

Nº 8615
FECHA 5-6-1998

Mecánica de fractura elasto-plástica dinámica

Determinación de curvas J-R mediante el ensayo Charpy Instrumentado

TESIS PARA MAGISTER SCIENTIAE
EN CIENCIA DE LOS MATERIALES

Gabriel E. Carcagno

Director: Dr. Rubén Herrera
Co - director: Dr. José L. Otegui

Instituto de Tecnología de Materiales
INTEMA
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Mar del Plata



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Nº 8615
FECHA 5-6-1998

Mecánica de fractura elasto-plástica dinámica

Determinación de curvas J-R mediante el ensayo Charpy Instrumentado

TESIS PARA MAGISTER SCIENTIAE
EN CIENCIA DE LOS MATERIALES

Gabriel E. Carcagno

Director: Dr. Rubén Herrera

Co - director: Dr. José L. Otegui

Instituto de Tecnología de Materiales
INTEMA
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de Mar del Plata

Para Ceci, Agus y Nico

Agradecimientos:

- *A los Ings. J. Pérez Ipiña y al Dr J. C. Gonzalez, quienes me brindaron el apoyo y guía inicial en la tarea de investigación;*
- *Al Ing. Luis De Vedia, a la Fundación Lationamericana de Soldadura (FLS) y a la empresa CONARCO S.A. por los medios brindados y el apoyo para llevar a cabo la tarea experimental;*
- *Al Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT) y al Instituto de Tecnología de Materiales (INTEMA), instituciones donde se llevó a cabo la presente investigación*
- *Al CONICET, por el apoyo brindado.*

Resumen

El ensayo de impacto Charpy es una de las técnicas experimentales más difundidas y de mayor utilización en laboratorios de todo el mundo. La incorporación de instrumentación adicional (provista por strain gages incorporados al golpeador, osciloscopio y/o adquisición de datos, procesamiento, etc.) permitió incrementar notablemente la información generada a partir de este ensayo. En este trabajo se analizó y diseñó una metodología para obtener, a partir de la citada información, una caracterización del comportamiento a fractura del material en el rango elasto-plástico (en este caso bajo condición de impacto). Para ello en primer término se desarrolló una metodología particular para el tratamiento de la información del ensayo. La información original provista por el péndulo utilizado consistió en el diagrama P vs t (carga vs tiempo). La generación de las curvas P vs V (carga vs desplazamiento del punto de aplicación de la misma), que constituyen el punto de partida para el cálculo de los parámetros fractomecánicos, requirió de la aplicación de técnicas particulares y de la estimación de parámetros de la máquina y probetas (rigidez, velocidades de impacto, masa efectiva del péndulo, etc). En segundo término se verificó la aplicabilidad de los parámetros fractomecánicos usualmente utilizados en el caso estático (integral J , parámetro η_{pl}). Finalmente, desarrollada la técnica experimental y verificada la validez de los parámetros tradicionales, se utilizaron las técnicas más recientes propuestas en la literatura para determinar los valores de J_{ID} y curva J-R, de forma tal de convertir este ensayo simple en un método de evaluación de propiedades fractomecánicas confiable y consistente. El método desarrollado es del tipo uniprobeta, de manera tal de permitir la caracterización del material a partir de un único ensayo, manteniendo de esta manera las ventajas comparativas del ensayo Charpy. A fin de verificar la validez de las hipótesis asumidas, se planteó y desarrolló un método alternativo del tipo multiprobeta, que permitió la corroboración de los crecimientos de fisura estimados por el método uniprobeta. Para ello se fabricó un dispositivo especial para provocar la detención brusca del péndulo (y por ende del evento de impacto) en una posición determinada.

Para la evaluación experimental del método se utilizó un material de comportamiento elasto-plástico y elevada consistencia en su comportamiento (20MnMoNi). Aunque el objetivo del presente trabajo no fue la caracterización de un material en particular sino la puesta a punto de una metodología, se discutió la validez de los resultados obtenidos considerando los requerimientos mínimos que deben satisfacerse de acuerdo a los requerimientos corrientes fijados en las normas de evaluación de parámetros fractomecánicos.

