

17  
2el.



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



EXAMENES PROFESIONALES  
FAC. DE QUIMICA

METODO ALTERNATIVO PARA OBTENER  
DESPLAZAMIENTOS EN MAQUINA DE TRACCION  
UNIVERSAL

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A

FERNANDO SALAZAR GONZALEZ



MEXICO, D. F.

, 1998

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

259392



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

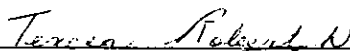
**Jurado asignado:**

<b>Presidente</b>	Prof. Noguez Amaya Ma. Eugenia
<b>Vocal</b>	Prof. Salas Banuet Guillermo F.
<b>Secretario</b>	Prof. Robert Nuñez Teresita
<b>1<sup>er</sup>. suplente</b>	Prof. Aramburo Pérez Gerardo
<b>2<sup>do</sup>. suplente</b>	Prof. García Galan Sergio

Sitio donde se desarrolló el tema:

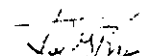
Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad  
de Química, U.N.A.M.

Asesor del Tema:

  
\_\_\_\_\_

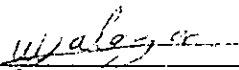
Mtra. en Ing. Teresita Robert Nuñez

Supervisor Técnico:

  
\_\_\_\_\_

Ing. José Ramírez Vieyra

Sustentante:

  
\_\_\_\_\_

Fernando Salazar Gonzalez

# INDICE.

<i>Capítulos.</i>	<i>Pag.</i>
<b>1.- INTRODUCCIÓN.</b>	1
1.1.- OBJETIVO	3
1.2.- HIPOTESIS	4
<b>2.- ANTECEDENTES TEORICOS.</b>	
2.1.- Características de los metales.	5
2.1.1.- Comportamiento plástico y elástico	5
2.1.2.- Ensayo de compresión	6
2.1.3.- Esfuerzo y Deformación ingenieriles.	7
2.1.4.- Esfuerzo y Deformación reales	9
2.1.5.- Endurecimiento por Deformación.	15
2.1.6.- Pandeo	16
<b>3.- CARACTERISTICAS DE LA MAQUINA</b>	
3.1.- Rigidez	17
3.2.- Extensómetros	19

<b>4.- FRICCION</b>	<b>20</b>
4.1.- Origenes y clasificación	23
<b>5.- EL ALUMINIO</b>	<b>25</b>
5.1.- Propiedades del aluminio.	26
5.2.- Tabla 1	27
<b>6.- DISEÑO EXPERIMENTAL</b>	<b>28</b>
<b>7.- RESULTADOS Y DISCUSION</b>	<b>31</b>
7.1.- Tabla II	37
7.2.- Gráficos de Esfuerzo Vs Deformación	39
7.3.- Gráficos de Alturas Vs Tiempo	64
7.4.- Gráficos de Areas (vídeo y real) Vs Tiempo	82
7.5.- Discusión	85
<b>8.- CONCLUSIONES.</b>	<b>88</b>
<b>9.- BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>89</b>

**A mis Padres:**

**Rubén y Margarita, por todo el apoyo que me han dado  
estos años, sus enseñanzas y consejos, porque  
gracias a ustedes es posible este triunfo.**

**A mis Abuelitas:**

**Elodia y Margarita (q.e.p.d), por todo el tiempo que  
estuvieron conmigo, y por todo el tiempo que  
seguirán acompañándome**

**A mi hermano Rubén:**

**Que siempre me apoyó y creyó en mí, cuando lo  
necesité y para que todo salga bien**

**A Mary, Mayí, y Chicho ¡Gracias por estar aquí!**

**A mis tíos:**

**Carmen y David por estar siempre con mi familia con  
todo el cariño que se han ganado.**

**A mis tíos y primos.**

**A mi Atenea:**

**Por estar siempre conmigo, ayudándome, apoyándome y cuidándome cuando lo necesito, para que todo lo que deseamos se haga realidad.**

**A mi hermano Rafa y a mi cuñadita Ari: Porque desde al ida en que nos conocimos sabíamos que esta amistad es para siempre, hemos pasado tantas cosas, y seguirán pasando, por todos los años que hemos pasado y lo que nos falta por pasar.**

**A todos los Miranda por ser como son.**

**Al dúo que conmigo acomplejo el trío, Carlos A. Hernández (El Negro) y Hugo A. Mosqueda por ser mis amigos, hermanos, maestros, y alumnos cuando es necesario, por todo el apoyo que me brindan.**

**A Farah, mi hermanita que siempre está conmigo.**

**A Francisco García (Panchito) por ser de la familia**

***A mis amigos de siempre***

***Edgar Guzman, mi compadre, Gina Ramírez, Raulito (Bodoque), a***

***Alex Y Teté, por su amistad, por andarme aguantando siempre.***

***A mis amigos y compañeros de la facultad:***

***Luisa Fer, Nora, Luis Gonzaga, Roma, Paco, Nacho, José Juan***

***(Mitz), Sergio Fabre (Mac), Carlos A. (El Patas), José***

***Navarrete (Chepe), Gerardo (La bestia).***

***Al Jesús Ferruzca (Super Chucho), a Gabriel (El gabis)***

***por haberme recibido tantas veces, por sus consejos y  
favores.***

***A mis profesores:***

***A la maestra Tere por ser un gran apoyo, por su ayuda y la  
oportunidad de trabajar con ella.***

***A José Ramírez Vieya por se el mejor asesor técnico que alguien  
puede tener.***

***Al Dr. José Saniger. a José Ocollan, y a Norma por todo el tiempo  
que me aguantaron.***



## 1.- INTRODUCCIÓN:

Los metales son materiales de uso cotidiano en todas las áreas que se pueda pensar, su utilización se extiende a tiempos muy remotos, así, la selección de uno de ellos para un uso en específico, es de gran importancia. Es de todos sabido que cada metal presenta propiedades únicas y características, las cuales pueden ser modificadas por diversos medios, (tratándolos térmicamente, aleándolos, etc.)

Las propiedades de los metales en general pueden ser clasificadas en eléctricas, mecánicas, químicas, físicas, termofísicas, etc.

Las propiedades mecánicas de los materiales son la primera aproximación para su selección en un uso determinado, este comportamiento a diferentes temperaturas y velocidades de deformación se puede determinar por pruebas ya normalizadas; ( tracción, compresión, torsión, dureza, desgaste, impacto, etc.).

Dentro de las pruebas mecánicas para materiales, el comportamiento ante esfuerzos tensiles o compresivos se puede realizar por medio de tres pruebas; la de tracción, la de compresión y la de torsión.

La que vamos a tomar en consideración es la prueba de compresión estandarizada bajo la norma (ASTM E9-89, ref.1) la cual utiliza cilindros sólidos metálicos de diferentes relaciones altura - diámetro (H/D).

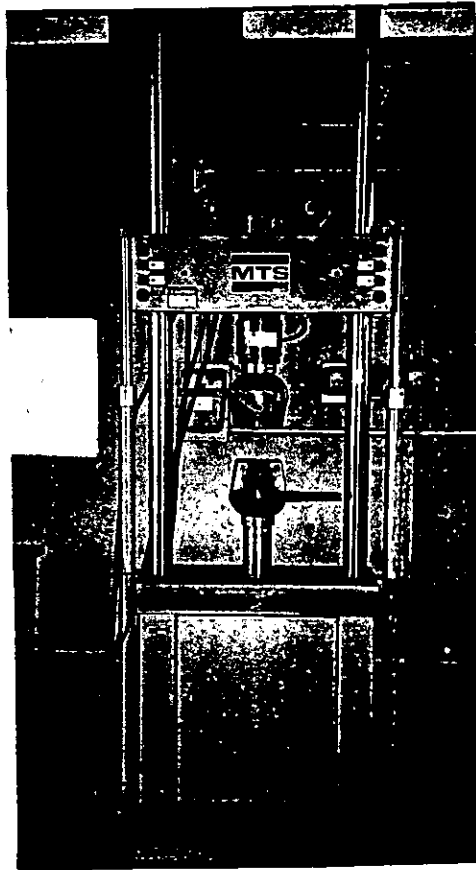
Esta prueba de compresión es utilizada para medir el límite elástico, el módulo de Young (Módulo de elasticidad), la fluencia del material y su endurecimiento al ser deformado, para así poder conocer ciertas propiedades del material al que se le hace la prueba.

Esta prueba se hace en una máquina de tracción universal (MTS) (Fig.1) con la utilización un medidor de desplazamiento del material; llamado extensómetro.

Cuando la máquina realiza un ensayo de compresión o tracción, indica el desplazamiento del pistón, el cual está afectado por la deformación elástica sufrida por el sistema de prueba. La constante de elasticidad de este último se llama "rigidez".(ref.2)

El extensómetro nos dará el desplazamiento real de la probeta ensayada.

Los equipos más actuales constan de sistemas computacionales colocados a este tipo de máquinas, pero debido al costo de este equipo (extensómetro, paquetería computacional etc.) no es de fácil adquisición por la industria Metalmeccánica que se encuentra en el país, por lo que se pensó en un método alternativo que pueda cumplir confiablemente con las funciones del equipo a un costo relativamente barato. Y así comparar los datos obtenidos directamente de nuestra máquina con los calculados a partir de la información dada por una videgrabación, y observar en que casos la sustitución puede ser realizada.



**Figura 1.- Máquina de tracción universal No. 810 que se encuentra en el edificio "D" de la Facultad de Química C.U.**

### **1.1.- Objetivo**

- Encontrar un método alternativo de medición del desplazamiento de la muestra que pueda cumplir confiablemente con las funciones de un extensómetro, a un costo relativamente bajo.

## **1.2.- Hipótesis:**

La disminución de altura y cambio de diámetro (abarrilamiento) de un cilindro metálico provocada por una carga compresiva, en un tiempo dado, es filmada por medio de una cámara de vídeo y esos valores pueden ser medidos directamente sobre una pantalla plana de televisor, utilizando un medidor (Vernier).

Se piensa que el método puede ser factible si se toman los debidos cuidados tanto al momento de filmar la prueba, como al colocar la cámara, su enfoque y al hacer la lectura.

De esta manera se obtienen diámetros y alturas reales de las muestras con respecto al tiempo de aplicación de carga para así calcular deformaciones y esfuerzos reales.

## **2.- ANTECEDENTES TEÓRICOS**

### **2.1.- Características de los metales.**

Para conocer las características de los metales, y así hacer una selección para un uso específico, se necesita de la aplicación de ensayos o pruebas.

Existen muchas razones por las que se deben conocer las características de un material, por enumerar algunas podemos mencionar:

- 1) Para la selección de un material óptimo para un uso específico.
- 2) Para control de calidad en cualquier etapa de un proceso para mantenerlo dentro de los estándares del mismo.
- 4) Posteriormente, para la determinación de fallas estando el metal en servicio.
- 5) Por último, se usan en la investigación de nuevos materiales.

Existen tres pruebas básicas para la obtención de la relación esfuerzo - deformación que son:

El ensayo de Tracción, compresión y Torsión.

#### **2.1.1.- Comportamiento Plástico y elástico.**

Los materiales sólidos pueden ser deformados cuando se aplica a ellos una carga externa, también se sabe que existe un cierto límite en donde los materiales retornaran a sus dimensiones originales cuando la carga es removida.

Esto se conoce como comportamiento elástico. (ref.3)

La carga límite más allá donde el material ya no se puede comportar elásticamente, se conoce como "Límite Elástico". Si este se excede, el cuerpo experimentará una deformación definitiva cuando la carga sea retirada, un cuerpo que sufre este tipo de deformación se dice que tiene una deformación plástica. (ref.2)

### 2.1.2.- Ensayo de compresión

La prueba consiste en la aplicación de una fuerza uniaxial a una muestra, generalmente de forma cilíndrica, y se determina el comportamiento compresivo del material. En algunos de los procesos metalúrgicos tales como forja, laminación y extrusión, este es el estado de esfuerzos que predomina. (ref . 2)

Las curvas esfuerzo - deformación en compresión , son altamente influenciadas por la fricción entre el acabado superficial de la probeta y las placas de compresión. La relación geométrica de las piezas cilíndricas va a ser de gran importancia, debido a que a una alta relación H/D se presentará una menor resistencia a la deformación que una pieza con una relación H/D pequeña en donde la resistencia a la deformación será más alta. Además, si la relación H/D es mayor de 2 se puede producir pandeo.(ref.4)

La curva esfuerzo deformación se desplaza hacia arriba cuanto más ásperas son las superficies de contacto, esto nos indica que existe un mayor gasto de energía al tratar de deslizar las probetas en las placas compresoras, dicho gasto energético es debido a la presencia de una fuerza paralela a las superficies en contacto que se oponen al movimiento relativo de los cuerpos. Esta fuerza se le conoce como fuerza de fricción.(ref.5)

### 2.1.3.- Esfuerzo y Deformación Ingenieriles.

Consideremos una varilla cilíndrica de longitud  $l_0$  y una área de la sección transversal  $A_0$ , sometida a una fuerza de tensión uniaxial  $F$ , como se muestra en la figura. (Fig 2) (ref. 3)

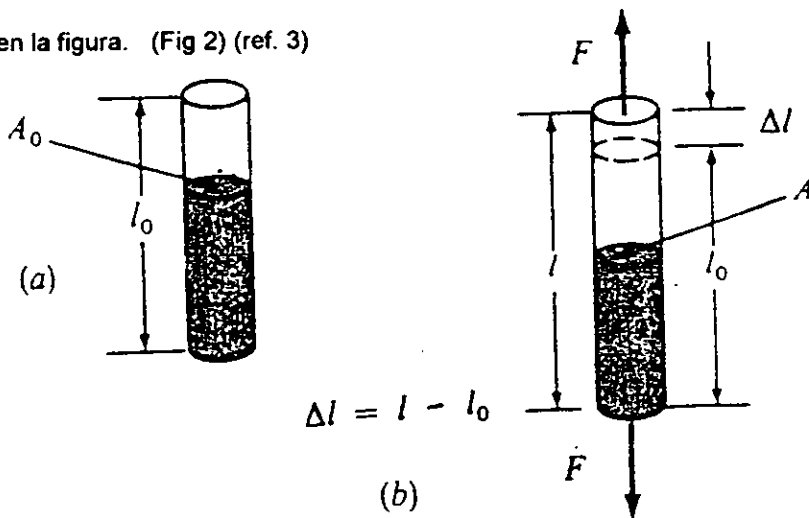


Figura 2.-Elongación de una barra metálica cilíndrica sometida a una fuerza de tensión uniaxial  $F$ .

- a) Barra metálica cilíndrica en estado normal (sin fuerza aplicada).
- b) Barra elongada  $\Delta l$  debido a la aplicación de una fuerza  $F$

El Esfuerzo ingenieril ( $\sigma$ ) es por definición igual al cociente entre la fuerza de tensión uniaxial media  $F$  y la sección transversal original  $A_0$  de la barra. (ref. 3)

$$\sigma = \frac{F(\text{Fuerza de tensión uniaxial})}{A_0 (\text{área original de la sección transversal})}$$

Las unidades de esfuerzo son: En sistema internacional, newton por metro cuadrado ( $\text{N/m}^2$ ) ó pascales, en sistema inglés, ( $\text{lb}/\text{pulg}^2$ ) ó psi.

La Deformación ingenieril ( $e$ ), es el promedio de la deformación lineal, esta se obtiene por el cociente del incremento ó decremento de la distancia medida de la muestra ( $L$ ) entre su longitud inicial ( $L_0$ ). (ref.3)

$$e = \frac{\Delta L}{L_0}$$

En donde:

$e$  = Deformación ingenieril

$\Delta L$  = Es el cambio de longitud ( $L - L_0$ )

Las curvas de esfuerzo y deformación se preparan trazando los esfuerzos en función de las deformaciones correspondientes y se les llaman ingenieriles ó aparentes, ya que los esfuerzos se calculan de acuerdo con el área original de sección transversal en lugar de utilizar la sección transversal instantánea, que existe en el momento en que se mide la carga.



En el caso de las deformaciones, los cálculos se basan en los cambios acumulados de longitud, con respecto a la longitud original.

Los valores de esfuerzo y deformación reales se obtienen tomando en cuenta los cambios de área y de longitud del espécimen, conforme avanza la prueba en el tiempo.

En compresión, el área real aumenta conforme se comprime al espécimen, de tal modo que el esfuerzo real ó verdadero es siempre menor que el aparente en pruebas compresivas.

#### 2.1.4.- Esfuerzo y Deformación Reales

Se pueden comparar los esfuerzos y deformaciones ingenieriles con los reales.

Podemos considerar al Esfuerzo Real como:

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{A}$$

Donde:

$\bar{\sigma}$  = Esfuerzo Real

P = carga

A = Área de sección transversal.

También podemos expresar el Esfuerzo real en función del ingenieril.

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{A_0}(e+1) = \sigma(e+1)$$

considerando que e es menor que cero.

$$\text{Y si } \bar{\sigma} = \frac{P}{A} ; \quad \sigma = \frac{P}{A_0}$$

$$\text{entonces: } P = \bar{\sigma}A = \sigma A_0$$

$$\bar{\sigma} = \sigma \frac{A_0}{A} \quad \dots\dots(1)$$

Por constancia de volumen.

$$A_0 L_0 = AL \Rightarrow \frac{A_0}{A} = \frac{L}{L_0}$$

Y si sabemos que la deformación ingenieril en compresión está dada por:

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_0 - L}{L_0} = 1 - \frac{L}{L_0}$$

$$\frac{L}{L_0} = -(e-1) = 1-e = \frac{A_0}{A}$$

retomando la ecuación 1.

$$\bar{\sigma} = \sigma \frac{A_0}{A} = (1-e) \sigma = \bar{\sigma} = (1-e)$$

Tomando en cuenta que se debe de considerar el valor absoluto de e.

Donde:

$\bar{\sigma}$  = Esfuerzo Real

P = carga

A<sub>0</sub> = área inicial

$\sigma$  = Esfuerzo Ingenieril

Al igual que le esfuerzo real, la Deformación real también puede relacionarse con la deformación ingenieril.

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_0 - L}{L_0} = 1 - \frac{L}{L_0}$$

$$e - 1 = -\frac{L}{L_0} \Rightarrow 1 - e = \frac{L}{L_0}$$

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln(1 - e) \text{ en compresión.}$$

Donde:

e = Deformación ingenieril

$\varepsilon$  = Deformación real en compresión.

Las propiedades mecánicas de metales y aleaciones de importancia en ingeniería para el diseño estructural son principalmente:

- 1.- Módulo de Elasticidad.
- 2.- Esfuerzo de fluencia convencional (a 0.2 por 100 de desplazamiento.)
- 3.- Resistencia máxima a la tensión.

Entre los valores característicos de un material se encuentran el módulo de elasticidad o de Young (E) y la tensión de fluencia. El primero es una de las propiedades más insensibles a la microestructura, además que es constante e independiente de la geometría de la muestra.

Este se afecta ligeramente por adición de aleantes, por tratamiento térmico, ó deformación en frío; no obstante, el incremento de temperatura lo disminuye.

*Módulo de Elasticidad ó de Young (E):* es una constante elástica de los metales; en la primera parte del ensayo de compresión, la deformación que afecta al metal es de naturaleza elástica. Para los metales la máxima deformación elástica es normalmente inferior al 0.5%. (ref.3)

Los metales y las aleaciones muestran una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación en la región elástica del diagrama esfuerzo - deformación que está descrito por la ley de Hooke.

$$E = \frac{\sigma}{e} \Rightarrow \sigma = Ee$$

En donde:

$E$  = módulo de elasticidad ó módulo de Young.

$\sigma$  = esfuerzo

$e$  = deformación.

El módulo de elasticidad está relacionado con las fuerzas que unen los átomos del material. Se obtiene determinando la pendiente de una curva esfuerzo - deformación en la zona elástica.

Una pendiente alta en la gráfica indica que se requiere la aplicación de fuerzas muy grandes para separar los átomos y producir la deformación elástica del material, lo que nos indicará que este tiene un alto módulo elástico, generalmente los metales que presentan este comportamiento tienen también alto punto de fusión. (Fig 3)(ref.6)

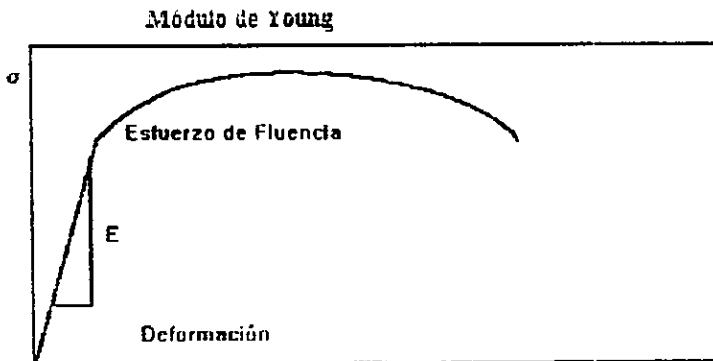


Figura 3.- Curva de esfuerzo - deformación para demostrar el módulo de Young en aluminio.

