#
Número de Iniciador	3	#
Carga del Iniciador	51,5 (g)	#
Diámetro de Tobera CVS	72[mm]	#
Numero de Preiniciador	3 Ser? Gerital	#
Carga del preiniciador	1g MI9; 1,5g pólv. FFF; 2g Pastillas Tipo 2B Total=4,5g	#
Diámetro Tobera Iniciador	10mm	#
Opérculo de CVS	Acetato espesor 0,2 mm	#
Opérculo del Iniciador.	Acetato espesor 0,2 mm	#
Numero Amasado	7	#
Temperatura	15 [°C]	#
Humedad	45 [%]	#
Presión Máx en CVS (TPM)	1,4 [Bar]	*
Presion Máx en Preini (CC)	370 [Bar]	*
Comienzo/ final Preiniciador	1,245--1,291	*
Tiempo de acción Preini	0,08 (seg)	*
Comienzo/ final Ini en CVS	1,256--1,269	*
Tiempo acción Ini en CVS	0,013 (seg)	*
Diferencia tiempo de Inicio	1,245--1,263	*
Retardo de Toma CC a TPM	0,018 (seg)	*

Si en la última columna figura un signo (\*) representa un dato Obtenido  
 Si en la última columna figura un signo (#) representa un dato Cargado

## **8. CONCLUSIONES**

- 1- Los ensayos que pudieron realizarse nos muestra que el micromotor funciona, aún teniendo en cuenta que los datos relevados no son el total de lo previsto.
- 2- El diseño probó ser eficiente desde los primeros ensayos. El aprovechamiento de los antecedentes y experiencia precedente fue la clave de este diseño correcto.
- 3- El procedimiento de fabricación, basado también en experiencias anteriores también probó ser eficiente.
- 4- De todos modos este micromotor hasta ahora fue útil solamente para poner a punto las formulaciones de propulsantes. No se utilizó hasta ahora para evaluar bachadas de motores más grandes. Las diferencias en los procesos de colados de HTPB, PVC, CTPB con el epoxi pueden resultar en que estos micromotores no sean totalmente representativos de las coladas de motores grandes
- 5- El montaje del motor en la cámara de volumen simulado no presentó ningún tipo de problema pudiéndose hacer los ensayos exitosamente.