En síntesis, la metodología propuesta permite obtener toda la información a partir del ensayo de una sola probeta, manteniendo las ventajas que hacen del ensayo Charpy uno de los ensayos de materiales más exitosos y difundido: sencillez de operación, rapidez, economía. Con la incorporación de programas de cálculo simples como los utilizados en este trabajo, es posible la automatización total del tratamiento de la información, requiriéndose de muy poco tiempo para la obtención de los parámetros fractomecánicos característicos del material.

INDICE

	Página
1. Introducción	5
2. Características del ensayo Charpy	
2.1. El ensayo Charpy standard	6
2.2. Ensayo Charpy instrumentado	7
2.3. Requerimientos globales de ensayo	9
2.4. Ensayo Charpy con probeta prefisurada	13
3. Aplicación de la Mecánica de Fractura al ensayo Charpy instrumentado.	
3.1. La integral J	16
3.2. Tenacidad a la fractura elastoplástica, J_{IC} , curva J-R	17
3.3. Factor η plástico	21
3.4. Método de Normalización	25
3.5. Aplicaciones al caso dinámico	27
3.6. Método propuesto para la determinación de la curva J-R dinámica.	28
4. Método experimental	
4.1. Material	36
4.2. Probetas	36
4.3. Equipamiento utilizado	37
4.4. Tratamiento de los datos de ensayo	47
5. Resultados experimentales	
5.1. Tratamiento de los datos de ensayo (obtención registros Carga - Desplazamiento).	67
5.2. Determinación experimental del factor η_{pl} .	71
5.3. Ensayos “stop block”.	76
5.4. Resultados experimentales método uniprobeta	90
6. Conclusiones	109
7. Referencias.	
Anexo I: Listado programa “IMPACTO”	
Anexo II: Listado programa “FRACDIN”	

Mecánica de fractura elasto-plástica dinámica

Determinación de curvas J-R mediante el ensayo Charpy Instrumentado

1.- Introducción

Los ensayos convencionales de tracción o mecánica de fractura se realizan aplicando la carga de manera cuasi-estática, es decir la velocidad de deformación es muy lenta. En los ensayos de fractura convencionales (por ejemplo ASTM E 813, “*Standard Test method for JIC, a Measure of Fracture Toughness*”),⁽¹⁾ la tasa de variación del factor de intensidad de tensiones K es del orden de $2.75 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}} \cdot \text{s}^{-1}$. Sin embargo, cuando los componentes o elementos estructurales en servicio deben estar sujetos a elevadas velocidades de aplicación de la carga, o deben sobrevivir a cargas del tipo impactual ya sea por diseño o en condiciones de accidente, la aplicabilidad de los parámetros fractomecánicos obtenidos a través de los ensayos tradicionales se torna cuestionable. En condiciones de impacto, la tasa de variación del factor de intensidad de tensiones K puede llegar a alcanzar valores del orden de $10^4 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}} \cdot \text{s}^{-1}$. Los efectos inerciales y cinéticos juegan un papel que no puede ser tenido en cuenta con los métodos tradicionales. Por lo tanto, la formulación de métodos normalizados confiables de evaluación de la tenacidad dinámica es esencial para evaluar la integridad de una amplia variedad de componentes y estructuras.

La medición y el análisis del comportamiento a fractura bajo elevada velocidad de carga es más compleja que bajo condiciones cuasi-estáticas, y al momento no han sido establecidos métodos cuantitativos normalizables. El objetivo primario de cualquier método de ensayo para determinar la fractoténacidad dinámica, propuesto como estándar, debe ser proveer resultados exactos y reproducibles, a velocidades de aplicación de carga iguales o superiores a las que el componente pueda encontrar en servicio. Si la idea es alcanzar una utilización generalizada del método de ensayo, éste debe ser lo más simple posible, debe hacer uso en lo posible de máquinas de ensayo existentes, utilizar instrumentación disponible o no excesivamente costosa, y las probetas de ensayo deben ser estandarizables. Aunque este tipo de ensayo no sería de realización masiva, tampoco es conveniente que se requiera de personal altamente especializado para su realización. Estos requerimientos provocan que muchas técnicas deban ser dejadas de lado, pese a ser atractivas desde el punto de vista tecnológico. En general, los distintos investigadores sobre el tema han propuesto ensayos que se basan en la utilización del “Drop Weight Test” con instrumentación, o de distintas variantes del ensayo Charpy.