Los metales con alto módulo de elasticidad son relativamente rígidos y no se deforman fácilmente. Los aceros por ejemplo, tienen altos valores de módulo de elasticidad de aproximadamente 207 Gpa, mientras que las aleaciones de aluminio tienen más bajo módulo de elasticidad con valores de 69 a 76 Gpa. Se tiene que notar que en la región elástica del diagrama esfuerzo deformación, el módulo no cambia con el incremento de esfuerzo.(ref.6)

*Esfuerzo de Fluencia:* Es un valor muy importante para su uso en diseño de ingeniería estructural, ya que es la fuerza en donde un metal o aleación muestra una deformación plástica .

Debido a que generalmente no hay un punto definido en la curva esfuerzo - deformación donde termina la deformación elástica e inicie la deformación plástica, el esfuerzo de fluencia se elige como aquel esfuerzo para el que se produce una cantidad definida de deformación plástica. Convencionalmente, el esfuerzo de fluencia para diseño estructural se elige cuando ha tenido lugar un 0.2% de deformación plástica. (ref.3)

### 2.1.5.- Endurecimiento por Deformación.

El trabajo en frío es uno de los más importantes métodos de endurecimiento de algunos metales; por ejemplo el cobre y el acero inoxidable (ref.3). A medida que aplicamos un esfuerzo en la región de deformación plástica ocurre un deslizamiento en los planos de deslizamiento, produciéndose dislocaciones y movimiento de las mismas.(ref. 7)

Sin embargo, al presentarse cada vez más deslizamiento, las dislocaciones interactúan, apilándose y formando nudos de dislocaciones, esto hace que cada vez sea más difícil el deslizamiento, lo que va a provocar que para que se produzca mayor deformación, se necesita mayor esfuerzo. (Fig 4) (ref.8)

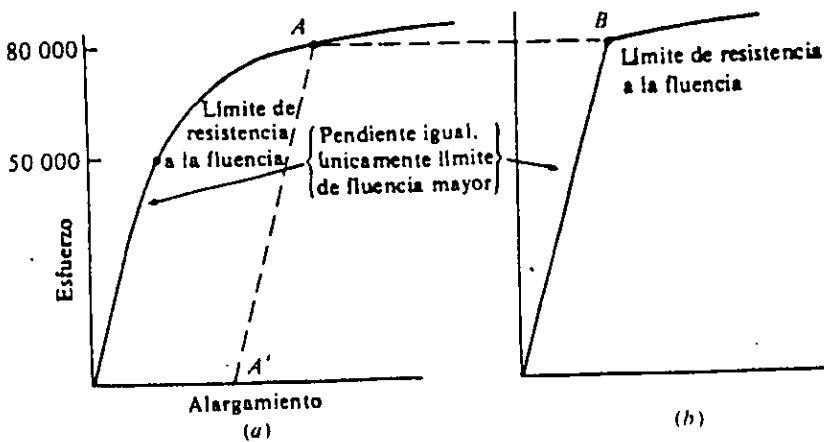
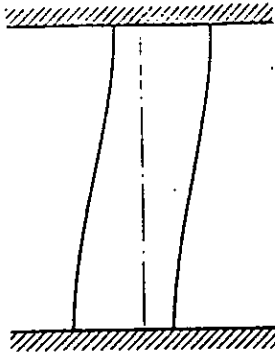


Figura 4.- Correlación del endurecimiento por trabajo en frío con la curva esfuerzo-deformación. Las unidades del esfuerzo están en  $lb/pulg^2$  (ref. 7)

### 2.1.6. - PANDEO

Cuando se aplica una fuerza a una muestra de relación H/D (altura / diámetro) alta, se considera como "pandeo" una deformación que no es completamente axial .(fig 5) (ref. 4)



**Figura 5.- Se observa que la fuerza no está siendo aplicada sobre el eje de la probeta.**



### 3.- CARACTERÍSTICAS DE LA MAQUINA

#### 3.1.- Rigidez

La creencia más común sobre los efectos de la deformación es que la maquina de prueba es mucho más rígida que la muestra, sin embargo para la mayoría de las pruebas lo contrario sucede. Como se muestra en la figura 6.

ref.9

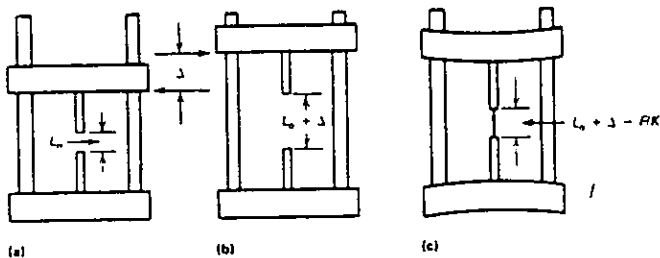


Fig.6

- Máquina de trabajo en tracción sin aplicación de carga, la probeta tiene dimensiones originales.
- Máquina de trabajo en tracción con aplicación de carga, en donde existe un incremento ( $\Delta$ ) de altura.
- La altura queda afectada por la influencia de la rigidez al momento en la toma de datos.

Si el desplazamiento del pistón es definido como el desplazamiento relativo  $\Delta$  que ocurrirá bajo condiciones de carga cero, entonces para una muestra colocada en las mordazas, el desplazamiento del pistón es igual a la deformación de la longitud medida de la muestra más las deflecciones elásticas de la estructura de la maquina, la celda de carga, las mordazas, las caras de las muestras, etc.

Cuando se empieza a aplicar la carga las condiciones cambian, así las deflecciones elásticas en la máquina cambian lentamente y la mayor parte del desplazamiento del pistón produce una deformación plástica en la muestra.

Cuando se aplica carga a una muestra, esta se transmite a toda la maquina y a la muestra; al principio la muestra se deforma elásticamente. Esto se puede considerar como dos resortes en serie, el sistema de la máquina de prueba y las demás partes involucradas tienen conjuntamente una constante  $K$  y además la misma muestra tiene su constante de resorte.

A la constante  $K$  se le conoce como "rigidez" de la máquina y se define, considerando una velocidad constante del pistón como (ref 10):

$$k = \left( \frac{V}{\dot{p}} - \frac{L_0}{A_0 E} \right)$$

Donde:

$L_0$  = Longitud de la muestra.

$V$  = Rapidez de desplazamiento del pistón.

$P$  = Rapidez de aplicación de la carga

$A_0$  = Área transversal de la muestra

$E$  = módulo de Young de la muestra.

En esta ecuación el valor del módulo de elasticidad puede ser obtenida de la bibliografía cuando el material de la muestra es conocido. Para calcular experimentalmente este módulo, los desplazamientos reales de esta muestra deben ser medidos por un extensómetro. (ref. 2)

### 3.2.- Extensómetros.

Los extensómetros son dispositivos utilizados para medir elongación o desplazamiento de la muestra, cuando una carga es aplicada.

Los extensómetros típicos tienen longitudes de medición axial de 25 - 50 mm, existen también extensómetros para mediciones diametrales, estos indican la disminución ó aumento en el grosor ó en el diámetro de la muestra a ser probada.(Fig 7)

ref.9

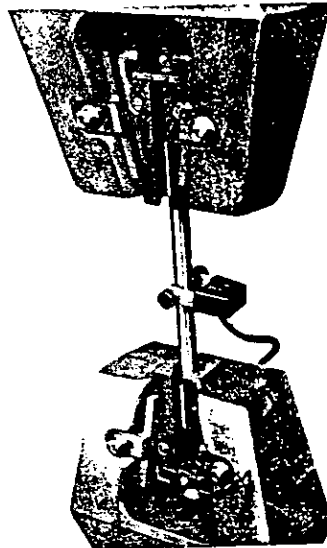


Figura 7.- Extensómetro colocado en probeta de tracción, nótese las mordazas para sujetar las probetas.

## 4.- FRICCIÓN

Se considera como la oposición para que un cuerpo deslice sobre otro, gran parte de la energía gastada por una maquinaria se pierde por medio de la fricción.

Físicamente es igual a la fuerza tangente al límite común entre dos cuerpos bajo la acción de una fuerza externa aplicada a un cuerpo, pero que varía por una constante de proporcionalidad llamada coeficiente de fricción, que fue propuesta por primera vez por Leonardo Da Vinci en 1508 y retomada por Amontons en 1699, como parte de las leyes básicas de fricción, que son: (ref. 11)

- 1.- La fuerza de fricción es proporcional a la carga aplicada.
- 2.- La fricción estática es mayor que la fricción cinética.
- 3.- La fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento.
- 4.- La fuerza de fricción es independiente del área aparente de contacto.

La forma más común de definir el coeficiente de fricción, es de la manera siguiente:

**Coeficiente de fricción**

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} = \frac{F}{N}$$

Donde:

$F_T$  = Fuerza Tangencial

$F_N$  = Fuerza Normal

Para saber qué es cada término, la fuerza tangencial está dada por:

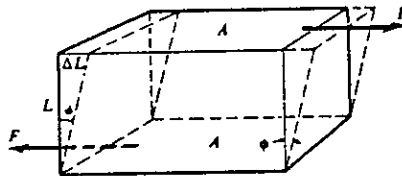
$$F_T = \frac{F}{A} = \tau$$

Donde:

$F$  = Fuerza necesaria para generar un movimiento en el cuerpo.

$A$  = Área de aplicación de fuerza.

$\tau$  = Esfuerzo Cortante Interfacial (supóngase que como muestra la figura 8. (ref.11), que sobre un bloque rectangular actúan fuerzas tangenciales  $F$  iguales y opuestas. Estas fuerzas cortantes deforman el bloque de la manera que se indica, pero su volumen permanece sin cambio, formándose un ángulo de corte en radianes ( $\Phi$ ) y un incremento de longitud  $\Delta L$ )



Y considerando también que la fuerza normal es:

$$F_N = \frac{P}{A} = \sigma$$

Donde:

$P$  = Carga (Fuerza) aplicada

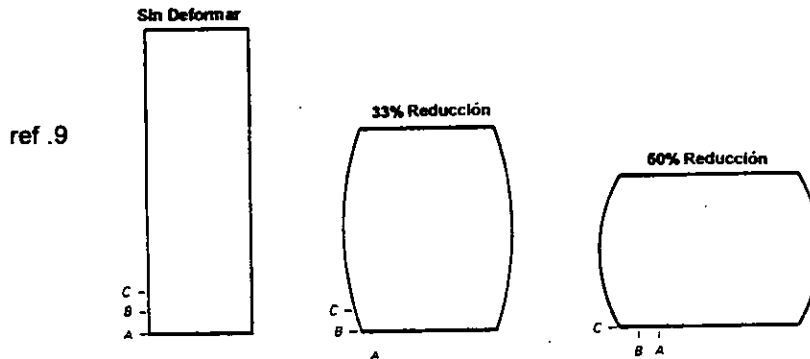
$A$  = Área de aplicación

$\sigma$  = Esfuerzo normal

$$\text{entonces: } \mu = \frac{\tau}{\sigma}$$

Los efectos principales de la fricción son, entre otros, en la prueba de compresión:

a) La deformación heterogénea de la muestra conocida como abarrilamiento, en donde las superficies extremas del cilindro están en contacto con las placas compresoras, y están restringidas para deslizarse sobre las placas. (Fig 9)



b) Incremento de fuerza requerida para la deformación.

c) Desgaste de las placas de compresión.

La fricción se divide en deslizante y adherente.

La primera se presenta cuando el esfuerzo cortante, generado entre las dos superficies es menor al esfuerzo de fluencia de corte, de cualquiera de los materiales en contacto.

En el caso de la fricción adherente el esfuerzo cortante interfacial es mayor que el esfuerzo cortante puro  $k$ , del material de pruebas y en vez de deslizarse éste sobre la herramienta, lo hace tangencialmente sobre si mismo. El valor mínimo del coeficiente de fricción es cero cuando existe deslizamiento perfecto y el máximo 0.577 cuando el esfuerzo interfacial iguala al esfuerzo de fluencia de corte del material.

#### **4.1.- Orígenes y clasificación de la fricción.**

La fricción se origina por numerosos mecanismos en las interfaces de las superficies de contacto, podemos clasificar estos mecanismos de la manera siguiente:( ref.11)

##### **1.- La interacción mecánica de las asperezas o rugosidades superficiales.**

Al acercarse dos superficies para entrar en contacto, éste se efectúa únicamente en los puntos más altos de las asperezas, por lo que el área de contacto es solamente una fracción del área real. En estos puntos se produce un fuerte incremento de la temperatura que, en algunos casos puede fundir al metal más suave por lo que se pueden formar microsoldaduras.

La deformación mecánica de las asperezas puede ser elástica o plástica. En el caso de que sea elástica, la mayor parte de la energía gastada en esta deformación es recuperable pero si, por el contrario, la deformación es plástica

la energía no se recupera porque se produce un aumento en el área de contacto

## **2.- Adhesión entre las superficies.**

Este es uno de los mecanismos más importantes por la formación de microsoldaduras en los puntos de unión en las asperezas de dos superficies metálicas.

La adhesión entre dos metales diferentes puede formar soluciones sólidas en función de los diagramas de fase de los metales en contacto, así dos metales altamente compatibles y que formen solución sólida tendrán alta adhesión y por lo tanto la presencia de fricción, además un alto endurecimiento por deformación endurece las uniones por lo que se requiere mayor esfuerzo para separarlas, aumentando su fuerza de fricción.

## **3.- La formación de surcos en la superficie de el material provocada por las asperezas del otro material.**

Si uno de los materiales que se está deslizando es más duro que otro, entonces las asperezas del más duro pueden penetrar e incluirse en el más suave, incrementando así la fricción.

## **4.- La formación o ruptura de las capas superficiales.**

Algunas alteraciones superficiales que se presentan en los sólidos son: la segregación de elementos de aleación durante el procesamiento del metal ó



en su tratamiento térmico, el cambio de estructura cristalina de las capas externas de átomos, la quimisorción, que consiste en la adsorción de moléculas de agua y/o compuestos de carbón de la atmósfera o, en su caso, de lubricantes utilizados durante su manufactura, el tipo y la cantidad de la sustancia adsorbida así como el grado de recubrimiento superficial afectan la adhesión entre las superficies, y por tanto la fricción.

5.- La deformación plástica generada por cuerpos ajenos, como partículas de desgaste, polvo ,etc.

Este mecanismo es el controlante del proceso de desgaste, consiste en el atrapamiento de partículas extrañas entre las dos superficies, que contribuyen a la fricción porque generalmente se aglomeran e indentan dichas superficies. Aunque se sabe que los factores mencionados con anterioridad contribuyen con la generación de fricción, la predicción del grado de participación de cada uno de ellos aún no es posible.

## **5.- El Aluminio.**

El aluminio posee una combinación de propiedades que lo convierten en un material extremadamente útil. El aluminio tiene una baja densidad ( $2.70 \text{ g/cm}^3$ ), lo que lo hace particularmente útil en usos donde se requiere un metal ligero.

(ref.12)

en su tratamiento térmico, el cambio de estructura cristalina de las capas externas de átomos, la quimisorción, que consiste en la adsorción de moléculas de agua y/o compuestos de carbón de la atmósfera o, en su caso, de lubricantes utilizados durante su manufactura, el tipo y la cantidad de la sustancia adsorbida así como el grado de recubrimiento superficial afectan la adhesión entre las superficies, y por tanto la fricción.

5.- La deformación plástica generada por cuerpos ajenos, como partículas de desgaste, polvo ,etc.

Este mecanismo es el controlante del proceso de desgaste, consiste en el atrapamiento de partículas extrañas entre las dos superficies, que contribuyen a la fricción porque generalmente se aglomeran e indentan dichas superficies. Aunque se sabe que los factores mencionados con anterioridad contribuyen con la generación de fricción, la predicción del grado de participación de cada uno de ellos aún no es posible.

## **5.- El Aluminio.**

El aluminio posee una combinación de propiedades que lo convierten en un material extremadamente útil. El aluminio tiene una baja densidad ( $2.70 \text{ g/cm}^3$ ), lo que lo hace particularmente útil en usos donde se requiere un metal ligero.

(ref.12)

Tiene también una buena resistencia a la corrosión en la mayoría de los entornos naturales debido a la película de óxido que se forma en su superficie. A pesar de que el aluminio puro tiene poca dureza, puede ser aleado hasta alcanzar una resistencia de 690 Mpa (100 Ksi). (ref.12)

La toxicidad del aluminio es algo que se encuentra hasta el momento en investigación, se ha pensado como una posible causa del mal de Alzheimer, pero por el momento y durante muchos años se ha utilizado ampliamente para empaquetar y contener alimentos. Las buenas propiedades eléctricas del aluminio le hacen adecuado para muchas aplicaciones dentro de la industria eléctrica. El precio relativamente bajo del aluminio (\$19.00 el kilogramo aproximadamente) junto a sus propiedades, hacen de este metal uno de los más importantes a nivel industrial.

### **5.1.- Propiedades del Aluminio 1100**

99 % Al (min) - 0.12 % Cu

Nombre comercial : Aluminio.

Aplicaciones: Se utiliza en donde se requiere buena formabilidad y alta resistencia a la corrosión, donde el alto esfuerzo no es necesario, por ejemplo, para recipientes de alimentos, químicos y equipo de almacenamiento, hojas de metal, piezas embutidas, ensambles soldados, intercambiadores de calor, piezas de extrusión, etc.

Módulo Elástico: 69 Gpa de tensión, 26 Gpa de corte.

Tabla 1 (ref.12)

Limites de propiedades Tensiles para Aluminio 1100

Templado	Esfuerzo Tensil			Resistencia a la tracción			% Elongación mínima.
	Mínimo Mpa	Ksi	Mpa	Máximo Ksi	Mpa	Ksi	
<b>Hojas y Platos</b>							
O	75	11	105	15.5	24	3.5	15-28
H12	95	14	130	19.0	75	11	3-12
H14	110	16	145	21.0	95	14.0	1-10
H16	130	19.0	165	24.0	115	17.0	1-4
H18	150	22					1-4
<b>H112</b>							
0.25-0.499 in espesor	90	13.0			50	7.0	9
0.500 -2.00 in espesor	83	12.0			35	5.0	14
2.001-3.00 in espesor	80	11.5			30	4.0	20
<b>Alambre, varilla y barra (rolado o terminado en frío)</b>							
O	75	11.0	105	15.5	20	3.0	25
H112	75	11.0			20	3.0	
H12(b)	95	14					
H14(b)	110	16					
H16(b)	130	19					
H18(b)	150	22					
<b>Alambre, Varilla, Barra, formas (extruidas)</b>							
O	75	11	105	15.5	20	3.0	25
H112	75	11			20	3.0	
<b>Tubo Extruido</b>							
O	75	11.0	105	15.5	20	3.0	25
H112	75	11.0			20	3.0	25
<b>Tubo Estirado (0.014 a .5 in. de espesor)</b>							
O			105	15.5			
H12	95	14.0					
H14	110	16.0					
H16	130	19.0					
H18	150	22.0					
<b>Alambre y varilla (grado de trabajo en frío.)</b>							
O(c)			105	15.5			
H14(c)	110	16.0	145	21.0			

## **6.- DISEÑO EXPERIMENTAL:**

1) Para empezar con la experimentación, tenemos que utilizar un metal con el que se trabaje en un estado de esfuerzos compresivo en la industria (extrusión, laminación, y forja), así tendríamos una gran cantidad de metales para considerar; los más importantes son los aceros; el cobre, el aluminio y sus aleaciones. En este trabajo se utiliza un aluminio comercial 1100. Este se utiliza en procesos tales como la laminación para la obtención de "Foil" (Laminas muy delgadas conocidas como papel aluminio) en donde existen grandes deformaciones; en extrusión para piezas estructurales (molduras, cancelería etc); en embutido para productos de cocina (ollas) y latas.

Para las pruebas se usaron cilindros de aluminio 1100, de  $\frac{1}{2}$  pulgada de diámetro y se estudiaron relaciones  $H/D$  (altura - diámetro) de 2.5, 2, 1.5, 1, 0.5, y 0.3.

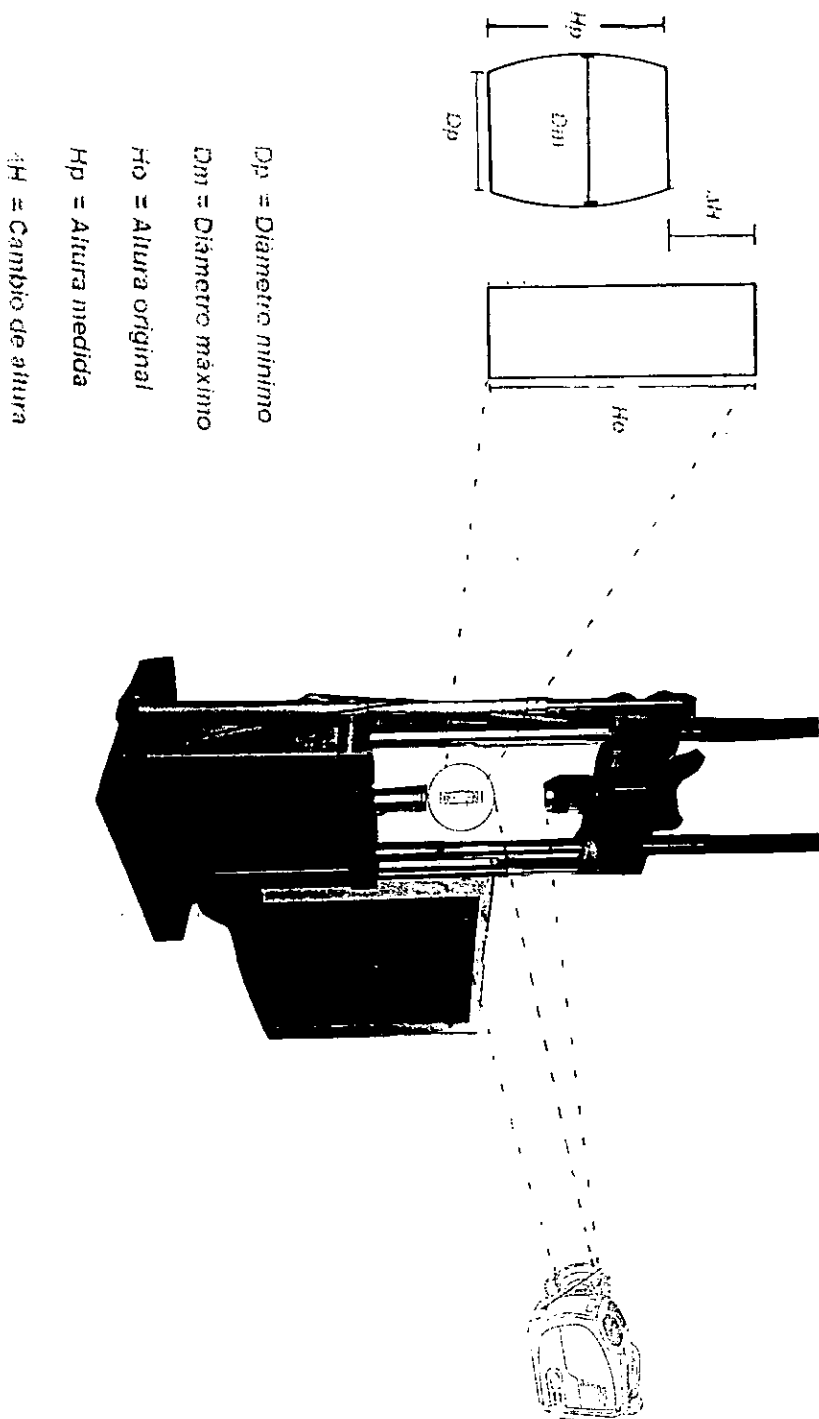
2) Se prepararon las probetas a diferentes condiciones de fricción utilizando para ello lija comercial para metal de grado 80, 240, 400, 1200. Para cada relación  $H/D$  se utilizaron las cuatro condiciones de fricción.

3) Se midieron las dimensiones originales de las probetas con un calibrador (Vernier), Altura  $H_0$  y diámetro  $D_0$ . (Fig.10)

4) Se prepararon placas de acero O1 para soportes de compresión teniendo las mismas condiciones de fricción que las muestras.

- 5) Se les aplicaron ensayos de compresión al 50 % de altura, a una velocidad de desplazamiento de pistón de 5mm/min, (que según la bibliografía (ref.1) es la velocidad sugerida más conveniente para la máquina de trabajo) a temperatura ambiente, en una maquina de compresión universal MTS 810.
- 6) Se videograbó cada una de las pruebas en una cámara de vídeo 8 mm "Sony", colocándola sobre un tripié fijo a una distancia aproximada de la máquina de 2 metros de longitud y 1 metro de altura. (Fig.10)
- 7) Se midieron las dimensiones finales de cada probeta después del ensayo, diámetro mínimo  $D_p$ , diámetro máximo  $D_m$ , altura medida  $H_p$ .(Fig 10)
- 8) La maquina de tracción universal obtuvo directamente gráficos de carga (Kn). vs tiempo (segundos).
- 9) De los gráficos obtenidos por la maquina, se midieron las cargas con respecto a los intervalos de tiempo manualmente.
- 10) Por medio del método del video, se midió la disminución de altura y el aumento de diámetro con respecto al tiempo, obteniendo otros valores de diámetro mínimo  $D_p$ , diámetro máximo  $D_m$ , altura medida  $H_p$ . para poder compararlos con los obtenidos con la máquina, estos se midieron directamente en la pantalla con el vernier (en intervalos de 5 segundos.)
- 11) Se tabularon datos de tiempo, diámetro, y altura.

Figura 10.- Esquema del procedimiento para la aplicación del método del video



## 7.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.-

Las tablas (II y III) son un ejemplo de los cálculos efectuados para cada una de las probetas, cada columna es para un cálculo específico, se nombra cada columna por una letra y así se identifica cada una de ellas.

La tabla II (A - N) da los datos sean medidos ó calculados por medio del video.

La tabla III (O- R) da los datos de la máquina.

Columna A: Es el tiempo de duración de la prueba en múltiplos de 5 segundos (Cronometrado)

Columna B : Diámetro mínimo (en la zona de contacto con las placas compresoras) medido en la pantalla, en milímetros.(Vernier),  $D_p$  (Fig. 10)

Columna C: Diámetro mínimo de la probeta en milímetros calculado,  $D_m$

$$D_m = (D_p) \left( \frac{D_{m o}}{D_{p o}} \right) \quad (7.1)$$

Donde:

$D_m$  = Diámetro mínimo en cada intervalo de tiempo

$D_{p o}$  = Diámetro original en pantalla

$D_p$  = Diámetro medido en pantalla en cada intervalo de tiempo.

$D_{m o}$  = Diámetro mínimo original (Vernier), medido directamente de la probeta.



Columna D: Diámetro máximo en la pantalla en milímetros. (Vernier)  $D_m$

Columna E: Diámetro máximo de la probeta en milímetros calculado.

$$D_{max.} = (D_p) \left( \frac{D_{max.o}}{D_{p.o}} \right) \quad (7.2)$$

Donde:

$D_{máx.}$  = Diámetro máximo en cada intervalo de tiempo.

$D_{p.o}$  = Diámetro original en pantalla

$D_p$  = Diámetro medido en pantalla cada intervalo  
de tiempo.

$D_{máx.o}$  = Diámetro real máximo original (Vernier), medido  
directamente de la probeta

Columna F: Altura medida en la pantalla en milímetros.(Vernier),  $H_p$

Columna G: Altura en milímetros calculada,  $H_r$

$$H_r = (H_p) \left( \frac{H_o}{H_{p.o}} \right)$$

Donde:

$H_o$  = Altura real original

$H_{p.o}$  = Altura medida en pantalla original

Columna H: Se obtuvo el diámetro equivalente de cada pieza por medio de la siguiente fórmula: (ref.12)

$$Deq = D \text{ máx.} - 1/3(D \text{ máx.} - D \text{ min}) \quad (7.3)$$

Donde:

$Deq$  = Diámetro equivalente

$D \text{ máx.}$  = Diámetro máximo.

$D \text{ min.}$  = Diámetro mínimo

Columna I: Se obtuvo el área de la muestra en vídeo por medio de la siguiente fórmula:

$$A_v = \frac{\Pi(Deq^2)}{4} \quad (7.4)$$

Columna J: Área real dada como área original por la altura original entre altura del vídeo, en un intervalo de tiempo.

$$A_r = \frac{\Pi(Do^2)(Ho)}{(4)(H)} \quad (7.5)$$

Donde:

$Ho$  = altura inicial

$H$  = altura

Columna K: Carga en KiloNewtons.

Columna L: Esfuerzo de área real (Carga(N)/ área real)

Columna M: Esfuerzo de área vídeo (Carga(N)/ área vídeo)

Columna N: Deformación real, dada:

$$\varepsilon = -\ln \frac{H}{H_0} \quad (7.6)$$

Las cinco posteriores columnas fueron obtenidas de los datos dados por la máquina.

Columna O: Gráficos máquina (mm) dado por :

$$\frac{5mm}{min} \left( \frac{1min}{60segs} \right) = 0.083 \frac{mm}{s} * \text{Tiempo} = \Delta H$$

En donde se da el desplazamiento del cabezal en milímetros con respecto a la velocidad programada de la máquina (5 mm/min), considerando la disminución de altura de la probeta,  $\Delta H$ . (Fig.10)

Columna P: Altura (H. máquina) de la muestra obtenida restando  $H_0 - \Delta H$  para cada intervalo de tiempo.

Columna Q: Deformación Real indicada por la máquina dada :

$$\varepsilon = -\ln \left( \frac{H_{grf. maq}}{H_0} \right) \quad (7.7)$$

Donde:

$H_0$  = altura inicial

$H_{grf.maq}$  = Altura obtenida de los gráficos de la máquina.

(Columna P)

$\varepsilon$  = Deformación real.

Columna R: Esfuerzo máquina dado como:

$$\sigma = \frac{P}{A_{realmaq.}}$$

Donde :

P = Carga en newtons

A = Área real dada como:

$$A = \frac{\Pi(D_0^2)(H_0)}{4H}$$

A partir de las columnas anteriores, se obtuvieron:

- a) Gráficas de esfuerzo medido por la máquina contra deformación.
- b) Con los datos obtenidos por la videograbación se obtuvieron gráficos de esfuerzo real (considerando constancia de volumen) contra deformación.
- c) Se hicieron gráficos de esfuerzo vídeo (considerando diámetro equivalente) contra deformación por medio de los datos del vídeo, obteniendo los esfuerzos en megapascales (Mpa) y la deformación en porcentaje (%).

En todas las pruebas la aplicación de la carga sobrepasó la zona elástica muy rápidamente, por lo que no fue posible determinar el módulo de Young por medio de la videograbación.

En las gráficas de esfuerzo real (Gráficas 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, y 23) y de esfuerzo vídeo (Gráficas 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, y 24) los valores iniciales de la deformación quedan desplazados un poco del cero absoluto debido a que la máquina tiene un rango de desplazamiento que puede variar de 0 a 0.1 %.

Además se hicieron gráficas de alturas contra tiempos (vídeo y real, a partir de la página 65 a 81), y de tiempo contra áreas (vídeo y real, en las páginas 83 y 84).

La máquina en sí realizó gráficos de esfuerzo ingenieril contra deformación ingenieril (ambos se transformaron en reales ó verdaderos).

Se considerará una deformación de 0.5 (50%) para el análisis de las gráficas. Debido que las relaciones H/D mayores presentan mayor facilidad para su deformación, se obtuvieron valores de deformaciones más grandes que para las muestras de relaciones H/D menores.

Los datos se presentan agrupados de acuerdo a cuatro aspectos:

- a) Fricción constante y diferente relación H/D (gráficos 1- 12)
- b) Relación H/D constante y diferente fricción.( gráficos 13-30)
- c) Tiempo de compresión contra alturas (real y de vídeo) (gráficos A-X)
- d) Tiempo de compresión contra áreas (real y de vídeo)

Tabla II

Compresión de Aluminio D/H				Lija 80			
Probetas de aluminio al 60% 5mm/mln				31,8*12,8			
A	B	C	D	E	F	G	H
		(mm)		(mm)	(mm)		
		D.mínimo		D. Máximo		H	D.Equiv
0	29,2	12,8	29,2	12,800	74,2	31,800	12,800
15	29,6	12,975	29,2	12,800	72,7	31,157	12,858
30	29,85	13,085	29,3	12,844	70,55	30,236	12,924
45	30	13,151	29,5	12,932	67,45	28,907	13,004
60	30,25	13,260	30,9	13,545	64,25	27,536	13,450
75	30,45	13,348	32,25	14,137	61,15	26,207	13,874
90	31,7	13,896	33,3	14,597	59,15	25,350	14,364
105	32,2	14,115	33,75	14,795	55,35	23,721	14,568
120	33,35	14,619	34,45	15,101	53,7	23,014	14,941
135	33,4	14,641	36,6	16,044	48,7	20,871	15,577
150	33,65	14,751	38,1	16,701	45,85	19,650	16,052
165	34,55	15,145	39,15	17,162	43,55	18,664	16,490
180	34,9	15,299	40,35	17,688	41,55	17,807	16,892
195	35,65	15,627	41,7	18,279	38,4	16,457	17,396
195	35,45	15,853	41,4	18,513	39,25	16,637	17,627
Real		16,6		18,95		16,1	







## 7.1.- GRÁFICOS DE ESFUERZOS - DEFORMACIÓN

Las Gráficas 1, 2 y 3, representan probetas de acabado superficial F.80, (fricción obtenida con lija 80) a seis diferentes relaciones altura - diámetro.

La primera considera valores obtenidos por la máquina, la segunda considerando el área real y la última considera diámetro equivalente.

En la gráfica 1.- Los valores de relaciones H/D menores tienen esfuerzos superiores a los de relaciones H/D altas, que es lo esperado, llegando a un valor de esfuerzo máximo en H/D 0.3 a 508 Mpa, el valor de esfuerzo mínimo se dio para la relación 1.5 con 336 Mpa. Se observa variación de las pendientes de la zona elástica, debido a la rigidez de la máquina de prueba.

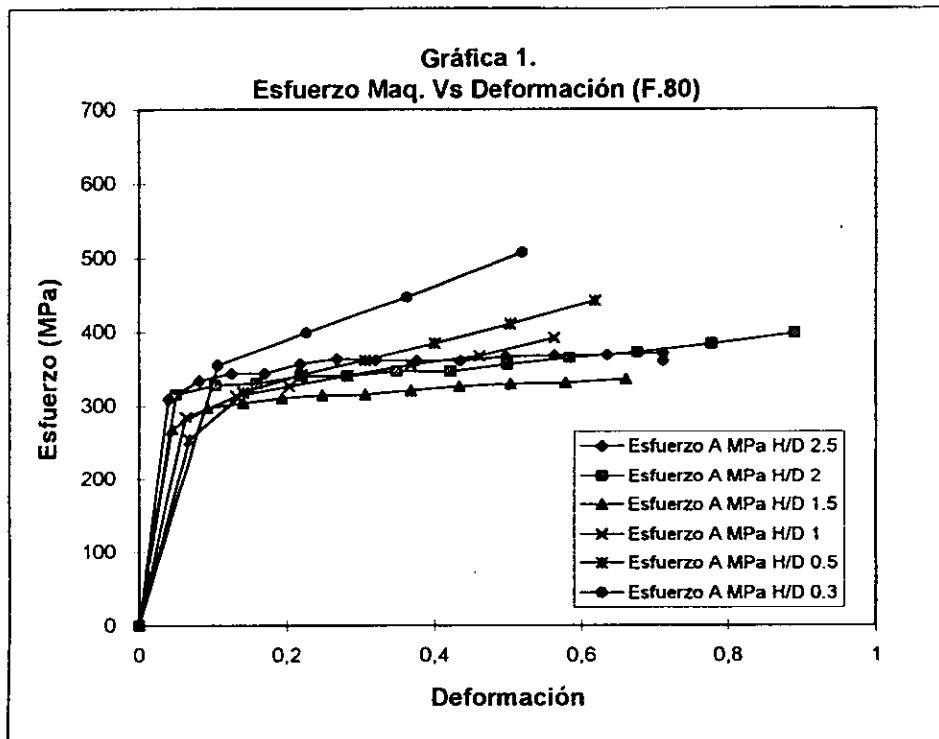
En las gráficas 2 y 3, se observa un notable incremento de esfuerzo con respecto a la gráfica 1, en las relaciones H/D 0.3, 0.5 y 1 (estando un esfuerzo máximo en 662 Mpa, y un mínimo en la relación 1.5 a los 371 Mpa para la gráfica 2) y para la gráfica 3, en 584 Mpa se encuentra el esfuerzo máximo, siendo el valor de esfuerzo más pequeño para la relación 1.5 con 345 Mpa.

En las tres gráficas existe además un traslape de orden en las probetas de relaciones H/D 2.5 y 2, en donde ocurrió "pandeo".

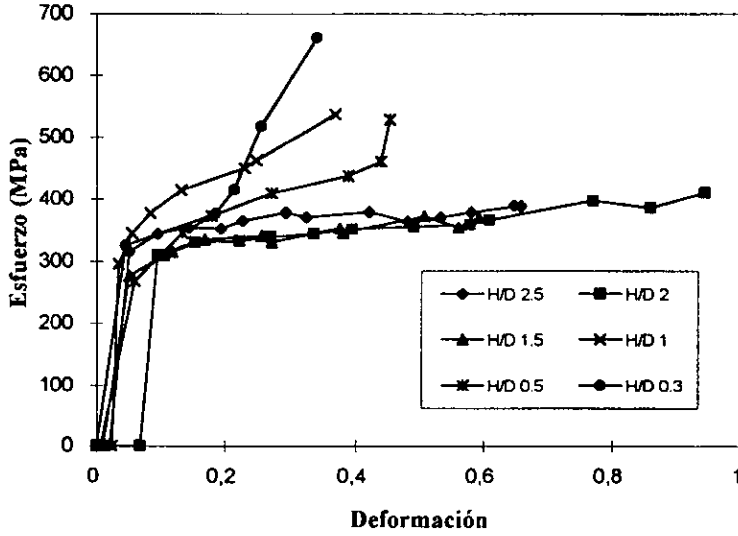
Tomando las tres gráficas anteriores que pertenecen a una misma prueba, podemos notar que; el esfuerzo mayor siempre fue para la relación 0.3 y el menor para el de 1.5, el valor más cercano al valor de la máquina fue, el de la gráfica 3 (vídeo).

La prueba 2.5 tuvo problemas de pandeo, por lo que su esfuerzo no fue el esperado, la relación 2.0 en las tres gráficas se encuentra a un valor de esfuerzo muy similar.

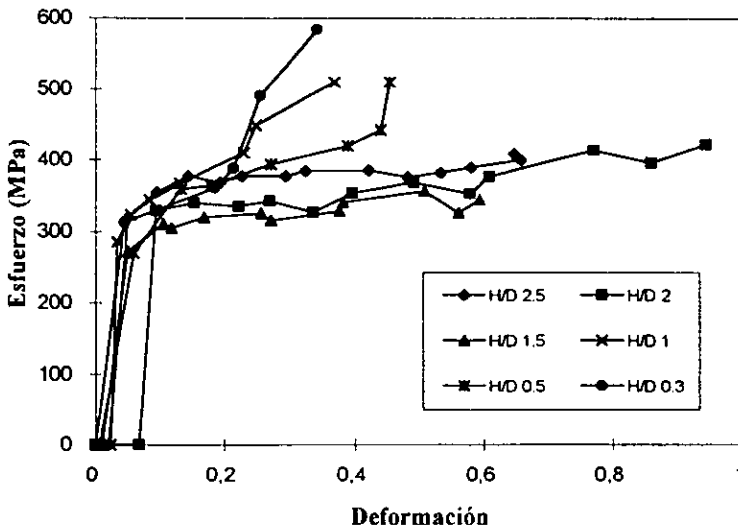
Las gráficas 2 y 3 se hicieron con los datos obtenidos mediante la filmación de la prueba, por lo que en el primer punto de medición ya se había rebasado el límite elástico, lo cual implica que las pendientes observadas no corresponden a los módulos de Young de las muestras.



Gráfica 2. Esfuerzo Real Vs Deformación F.80



Gráfica 3. Esfuerzo Video Vs Deformación F.80

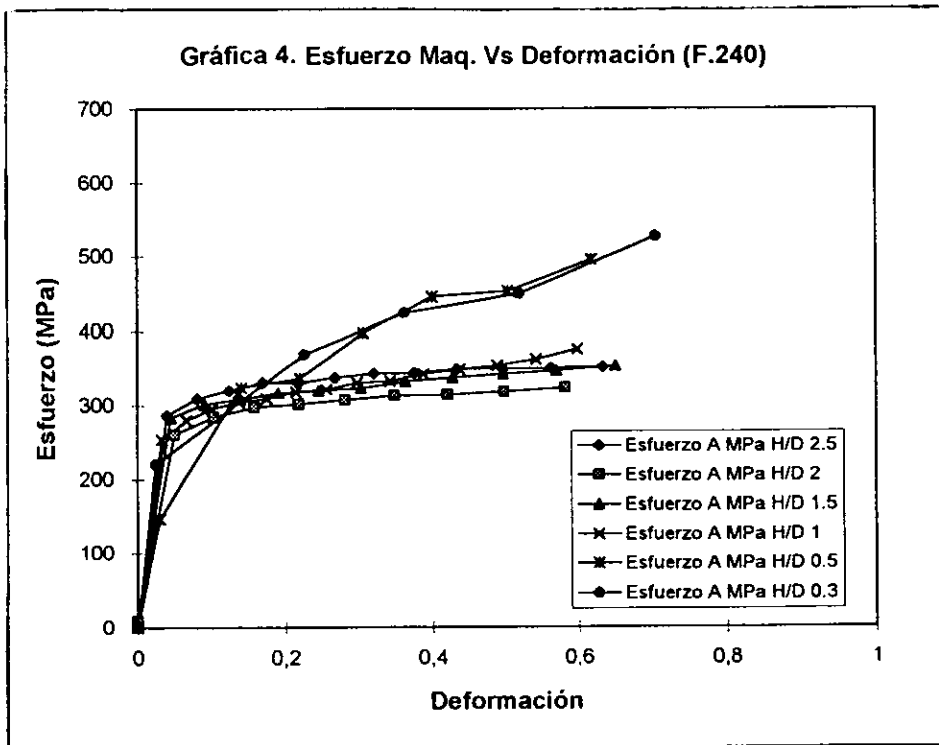


Las Gráficas 4, 5 y 6, representan probetas de acabado superficial F.240, (fricción obtenida con lija 240) a seis diferentes relaciones altura - diámetro. La primera considera valores obtenidos por la máquina, la segunda considerando el área real y la última considera diámetro equivalente.

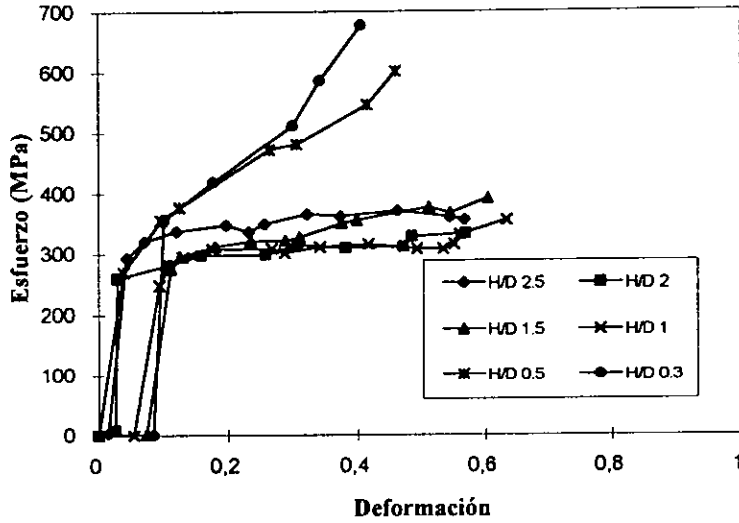
Gráfica 4.- se observa nuevamente un aumento de carga en las relaciones 0.5 y 0.3 (esfuerzo máx. 526 Mpa), la diferencia entre ellas en función del esfuerzo es pequeña, siendo la relación con menor esfuerzo la de 2.0 (323 Mpa).

En la gráfica 5, se nota aumento de carga en las relaciones 0.3 (esfuerzo máx. 677 Mpa) y 0.5 notándose una diferencia considerable entre los esfuerzos necesarios para deformarlas, manteniéndose aproximadamente constantes los valores de esfuerzo, en comparación de la gráfica 4, estando el esfuerzo mínimo en 333 Mpa. En la gráfica 6 el esfuerzo máx. está en 690 Mpa. en la relación 0.3, siendo el esfuerzo más bajo en la relación 2.0 en 332 Mpa.

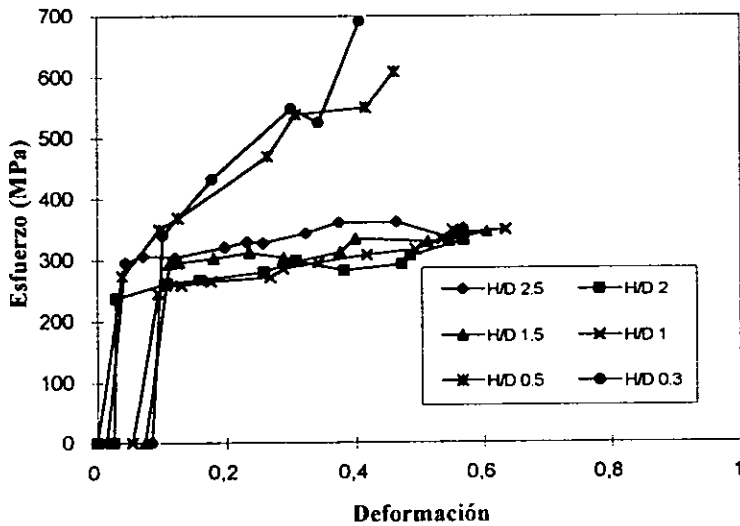
Las tres gráficas anteriores que pertenecen a una misma prueba, podemos notar que el esfuerzo mayor también fue para la relación 0.3 y a diferencia de las tres gráficas anteriores, el menor para la relación 2.0, el valor más cercano al obtenido por la máquina fue, el de la gráfica 5 (real), la prueba 2.5 tuvo problemas de pandeo, por lo que su esfuerzo no fue el esperado, las relaciones 1.0, 1.5, y 2.0 presentan valores similares de esfuerzos.



Gráfica 5. Esfuerzo Real Vs Deformación F.240



Gráfica 6. Esfuerzo Video Vs Deformación F.240



Las Gráficas 7, 8 y 9, representan probetas de acabado superficial F.400, (fricción obtenida con lija 400) a seis diferentes relaciones altura - diámetro. La primera considera valores obtenidos por la máquina, la segunda considerando el área real y la última considera diámetro equivalente. En las tres gráficas, las relaciones 0.3 y 0.5, tienen esfuerzos superiores para su deformación.

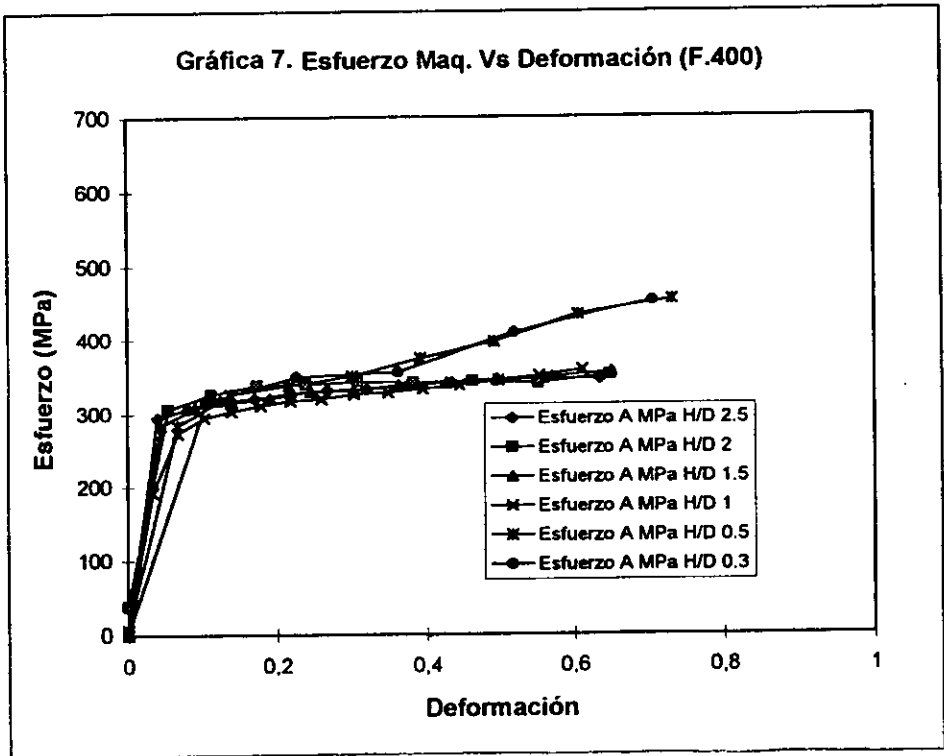
La gráfica 7 presenta un esfuerzo máx. en 455 Mpa. los valores entre ambas relaciones (0.3 y 0.5) son casi iguales, (a deformaciones mayores a 0.4 se presenta un incremento de esfuerzo típico de la compresión de muestras de altura muy pequeñas) siendo el esfuerzo mínimo en la relación 2.5 a 346 Mpa. Presenta variación en la pendiente de la zona elástica debido a que en la rigidez de la máquina influye la relación H/D de la muestra.

En la gráfica 8 hay un máximo en la relación 0.3 con 501 Mpa., dándose un valor mínimo en la relación 1.5 a 363 Mpa.

En la gráfica 9, hay un máximo en la relación 0.3 con 471 Mpa., dándose un valor mínimo en la relación 1.0 a 327 Mpa.

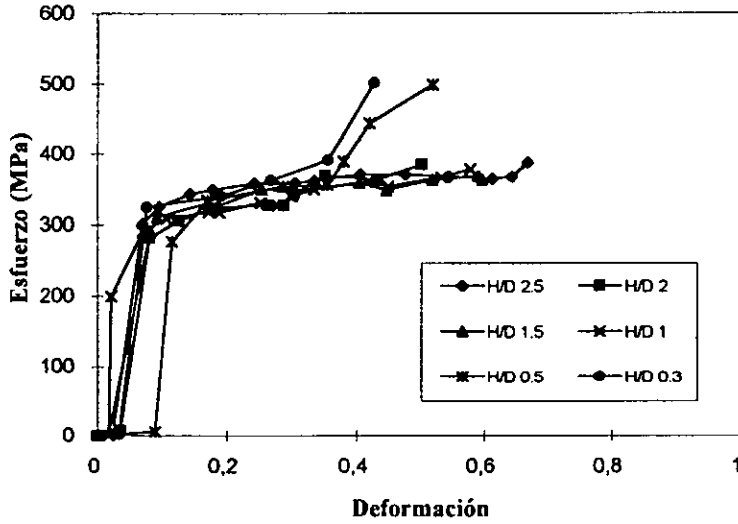
En las tres gráficas anteriores, el esfuerzo máximo está en la relación 0.3 siendo el valor más cercano al de la máquina, el de la gráfica 9 (vídeo), se encuentran mezclados los valores mínimos de esfuerzo, a diferencias numéricas no muy considerables, estas diferencias pueden ser debidas a errores en la toma de datos del vídeo. El resto de los valores se encuentran entre 300 y 400 Mpa.

Gráfica 7. Esfuerzo Maq. Vs Deformación (F.400)

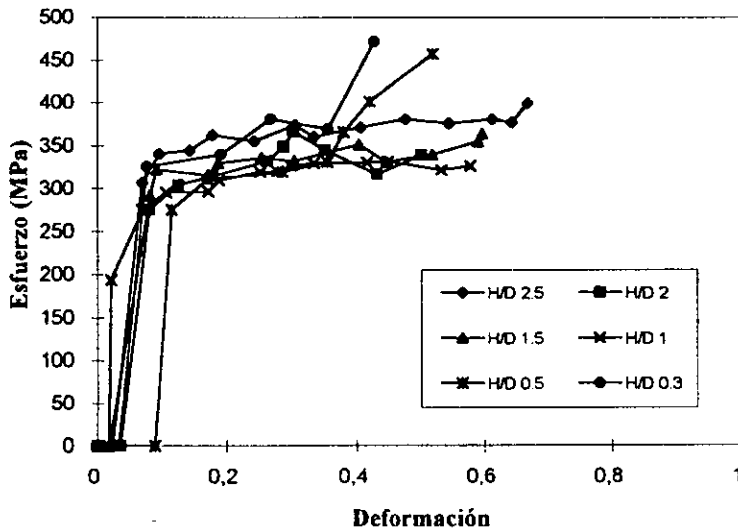




Gráfica 8. Esfuerzo Real Vs Deformación F.400



Gráfica 9. Esfuerzo Video Vs Deformación F.400



Las Gráficas 10,11 y 12, representan probetas de acabado superficial F.1200, (fricción obtenida con lija 1200) a seis diferentes relaciones altura - diámetro.

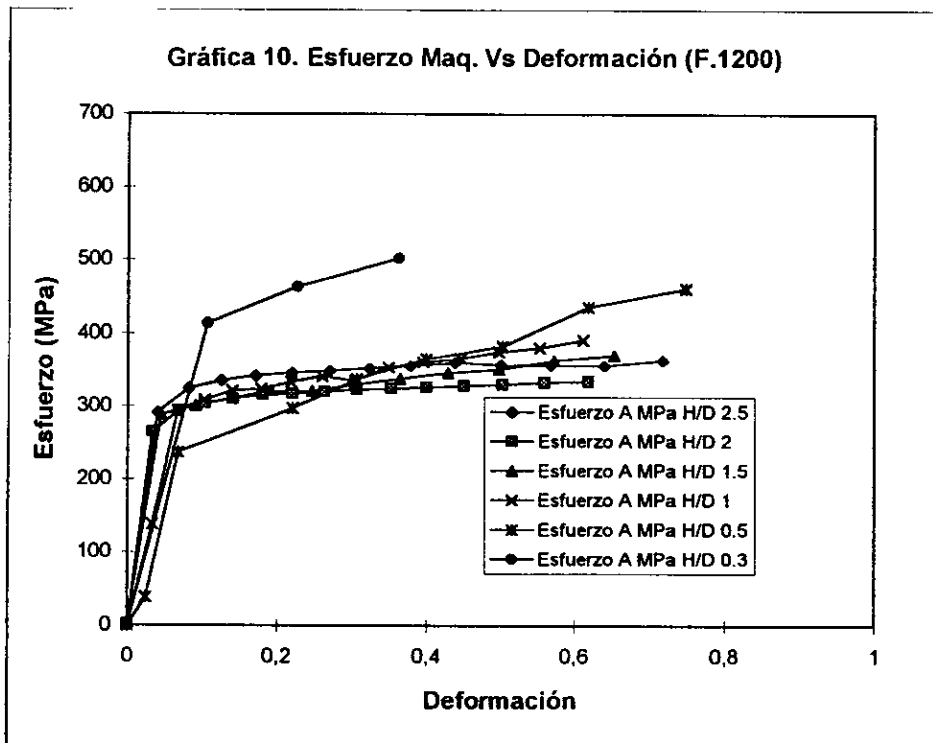
La primera considera valores obtenidos por la máquina, la segunda considerando el área real (calculada con la altura de la muestra) y la última considera diámetro equivalente.

En la gráfica 10, las relaciones 0.3 y 0.5, tienen esfuerzos superiores para su deformación, sobre todo la primera de ellas presentando un esfuerzo máx. en 503 Mpa., siendo el esfuerzo mínimo en la relación 2.0 a 335 Mpa. En la gráfica 11 hay un máximo en la relación 0.3 con 659 Mpa., dándose un valor mínimo en la relación 1.5 a 379 Mpa. El resto de las relaciones presentan unos valores de esfuerzos muy parecidos.

En la gráfica 12, existe un máximo en 535 Mpa. dándose un valor mínimo en la relación 1.5 a 358 Mpa. La relación 0.3 presentó, un solo valor debido a que como es la relación más pequeña, hay dificultades a la hora de tomar los datos del vídeo.

En las anteriores tres gráficas, el esfuerzo máximo está en la relación 0.3 siendo el valor de más cercano al de la máquina, el de la gráfica 12 (vídeo), los valores mínimos están entre las relaciones 1.5 y 2.0 a diferencias numéricas no muy considerables.

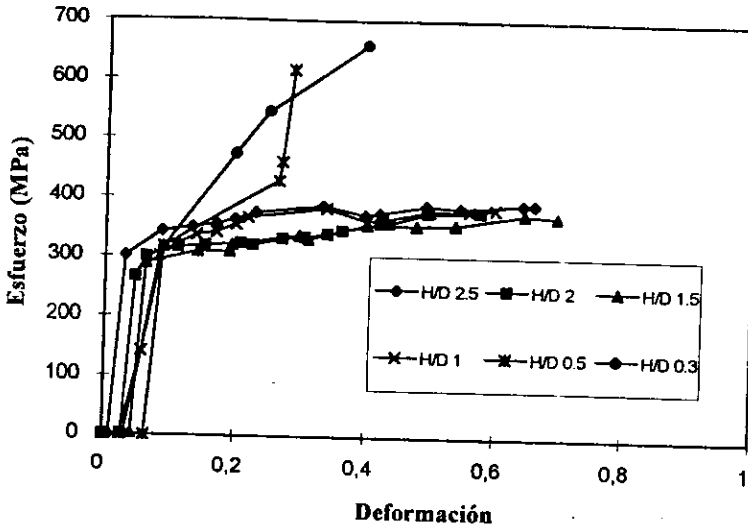
La gráfica más similar a la obtenida por la máquina es la de video. El resto de los valores se encuentran entre 300 y 400 Mpa.



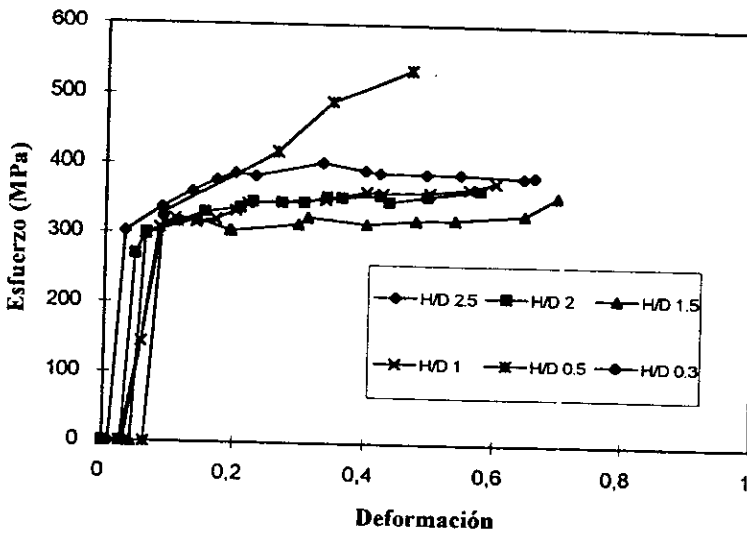
Por último englobando toda la información anterior de las doce gráficas podemos obtener que:

- El esfuerzo mayor siempre es para la relación más pequeña (0.3) continuando en orden descendente; los valores de esfuerzo en este punto son muy dispersos por los problemas de medición.
- Se mantiene un cierto orden entre las relaciones, 1.0, 1.5, y 2.0 en donde los valores de esfuerzo necesario para su deformación son similares.
- La relación H/D 2.5 presentó problemas de pandeo.
- La relación 2.0 presentó mayor deformación que las demás.
- Las condiciones de fricción más pequeñas necesitan un mayor esfuerzo, debido probablemente a generación de adhesión entre las caras de las muestras y las placas de compresión.
- La condición de fricción 80 requiere también un esfuerzo mayor debido a interacción mecánica entre las superficies, la de la probeta, y la de las placas de compresión.

Gráfica 11. Esfuerzo Real Vs Deformación F.1200



Gráfica 12. Esfuerzo Video Vs Deformación F.1200



Consideremos otra manera de ver estos datos, ahora en las gráficas siguientes, se tomó una misma relación H/D y se compararon las cuatro diferentes condiciones de fricción.

- Existen variaciones de pendiente (módulo de Young) debido a que la medición del desplazamiento del cabezal no se inició siempre en cero, además la aplicación de la carga es muy rápida por lo que no se tienen datos confiables de pendiente.

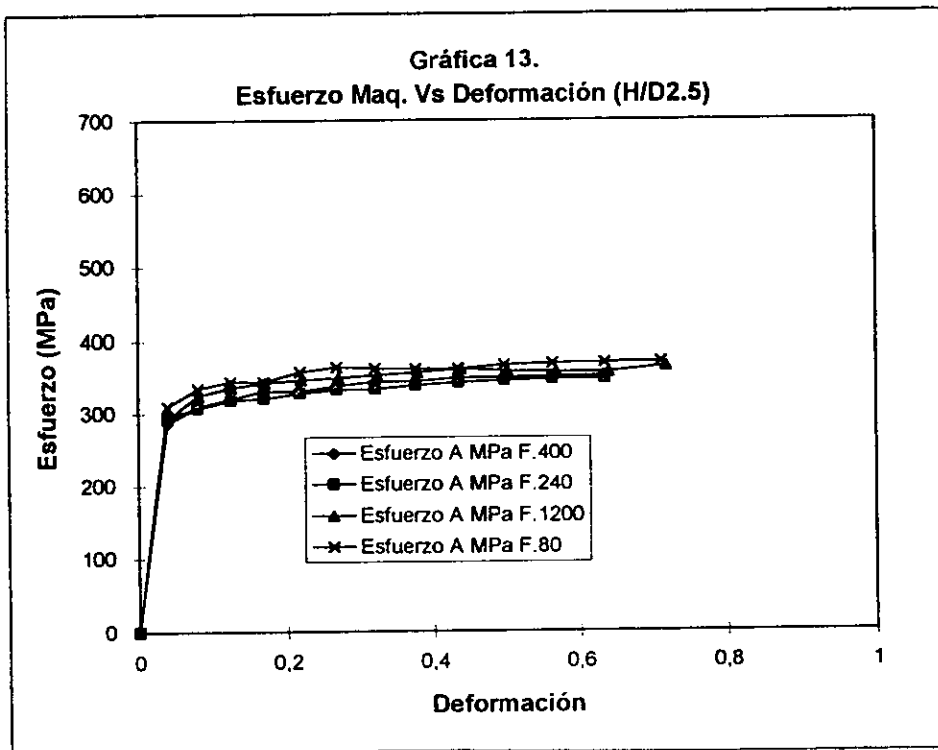
Se seleccionaron las relaciones H/D 2.5, 2.0, 1.5, y 0.5 sin considerar la de 1.0 y 0.3 para no hacer tan repetitiva esta sección. Las curvas obtenidas directamente de la máquina no presentan variación en la pendiente de la zona elástica debido a que la fricción no influye en la rigidez de la máquina.

Las Gráficas 13,14 y 15 son de la relación H/D 2.5 que es la más alta con la que se trabajó y se presentan en las cuatro condiciones de fricción. La primera toma en consideración el esfuerzo máquina, la segunda el esfuerzo real y la tercera el esfuerzo vídeo. En las tres gráficas la condición de fricción más áspera (F.80) presenta un mayor esfuerzo para su deformación.

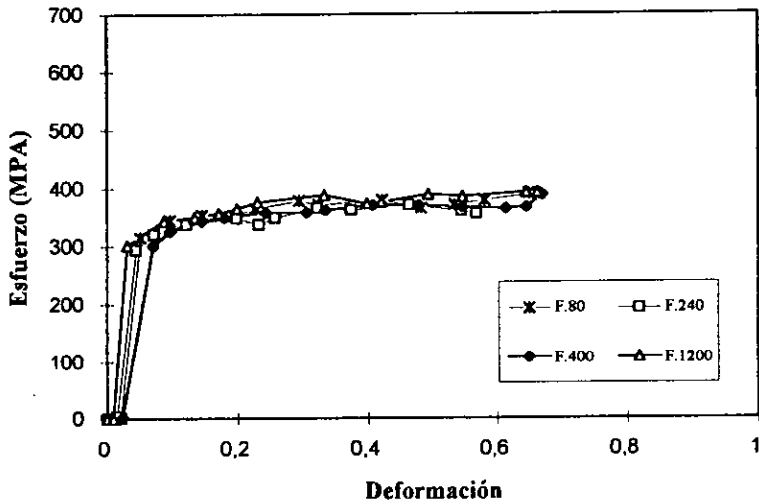
En la gráfica 13, se tiene un esfuerzo máx. en 371 Mpa. existiendo una paridad de esfuerzos entre el resto de las condiciones, siendo el esfuerzo mínimo en la condición 240 a 346 Mpa. La gráfica 14 presenta un esfuerzo máx. en 391 Mpa., siendo el esfuerzo mínimo en la condición 240 a 356 Mpa.

En la tercera gráfica (15) hay un esfuerzo máx. en 409 Mpa., siendo el esfuerzo mínimo en la condición 240 a 358 Mpa.

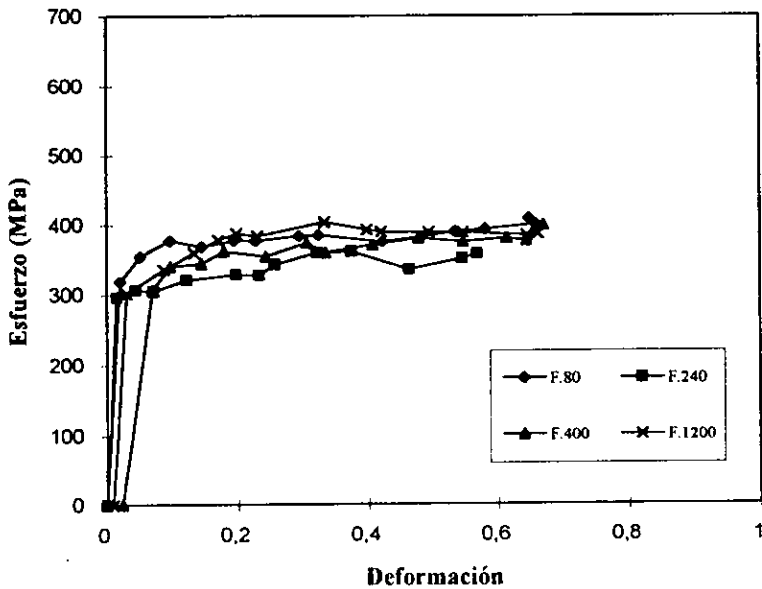
Tomando en cuenta las tres gráficas anteriores, los valores de esfuerzo obtenidos por la máquina son muy constantes, todos los valores de esfuerzo están entre 300 y 400 Mpa. La condición de fricción 80 es la que requiere mayor esfuerzo para su deformación y la que requiere menor es la relación 240, esto debido a fricción por interacción mecánica entre la de mayor rugosidad y fricción generada por adhesión entre la condición más fina.



Gráfica 14. Esfuerzo Real Vs Deformación H/D 2.5



Gráfica 15. Esfuerzo Video Vs Deformación H/D 2.5





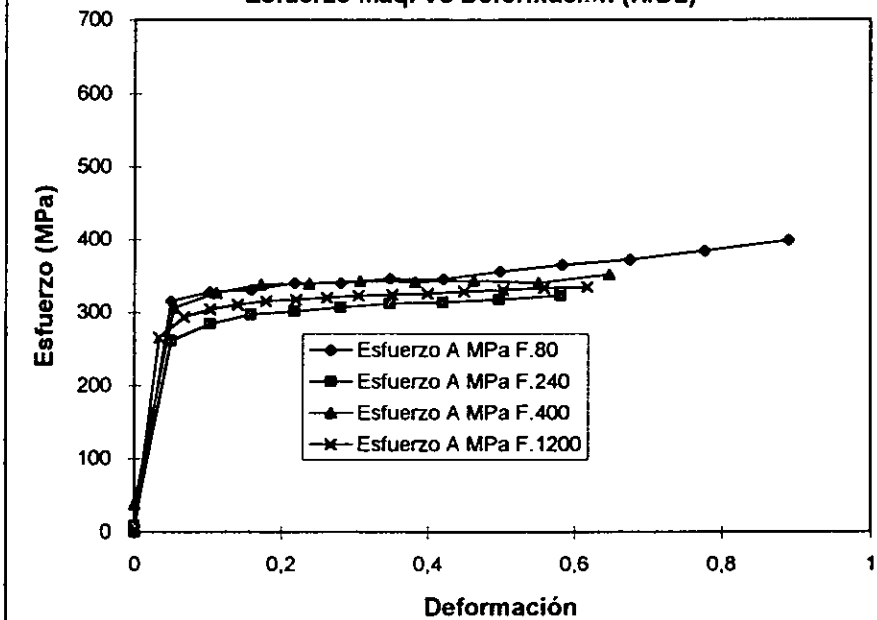
Las Gráficas 16,17 y 18 son de la relación H/D 2.0 y se presentan en las cuatro condiciones de fricción. La primera toma en consideración el esfuerzo máquina, la segunda el esfuerzo real y la tercera el esfuerzo vídeo. Al igual que en las tres gráficas anteriores, la condición de fricción más áspera (F.80) presenta un mayor esfuerzo para su deformación.

En la gráfica 16 se tiene un esfuerzo máx. en 399 Mpa., con un esfuerzo mínimo en la condición 240 a 352 Mpa. La gráfica 17 presenta un esfuerzo máx. en 391 Mpa. siendo el esfuerzo mínimo en la condición 240 a 357 Mpa.

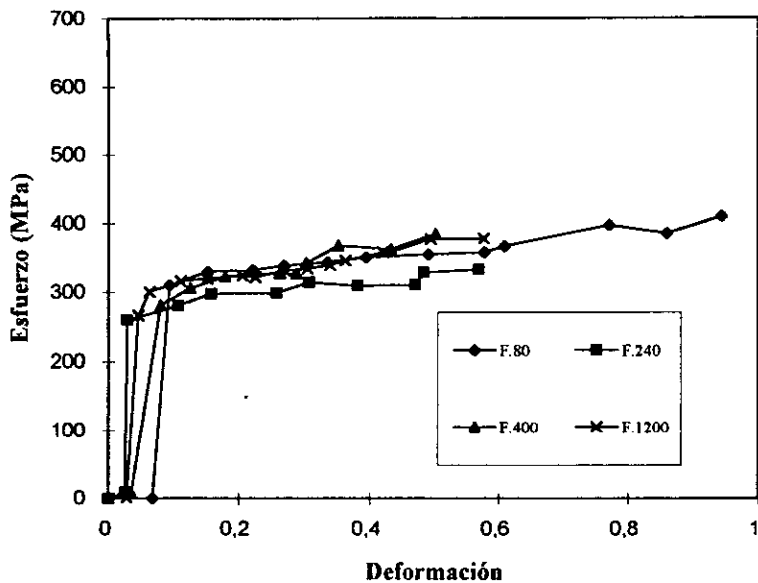
Por último, la gráfica 18 presenta un esfuerzo máx. en 422 Mpa. disminuyendo en las condiciones 1200, 400, siendo el esfuerzo mínimo en la condición 240 a 332 Mpa.

Considerando las tres gráficas anteriores, los valores obtenidos por la máquina son más dispersos que en la relación anterior, los valores de esfuerzo disminuyen en comparación de la relación 2.5, estando entre 250 a 400 Mpa, en una deformación al 50%. La condición de fricción 80 es la que requiere de mayor esfuerzo y la que requiere menor es la relación 240.

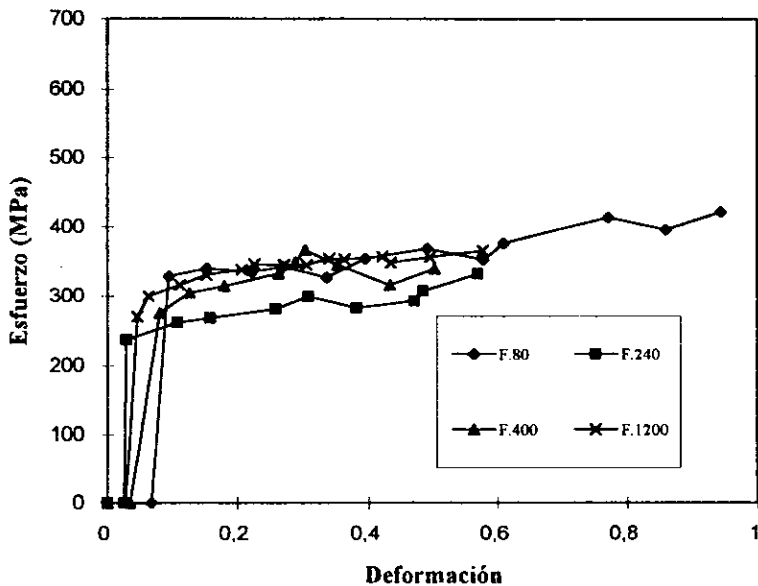
Gráfica 16.  
Esfuerzo Maq. Vs Deformación (H/D2)



**Gráfica 17.**  
**Esfuerzo Real Vs Deformación H/D 2.05**



**Gráfica 18.**  
**Esfuerzo Video Vs Deformación H/D 2.0**



Las Gráficas 19, 20, y 21 son de la relación H/D 1.5 y se presentan en las cuatro condiciones de fricción. La primera toma en consideración el esfuerzo máquina, la segunda el esfuerzo real y la tercera el esfuerzo vídeo. La condición de fricción más áspera (F.80) presenta un mayor esfuerzo para su deformación.

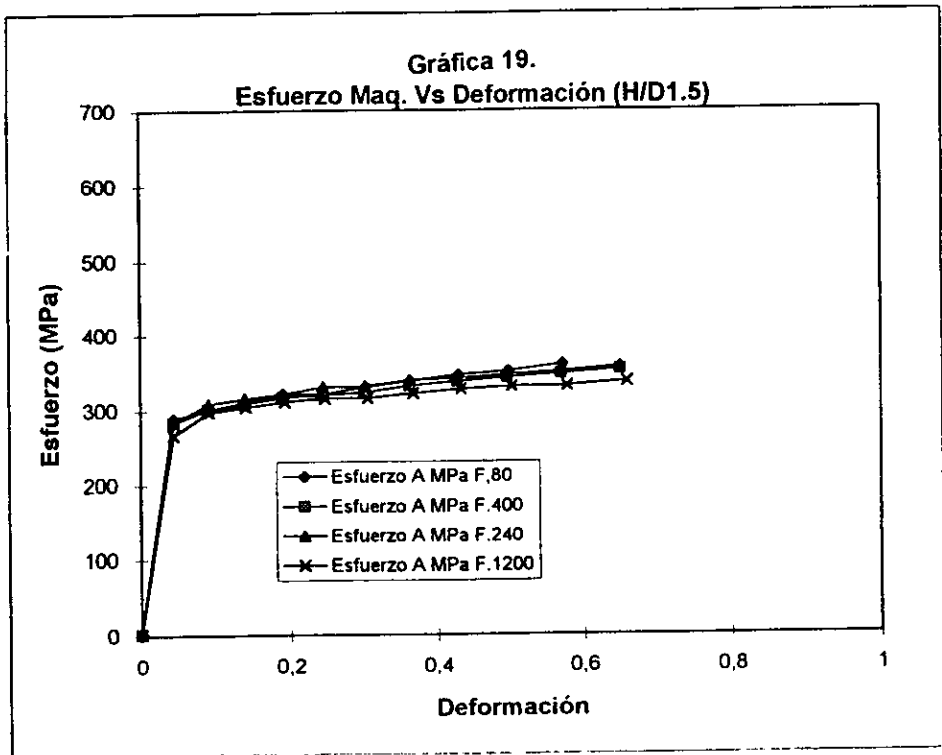
En la gráfica 19, Hay un esfuerzo máx. en 360 Mpa., existe una similitud muy grande entre los esfuerzos de las condiciones 400 y 240 , estando el esfuerzo mínimo en la condición 1200 a 336 Mpa. En la gráfica 20 el esfuerzo máx. en 371 Mpa., y el esfuerzo mínimo en la condición 1200 a 368 Mpa.

En la 21 hay un esfuerzo máx. en 358 Mpa. siendo el esfuerzo mínimo en la condición 1200 a 349 Mpa.

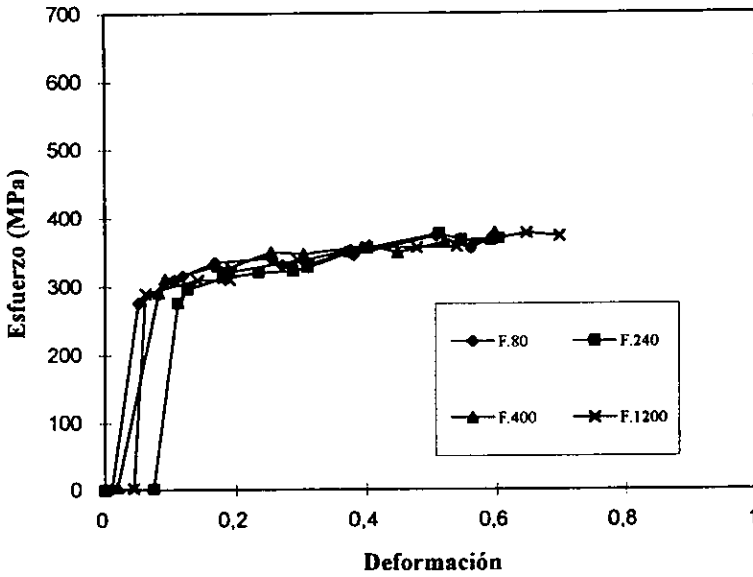
Considerando las tres gráficas anteriores, existe variación de pendiente, los valores de obtenidos por la máquina son muy cercanos, los valores de esfuerzo se mantienen en comparación de la relación anterior estando entre 250 a 400 Mpa, en una deformación al 50%. Se mantiene la a condición de fricción 80 como la que requiere mayor esfuerzo y la que requiere menor es la relación 1200.

Los valores más aproximados a los proporcionados por la máquina son los de vídeo.

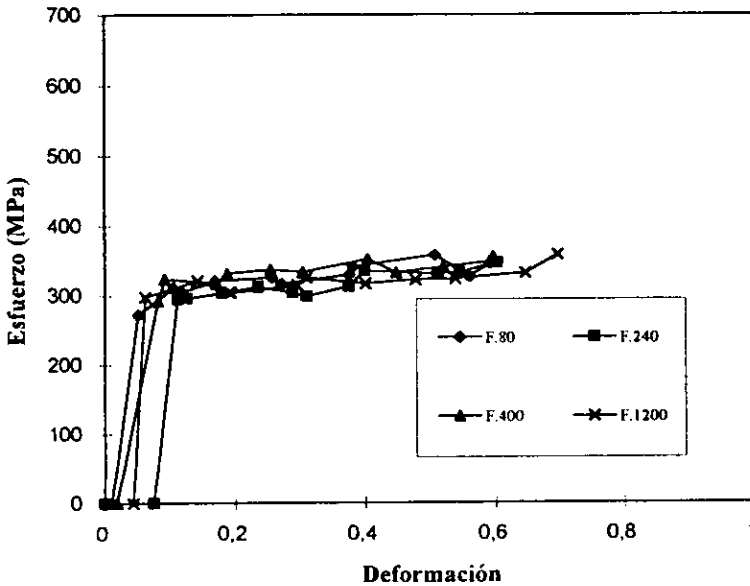
Gráfica 19.  
Esfuerzo Maq. Vs Deformación (H/D1.5)



**Gráfica 20.**  
**Esfuerzo Real Vs Deformación H/D 1.5**



**Gráfica 21.**  
**Esfuerzo Video Vs Deformación H/D 1.5**

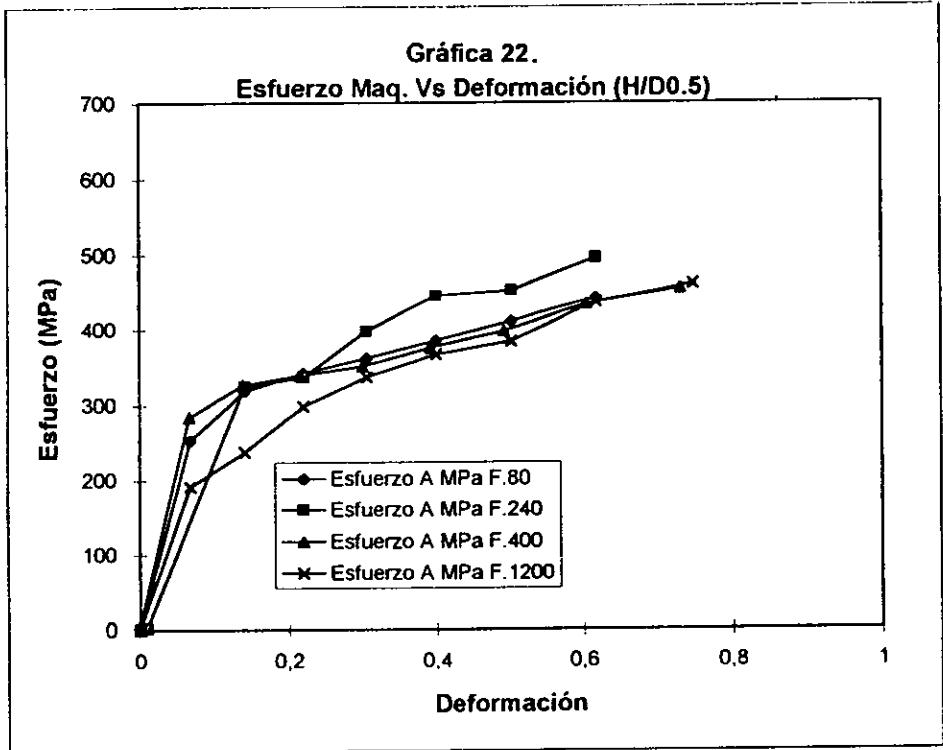


Las Gráficas 22, 23, y 24 son de la relación H/D 0.5 y se presentan en las cuatro condiciones de fricción. La primera toma en consideración el esfuerzo máquina, la segunda el esfuerzo real y la tercera el esfuerzo vídeo. El mayor esfuerzo lo presenta la condición de fricción (F.240) a diferencia de las gráficas anteriores en las que el esfuerzo más grande es en la condición de fricción más áspera (F.80) .

Gráfica 22, aquí se presenta un esfuerzo máx. en 496 Mpa., encontrándose una similitud muy grande entre los esfuerzos de las demás condiciones, estando éstas en un rango de 458- 461 Mpa. En la gráfica 23 existe un esfuerzo máx. en 600 Mpa. encontrándose un esfuerzo mínimo en la condición 400 a 521 Mpa. En la tercera gráfica (Gráfica 24), el esfuerzo máx. está en 508 Mpa. siendo el esfuerzo mínimo en la condición 400 a 457 Mpa.

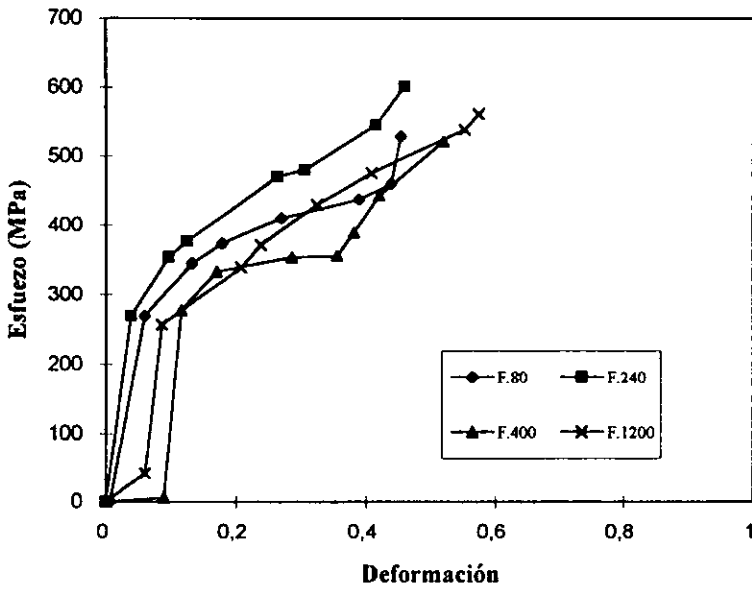
A diferencia de todas las condiciones analizadas anteriormente los valores de esfuerzo para todas las condiciones son más altos, (entre 400 - 500 Mpa) siendo el mayor en la condición F.240, y el mínimo en 400, se observa la tendencia a formar un comportamiento clásico, pero los valores están muy dispersos.

Gráfica 22.  
Esfuerzo Maq. Vs Deformación (H/D0.5)

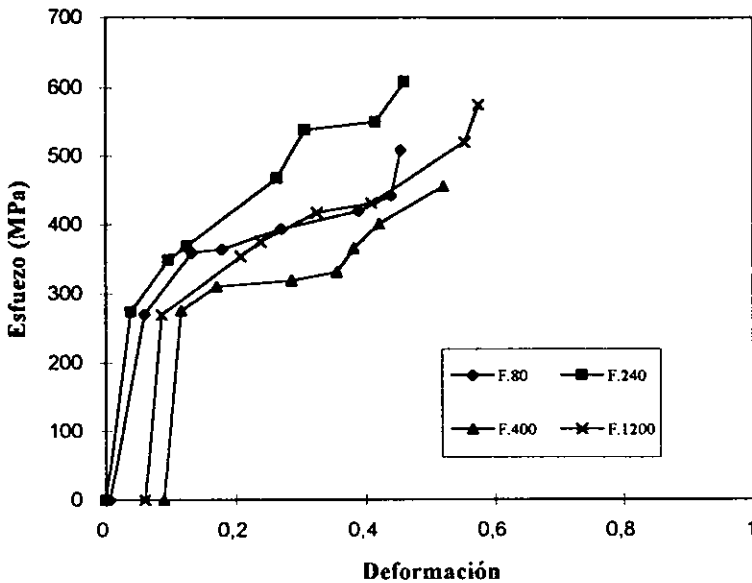




**Gráfica 23.**  
**Esfuerzo Real Vs Deformación H/D 0.5**



**Gráfica 24.**  
**Esfuerzo Video Vs Deformación H/D 0.5**



Dado que la diferencia entre las curvas de la máquina y las obtenidas con el vídeo, se pueden deber a diferencias en las mediciones de las alturas o de los diámetros de las muestras, se analizarán ambas variables. Primero se compararán las alturas en función del tiempo de aplicación de carga.

## **7.2.- GRÁFICOS DE ALTURAS CONTRA TIEMPO.**

Los valores de las alturas determinadas con respecto a la máquina, al compararla con las obtenidas por el vídeo, pueden ofrecer datos interesantes para poder corroborar la información de las veinticuatro gráficas anteriores. Se tomaron las mismas consideraciones que en estas, es decir, primero con respecto a cada una de las relaciones H/D a diferentes condiciones de fricción, y posteriormente a la inversa, a una misma condición de fricción y a diferentes relaciones H/D.

En las gráficas de A-X , se comparan la altura de la máquina y la de vídeo contra el tiempo de aplicación de la carga.

- Se le aplicó una regresión lineal a la gráfica encontrada por los datos de vídeo, para ver que tanto se parecían al comportamiento obtenido por la máquina que es completamente lineal.

Las gráficas A, B, C, y D se obtuvieron para una relación H/D de 2.5 y condición de fricción 80, 240, 400 y 1200 respectivamente. Todas presentaron un comportamiento lineal con un coeficiente de correlación mayor a 0.99.

En las gráficas A, B y C, casi no existe diferencia entre los valores de la máquina y los del vídeo, estos son muy semejantes.

En la gráfica D, existe una pequeña diferencia entre los valores de la máquina y los del vídeo, el tiempo de compresión para una deformación al 50% fue 180 segundos aproximadamente; todas las gráficas de vídeo fueron lineales y van por arriba de las obtenidas por la máquina.

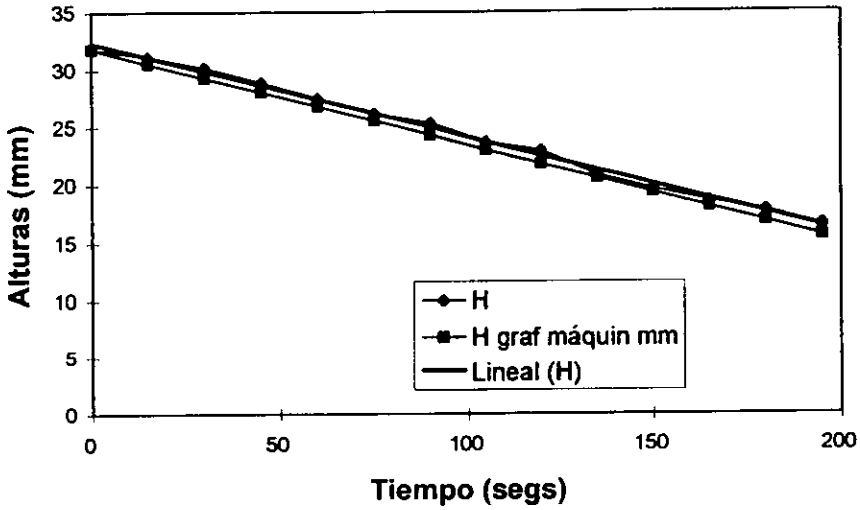
Las gráficas E, F, G, y H se obtuvieron para una relación H/D de 2.0 en una condición de fricción 80, 240, 400 y 1200 respectivamente. Todas presentaron comportamiento lineal con un coeficiente de correlación mayor a 0.99, disminuyendo este un poco en la gráfica G.

En las gráficas E y F, son casi idénticos los valores de la máquina y los del vídeo.

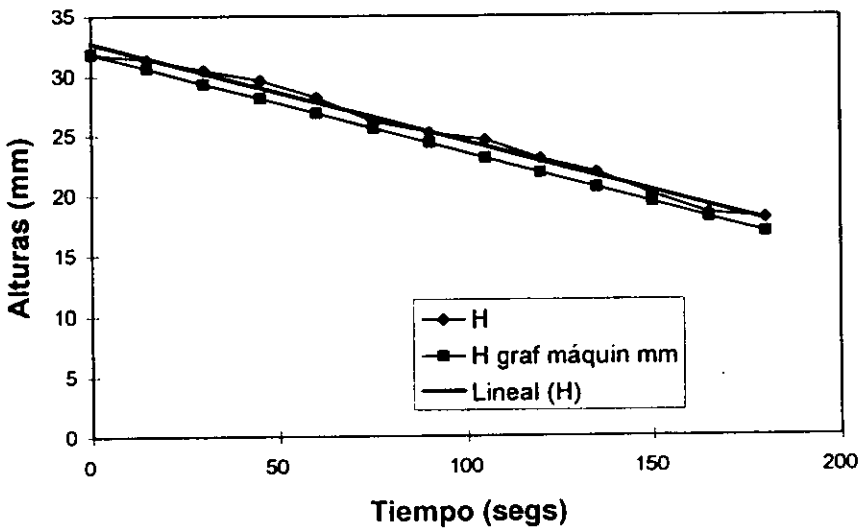
En las gráficas G y H, existe diferencia entre los valores de la máquina y los del vídeo, encontrándose por arriba los valores del vídeo.

Los valores de las alturas obtenidas por la máquina son muy semejantes a los medidos por el vídeo, con excepción de los de la lija 80, que es la de mayor fricción.

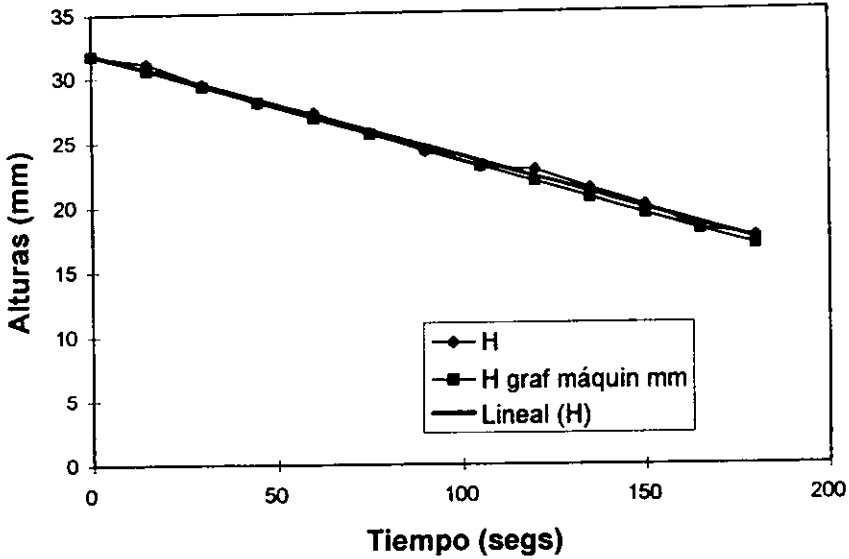
Gráfica A. Alturas vs Tiempo (H/D 2.5 F.240)



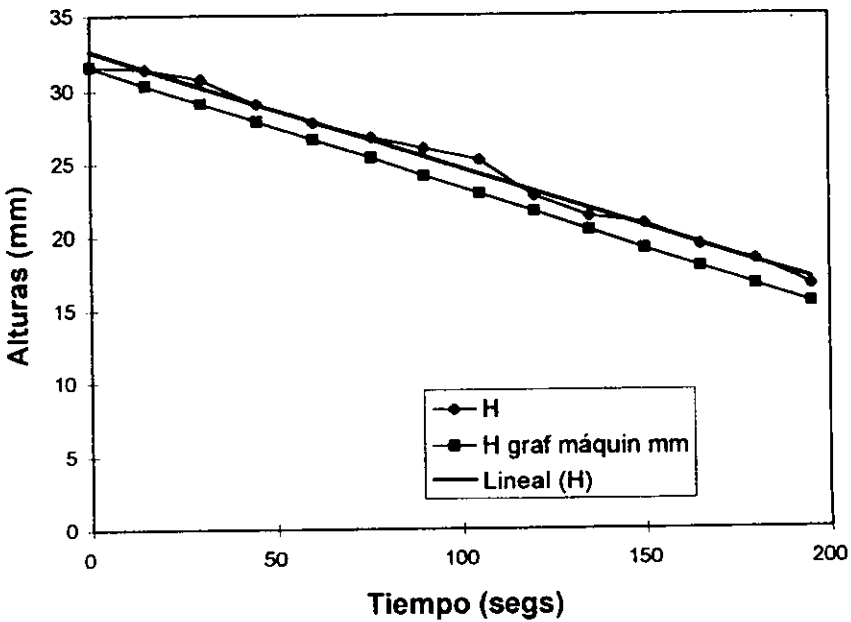
Gráfica B. Alturas vs Tiempo (H/D 2.5 F.240)



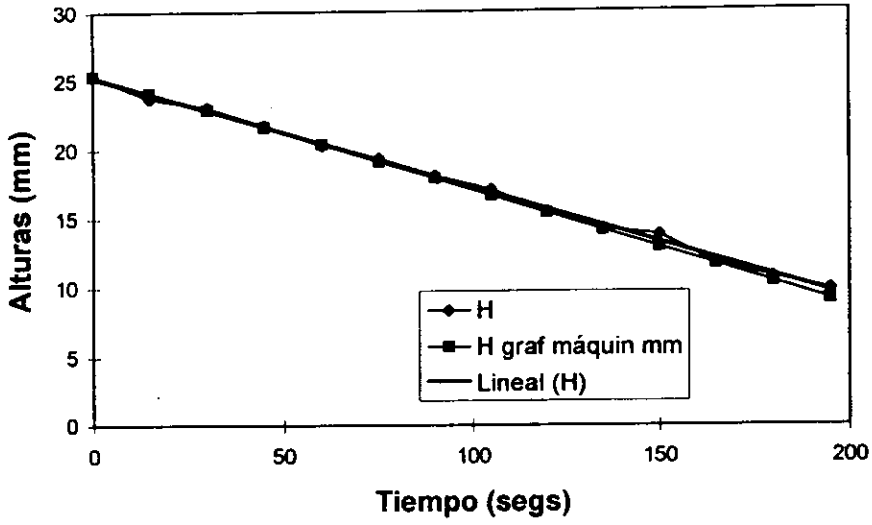
Gráfica C. Alturas vs Tiempo (H/D 2.5 F.400)



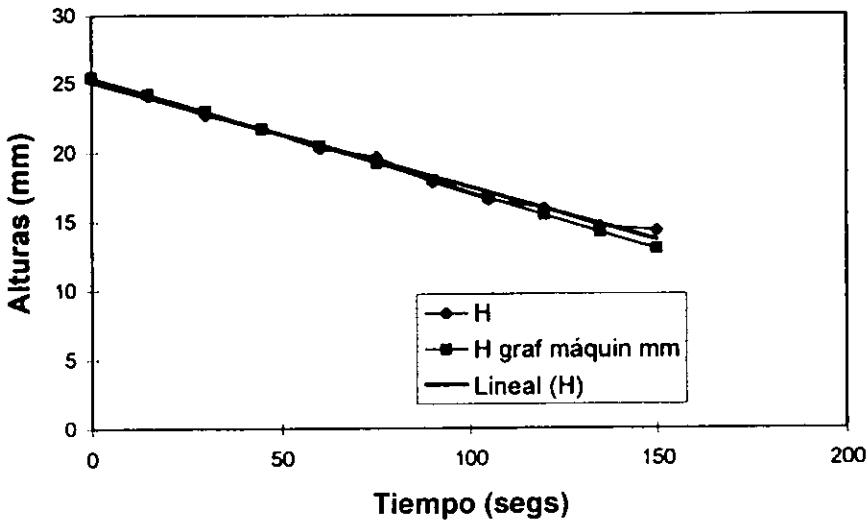
Gráfica D. Alturas Vs Tiempo (H/D 2.5 F.1200)



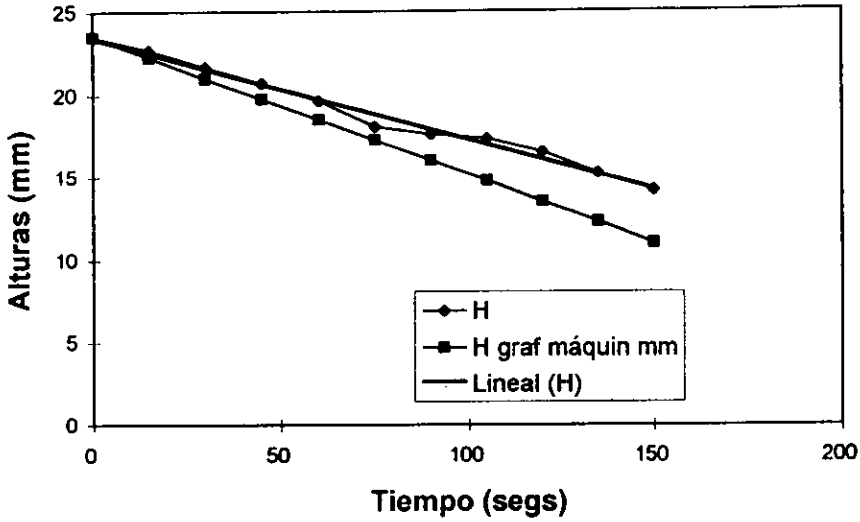
Gráfica E. Alturas vs Tiempo (H/D 2.0 F.80)



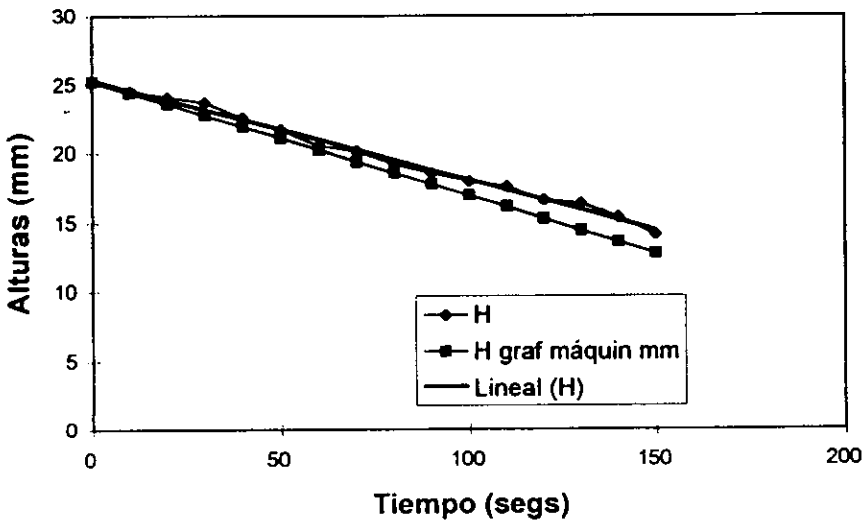
Gráfica F. Alturas vs Tiempo (H/D 2.0 F.240)



Gráfica G. Alturas vs Tiempo (H/D 2.0 F.400)



Gráfica H. Alturas vs Tiempo (H/D 2.0 F.1200)



En la probeta alta (H/D 2.5, lija 80) hay una concordancia casi total, pero va disminuyendo al disminuir la relación H/D, lo cual indica que el efecto de la fricción afecta directamente la altura al producirse abarrilamiento, el cual es función de la fricción y de la altura de la muestra.

Al disminuir la relación H/D se aumenta el efecto de la fricción y la medición de las alturas es más difícil por el tamaño y abarrilamiento de las muestras.

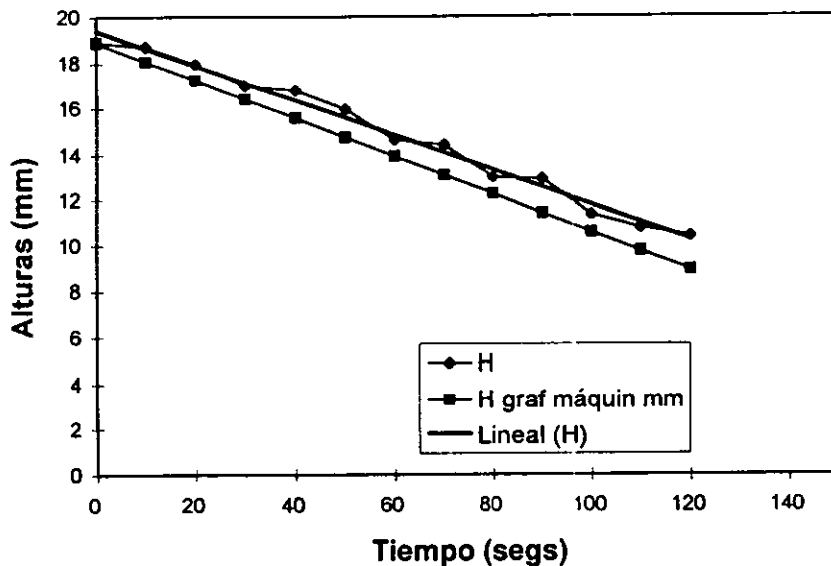
Las gráficas I, J, K, y L fueron obtenidas para una relación H/D de 1.5 con una condición de fricción 80, 240, 400 y 1200 respectivamente. Se presenta un comportamiento lineal con un coeficiente de correlación mayor a 0.99, en las gráficas J, K y L, disminuye este valor en la gráfica I.

En las cuatro gráficas anteriores, existe diferencia entre los valores de la máquina y los del video.

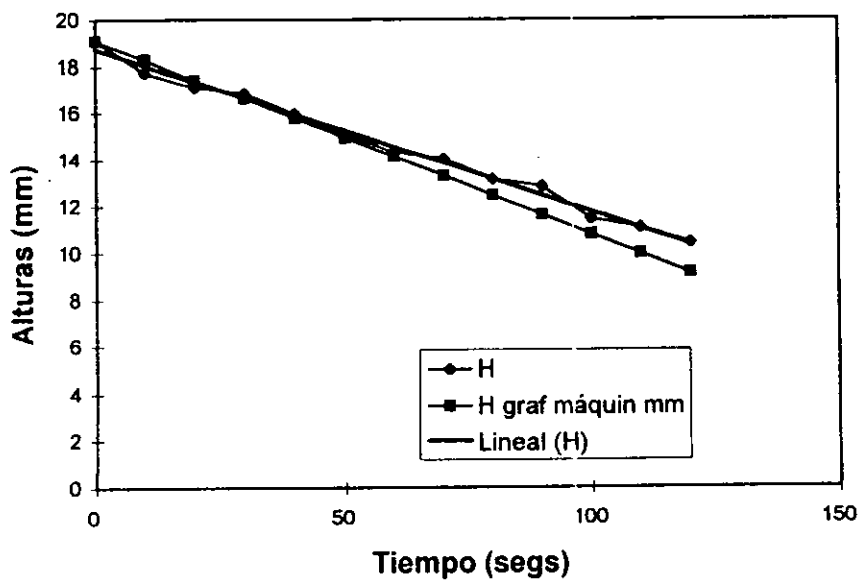
Se tiene un tiempo de compresión para una deformación al 50% de 120 segs. aproximadamente; todas las gráficas de video según el coeficiente de correlación, son lineales y van por arriba de las obtenidas por la máquina.



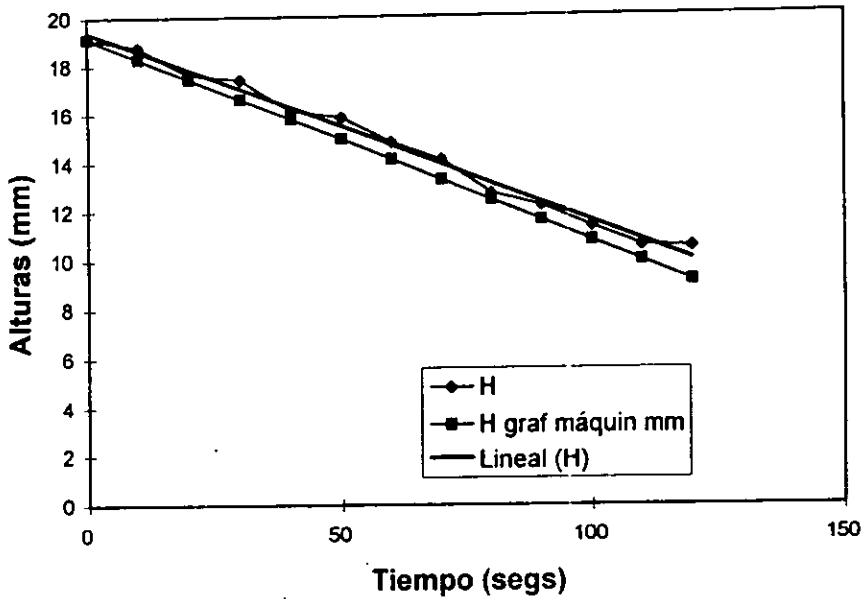
Gráfica I. Alturas Vs Tiempo (H/D 1.5 F.80)



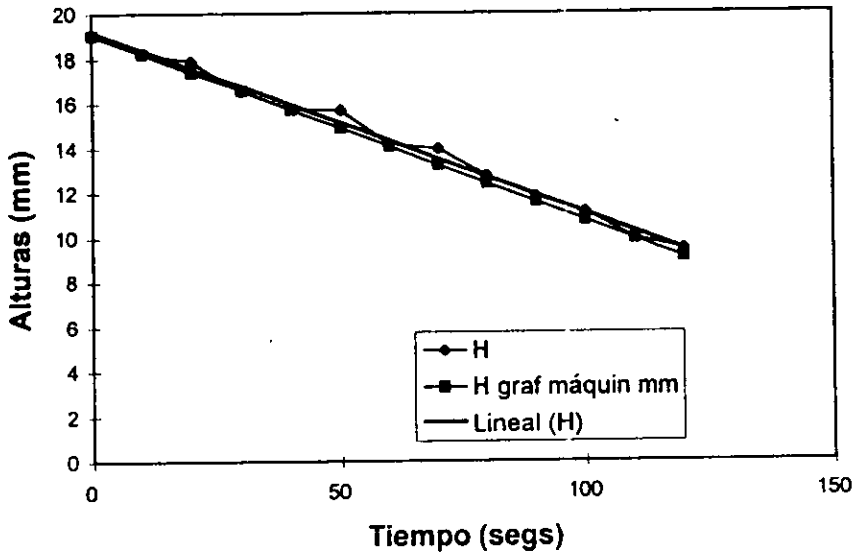
Gráfica J. Alturas Vs Tiempo (H/D 1.5 F.240)



Gráfica K. Alturas Vs Tiempo (H/D 1.5 F.400)



Gráfica L. Alturas Vs Tiempo (H/D 1.5 F.1200)



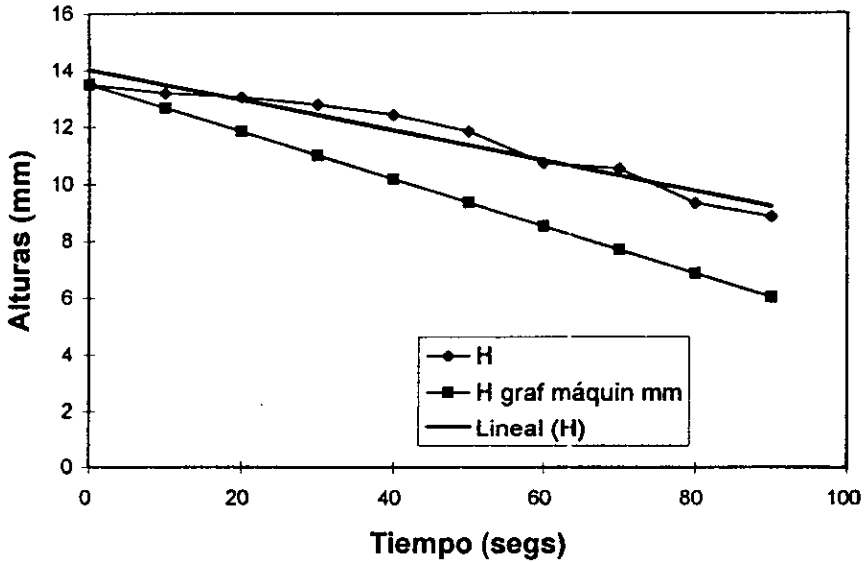
Las gráficas M, N , O y P corresponden a la relación H/D 1.0 con una condición de fricción 80, 240, 400, y 1200 respectivamente.

La gráfica M, presenta un coeficiente de correlación de 0.94, lo cual dice que los valores de vídeo están más dispersos, existe una marcada diferencia entre los valores de la máquina y los del vídeo. Las gráficas N y P aumentan su coeficiente a 0.98 lo que todavía se considera lineal, La gráfica O presenta el mayor coeficiente a 0.99, casi no existe diferencia entre los valores de la máquina y los del vídeo en estas últimas tres gráficas.

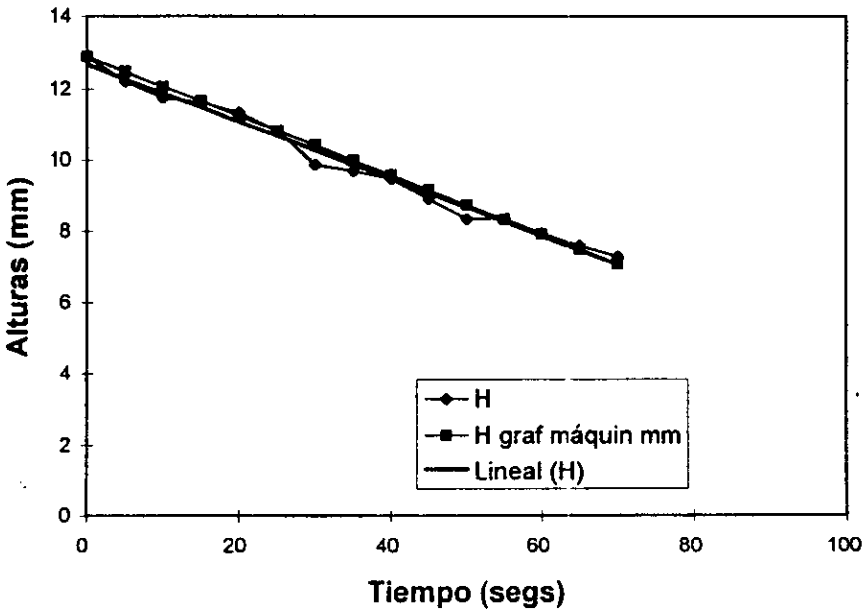
Los valores de vídeo están por encima de los de máquina.

En las gráficas M,N,O,P se tiene un tiempo de compresión para una deformación al 50% de 70 segs. aproximadamente; todas las gráficas son lineales, (a pesar de que en la gráfica M existe menor confiabilidad con respecto a su coeficiente de correlación) y van por arriba de las obtenidas por la máquina a excepción de la gráfica N, en la cual los valores son casi idénticos. La mayor diferencia está en la condición F.80.

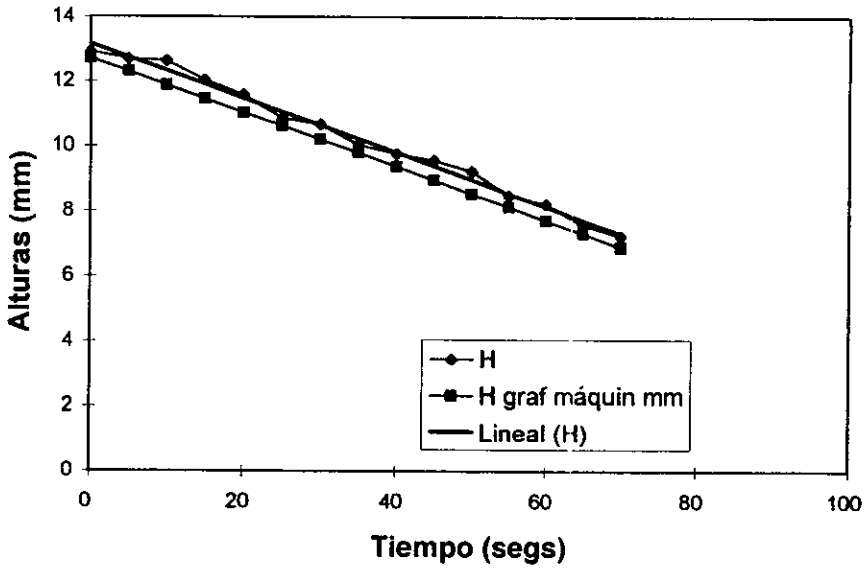
Gráfica M. Alturas Vs Tiempo (H/D 1.0 F.80)



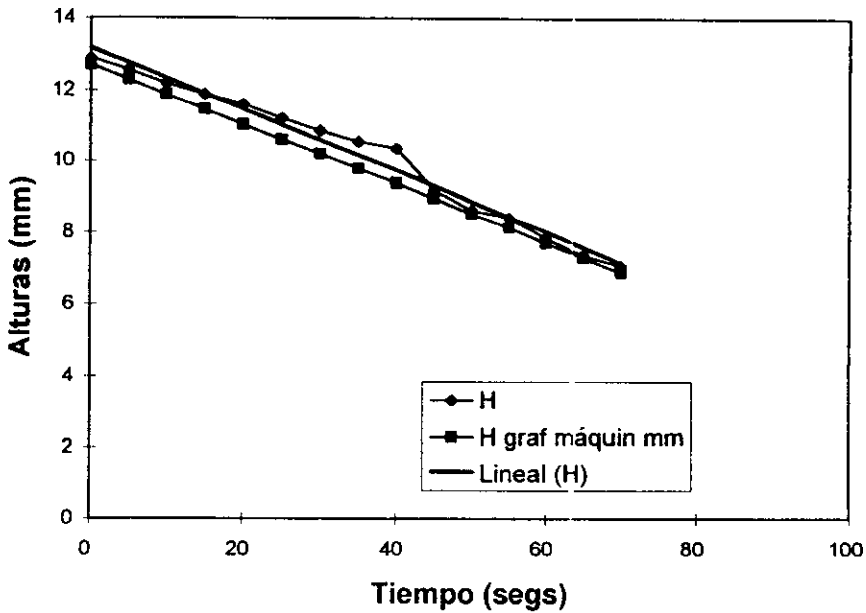
Gráfica N. Alturas Vs Tiempo (H/D 1.0 F.240)



Gráfica 0. Alturas Vs Tiempo (H/D 1.0 F.400)



Gráfica P. Alturas Vs Tiempo (H/D 1.0 F.1200)



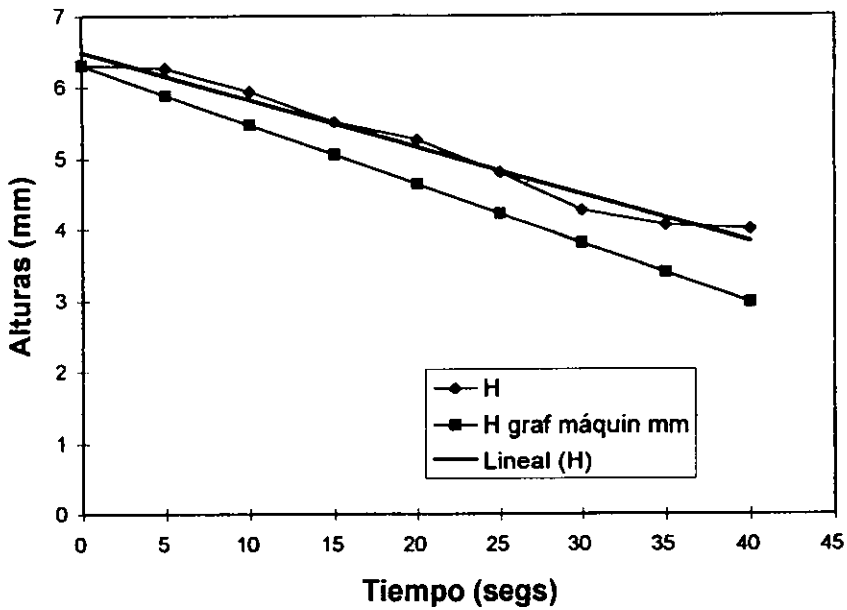
Las gráficas Q, R, S y T, corresponden a la relación H/D 0.5 con condiciones de fricción 80, 240, 400 y 1200 respectivamente, los coeficientes de correlación son de 0.97 en las gráficas Q, R, y S, que entran dentro del comportamiento lineal, en la gráfica T aumenta el coeficiente a 0.98, en todas las gráficas existe diferencia entre los valores de la máquina y del vídeo.

El tiempo de compresión para una deformación al 50% es 35 - 40 segs. aproximadamente; todas las gráficas de vídeo son lineales, y van por arriba de las obtenidas por la máquina, en esta relación todas las condiciones de fricción presentaron una diferencia semejante entre las gráficas de vídeo y las de máquina.

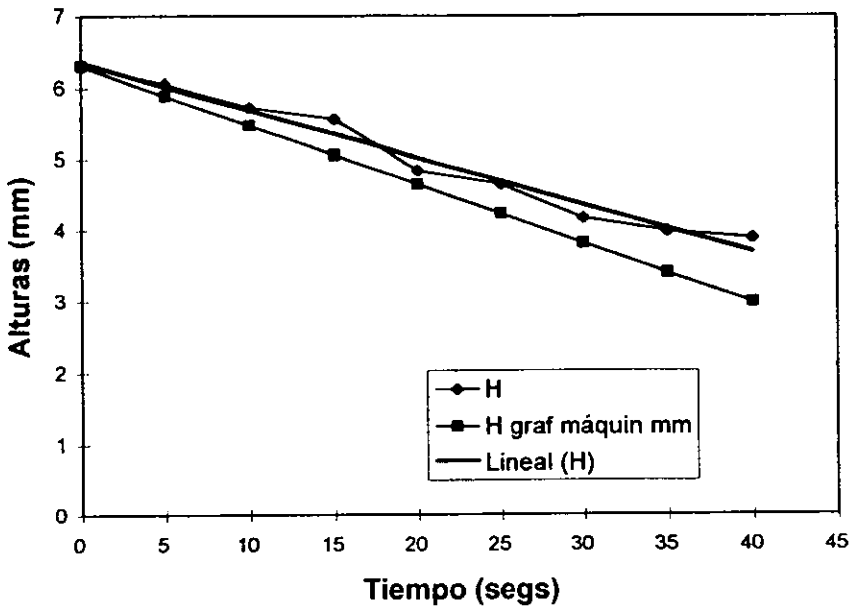
Las gráficas U, V, W y X representan a la relación H/D 0.3 a una condición de fricción 80, 240, 400 y 1200 respectivamente. En la gráfica U el coeficiente es de 0.91 por lo que la gráfica apenas tiende a lo lineal, la gráfica de vídeo se entrecruza con la de la máquina, estando una parte por abajo y otra por arriba.

La gráfica V aumenta el coeficiente a 0.96 que se puede considerar comportamiento lineal aunque con reservas, las gráficas W y X presentan coeficiente de 0.97, en las últimas tres gráficas existe una marcada diferencia entre los valores de la máquina y los del vídeo.

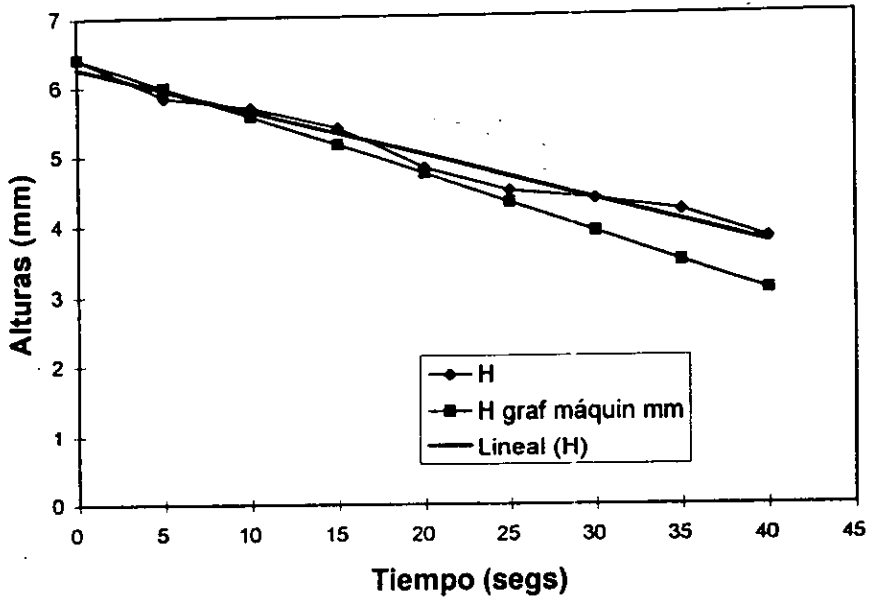
Gráfica Q. Alturas vs Tiempo (H/D 0.5 F.80)



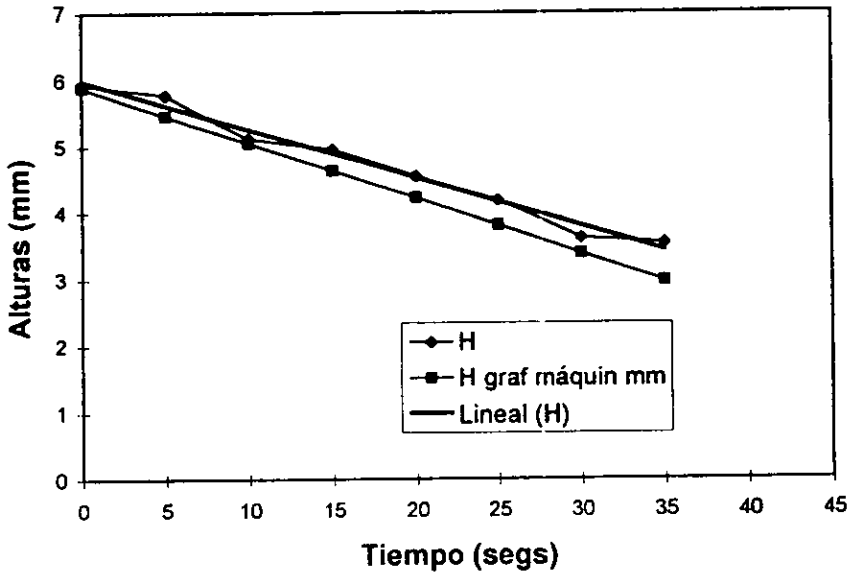
Gráfica R. Alturas vs Tiempo (H/D 0.5 F.240)



Gráfica S. Alturas Vs Tiempo (H/D 0.5 F.400)



Gráfica T. Alturas Vs Tiempo (H/D 0.5 F.400)

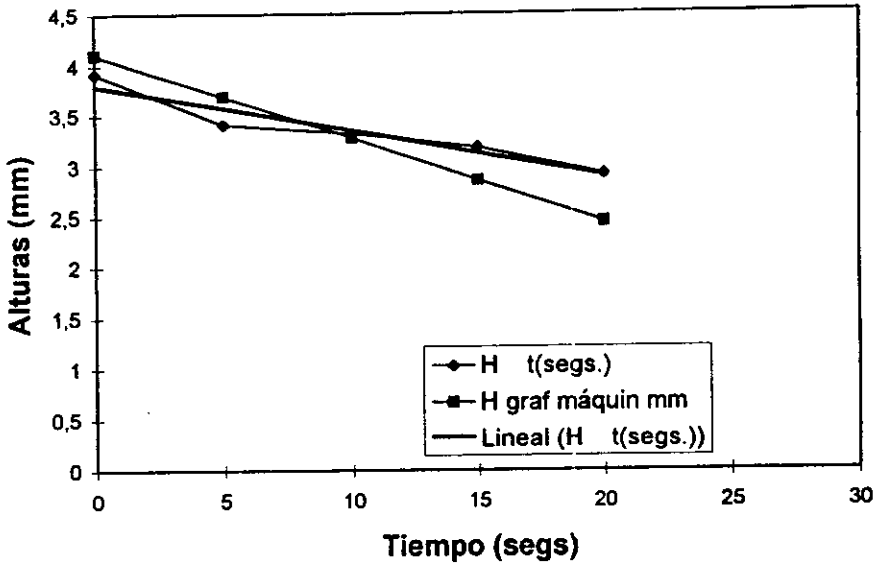




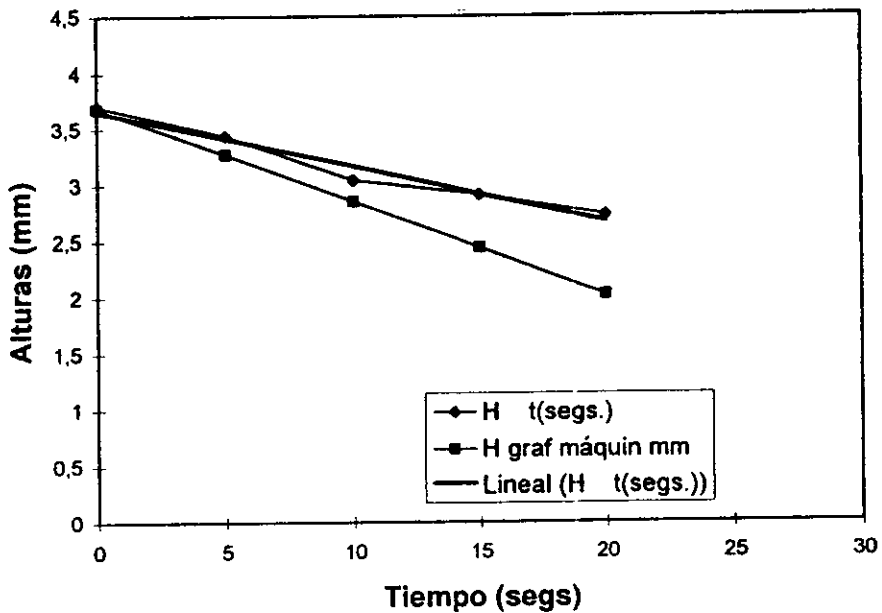
Las gráficas U, V, W, X se alejan más del comportamiento lineal, sobretodo en la gráfica U, en donde el tiempo de compresión anda entre los 20 y 30 segs., existen marcadas diferencias entre las gráficas de vídeo y máquina, aún así la diferencia es casi constante, el tiempo de compresión al 50% es proporcional a la relación H/D, a mayor H/D mayor tiempo de compresión; todas las gráficas de vídeo fueron lineales, habiendo disminución del coeficiente de correlación en las relaciones 0.5 y 0.3, además todas van por arriba de las obtenidas por la máquina.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

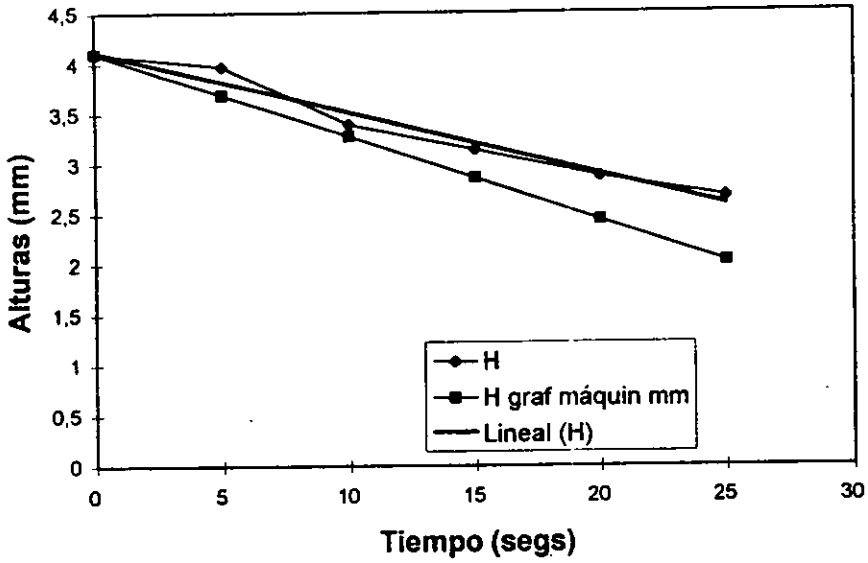
Gráfica U. Alturas Vs Tiempo (H/D 0.3 F.80)



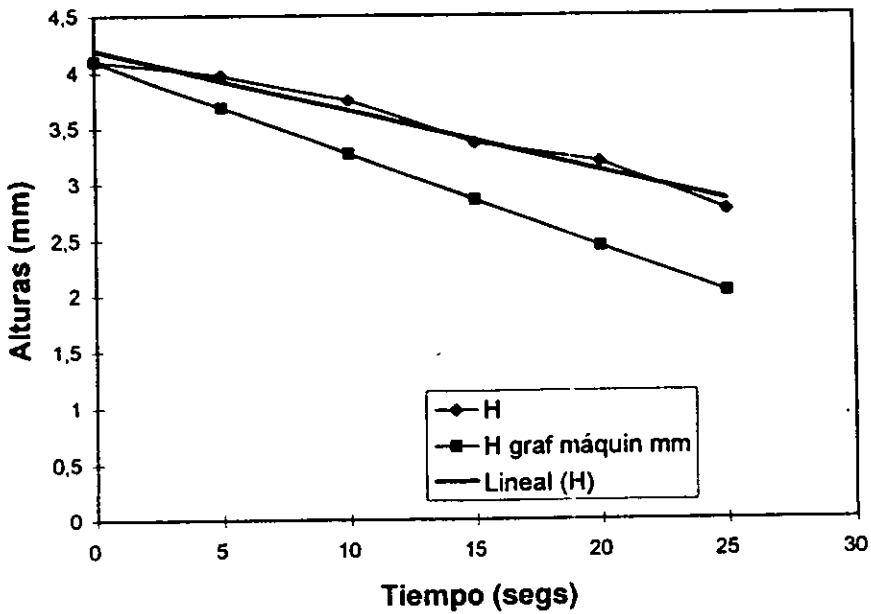
Gráfica V. Alturas Vs Tiempo (H/D 0.3 F.240)



Gráfica W. Alturas Vs Tiempo (H/D 0.3 F.400)



Gráfica X. Alturas Vs Tiempo (H/D 0.3 F.1200)

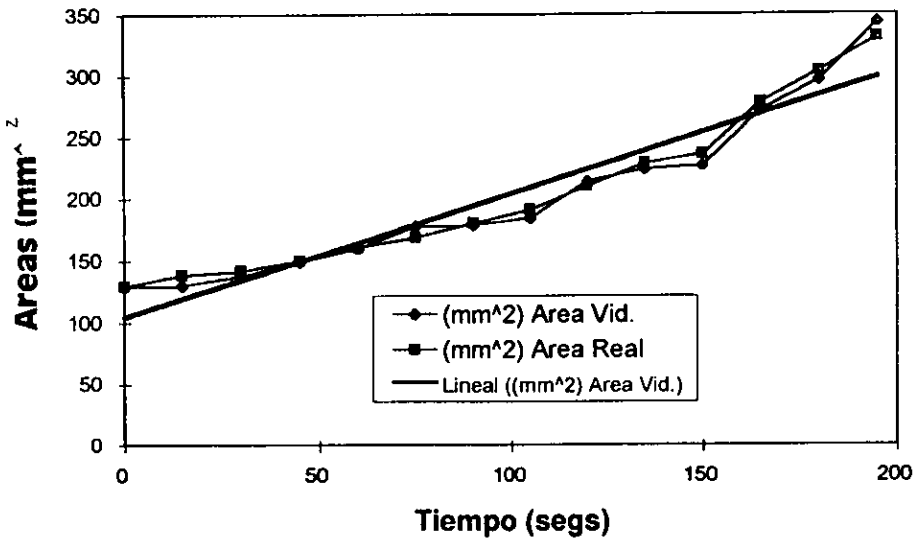


#### 7.4.- GRÁFICOS DE ÁREA ( VÍDEO Y REAL) CONTRA TIEMPO.

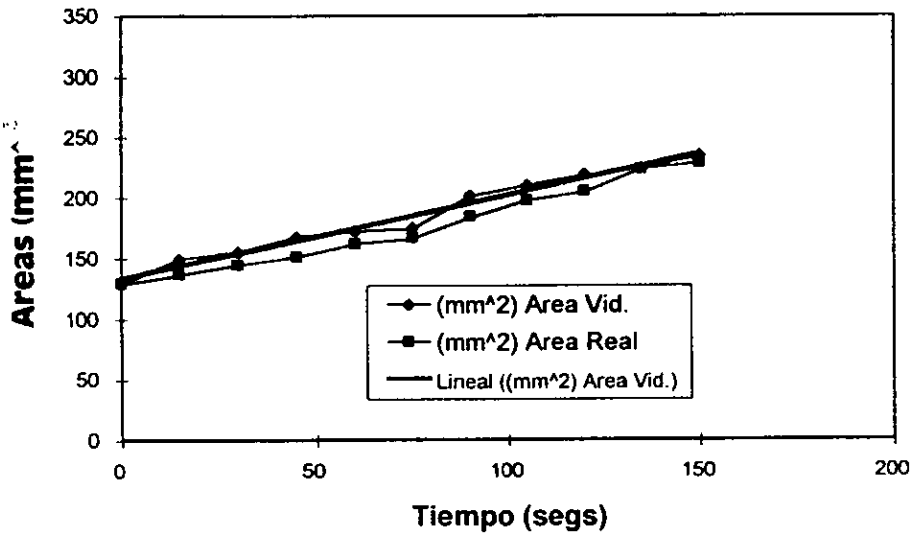
Para ratificar el comportamiento obtenido tanto en los gráficos de esfuerzo contra deformación, como en los de alturas; se hicieron estos gráficos para ver que tan grande es la variación entre las áreas obtenidas por diámetro equivalente ( área vídeo) y por diferencia de alturas ( área real obtenida con el vídeo)

En general todos estos gráficos presentaron un comportamiento muy similar, todos fueron de tipo parabólico, con pendiente positiva, es decir el área aumenta con el tiempo, las diferencias encontradas entre los gráficos de máquina contra los de vídeo fueron los mismos que en los gráficos de alturas, por lo que se pensó, que no era necesario volver a analizar 24 gráficos, para decir lo mismo, tomamos como ejemplo, solo un par de estas gráficas para afirmar su comportamiento.

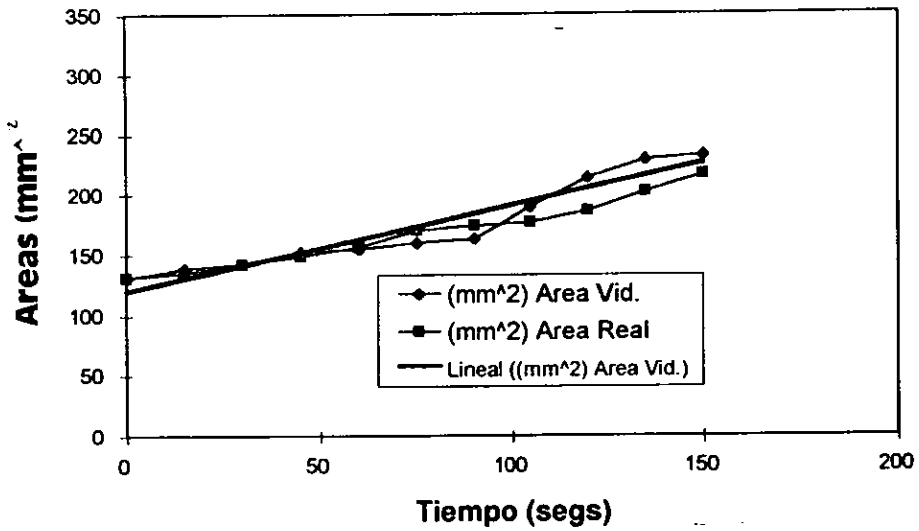
Tiempo Vs Areas (H/D 2.0 F.80)



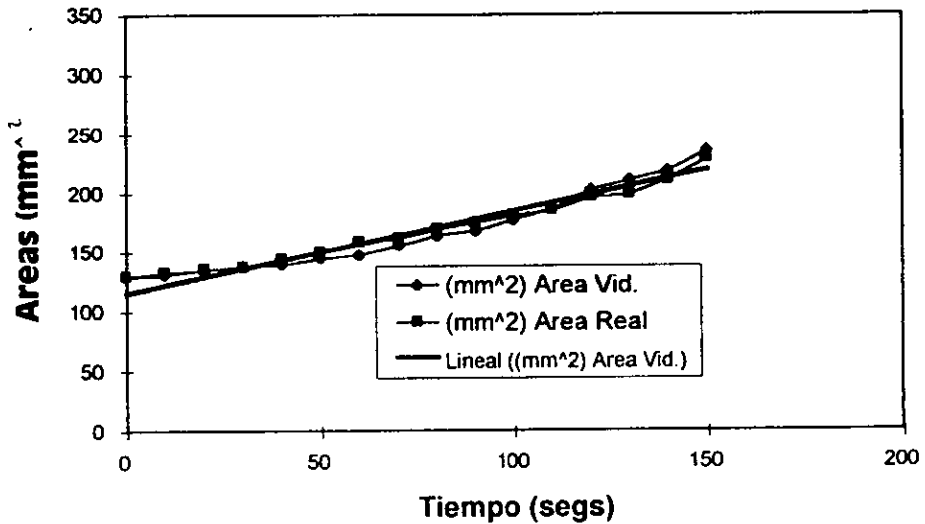
Tiempo Vs Areas (H/D 2.0 F.240)



Tiempo Vs Areas (H/D 2.0 F.400)



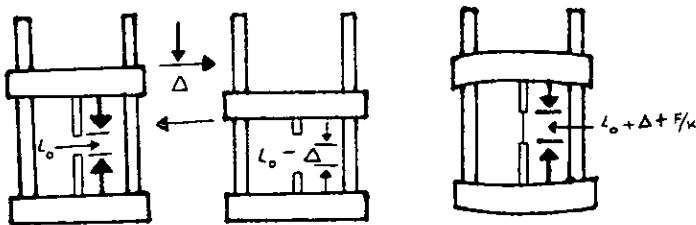
Tiempo Vs Areas (H/D 2.0 F.1200)



## 7.5- DISCUSIÓN.-

- En general, la altura indicada por la máquina fue menor que la altura en el vídeo.

Si retomamos la figura 5, pero para la prueba de compresión, la figura quedaría de la forma: (Fig.11)



En la figura (a), se nota la máquina en prueba de compresión, considerando la altura original de la muestra ( $L_0$ ), en la (b) comienza la aplicación de carga por lo que la altura de la muestra queda como la altura original menos el cambio de altura ( $L_0 - \Delta$ ).

Por último observamos que en la figura (c), se exagera notablemente para poder explicar la influencia de la rigidez de la máquina en las pruebas de compresión, quedando el valor de altura de la muestra como el cambio de altura más la influencia de la rigidez.

$$(L_0 - \Delta) + F/K.$$

De aquí que podamos explicar que las alturas obtenidas por la máquina tengan una variación con respecto a las de vídeo provocada por una mínima deformación de esta,

por la presencia de la rigidez, esta presencia no la considera la máquina al momento de dar sus datos, las alturas obtenidas por el video no toman en cuenta esta variación, por lo tanto sus valores son mayores.

- El método no se juzga aplicable a las probetas de relaciones de H/D pequeñas (0.5 y 0.3), porque existe demasiado error al momento de efectuar la medición sobre la pantalla (10.986 % en promedio). En estas probetas el tiempo de aplicación de carga es muy corto, y no permite obtener una cantidad de datos confiables, porque solo se obtienen uno o dos datos por muestra, por este error, los esfuerzos obtenidos por la videograbación son mucho mayores que los dados por la máquina.

- Las relaciones 0.5 y 0.3 siempre requieren esfuerzos mayores para su deformación, debido a su baja altura en comparación de su área transversal.

- En general, la relación 2.0 presentó mayor deformación que las demás relaciones a un mismo esfuerzo, debido a que la altura no es tan determinante como en las probetas altas en donde se puede provocar "pandeo" o como en las pequeñas que puede haber errores de medición como se mencionó anteriormente.

- La condición de fricción 80 requiere también un esfuerzo mayor debido a interacción mecánica entre las superficies, de la probeta y de las placas de compresión.



-Se tiene que tener mucho cuidado con las relaciones H/D más altas, debido a que es común que presenten abarrilamiento y/o pandeo, y por tanto la información obtenida esté falseada.

- En las gráficas de esfuerzo - deformación, existe una variación de pendiente en debido a la aplicación de carga casi instantánea, es decir, se rebasa muy rápidamente la zona elástica en la deformación, por lo que la información obtenida es en la zona plástica.

- Los esfuerzos menores se van alternando entre las condiciones 240, 400 y 1200, debido a presencia de interacción mecánica en las dos primeras y fricción por adhesión en la tercera.

En las gráficas de alturas contra tiempo.

- Existe una disminución de altura con respecto al tiempo al aplicar una carga.

- El tiempo de compresión al 50% es proporcional a la relación H/D, a mayor H/D mayor tiempo de compresión.

- Todas las gráficas de vídeo fueron lineales.

## **8.- CONCLUSIONES:**

- El método de la videograbación, se puede utilizar con cierta confiabilidad en relaciones mayores o iguales 1.0, 1.5 y 2.0 (3.362% de error promedio) por lo tanto, el método propuesto para la determinación de la altura de la muestra es válido.

## 9.- BIBLIOGRAFÍA:

- 1) - Annual book of ASTM Standards section "Metals Mechanical Testing elevated and low temperature"  
ASTM U.S.A 1989
- 2) - Robert Nuñez T. Ramírez Vieyra J. Salas Banuet G. Noguez Amaya M.A  
"El Módulo de Young en la compresión Axisimétrica"  
Información Tecnológica, Chile En prensa.
- 3) - Smith. William F.  
"Fundamentos de la ciencia e ingeniería de Materiales"  
Segunda Edición  
Mcgraw-Hill  
México 1993
- 4) - Anderson Robert Clark  
ASM International  
"Destructive Testing"  
USA 1988
- 5) - Hamstad, M.A y Gillis, P. P.  
"Effective Strain Rates in low Speed Uniaxial Tension test"  
Metals Handbook, Vol. 8 Mechanical Testing. American Society for Metals p41-45
- 6) - Dieter George E.  
"Mechanical Metallurgy"  
Second Edition  
Mcgraw -Hill  
Japan 1976
- 7) - Flinn R.A y Trojan P.K  
"Materiales de Ingeniería y sus aplicaciones"  
Mcgraw- Hill México 1979
- 8) - Keyser A. Carl  
"Ciencia de materiales para ingeniería"  
Segunda reimpresión  
México 1979

- 9) - ASM Handbook  
Volume 8  
"Mechanical Testing"  
USA 1985
- 10) - Schey, J.A Venner ,T.R  
" The effect of friction on pressure in upsetting at low diameter - to - heigt ratios"  
Journal of Mechanical Working Technology  
Elsevier Scientific publishing Company printed in netherlands Vol. 6 1982.
- 11) - ASM Handbook, vol.18: "Friction, lubrication and wear technology, 1992
- 12) - "Metals Handbook"  
Volume 2 tenth edition  
Propieties and Selection  
Nonferrous alloys and Special-Purpose material  
ASM Internacional USA 1990
- 13) - Schey, J.A Venner ,T.R and Takomana, S.L "Shape Changes in the upsetting of Slender Cylinders" . journal of Engineering for industry, Transactions of the ASME , Febrary 1982. Vol.104 pp.79-83.