En el presente trabajo de tesis se propone un método de ensayo que cubre los requerimientos citados, basado en la utilización del ensayo Charpy con probeta prefisurada. A partir de instrumentación mínima, se parte de diagramas carga-tiempo para, en forma totalmente automatizada via PC, obtener todos los parámetros mecánicos y fractomecánicos que caracterizan al material ensayado. Previamente es analizada y

confirmada la aplicabilidad de los parámetros convencionales de la mecánica de fractura elasto-plástica (integral J, curva J-R, separabilidad de variables), aspecto que no ha sido tenido en cuenta por otros investigadores que proponen la utilización de este ensayo. El método propuesto plantea como concepto que todos los parámetros sean obtenidos a partir de un solo ensayo con probeta prefisurada, para lo cual se realizan validaciones utilizando un método multiprobeta alternativo.

2.- Características del ensayo Charpy

2.1.- El ensayo Charpy estándar

El ensayo Charpy fue introducido en 1901 por G. C. Charpy, como un primer intento para caracterizar los materiales al impacto. El método propuesto alcanzó posteriormente alta difusión, ya que permitía ensayar probetas pequeñas bajo condiciones severas simulando fallas estructurales, eliminando la necesidad de realizar ensayos destructivos de componentes reales. Las condiciones elegidas para simular las fallas estructurales fueron la elevada velocidad de carga (impacto), concentración de tensiones, y triaxialidad de carga. Todos estos factores, determinantes en la generación de fracturas del tipo frágil, junto con las ventajas “operativas” del método (bajo costo, simplicidad, tamaño reducido de probetas) fueron responsables del éxito del método, el cual fue y es ampliamente utilizado para la caracterización de materiales. Es particularmente útil para determinar la temperatura de transición dúctil - frágil en aceros ferríticos de baja y media resistencia utilizados en aplicaciones estructurales tales como buques, recipientes de presión, tuberías, puentes, etc. Varios ensayos de probetas entalladas fueron utilizados para predecir la fractura frágil de los aceros ferríticos.

En los Estados Unidos, la norma ASTM E 23⁽²⁾ estandarizó el ensayo Charpy para ensayo de flexión en tres puntos, así como el ensayo Izod (probeta similar, en voladizo). El ensayo Charpy resulta más conveniente para temperaturas de ensayo variables, y ha ganado en aceptabilidad para medir la tenacidad a la entalla. La figura 2-1 muestra la geometría de la probeta Charpy estándar, así como la geometría del golpeador y del soporte⁽²⁾.

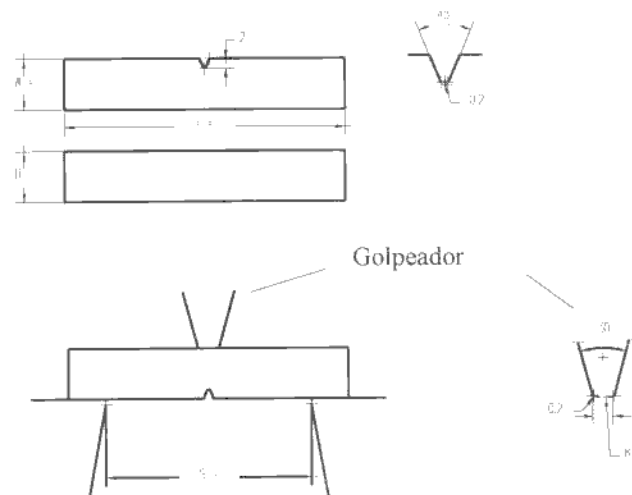


Figura 2-1: Dimensiones standard ASTM E 23

La medida de la tenacidad a la entalla se establece a partir de la energía absorbida para fracturar la probeta. Esta energía se registra habitualmente a través del péndulo de impacto, mediante el cambio de energía potencial (entre antes y después del impacto). Esta es la medida más común obtenida a partir del ensayo Charpy. Otros parámetros relevantes resultan el “porcentaje de área dúctil”, y el grado de ductilidad o deformación, medido a través de la “expansión lateral” de la media probeta luego del ensayo. El porcentaje de área dúctil se obtiene observando la superficie de fractura, calculando la porción de la misma que presenta aspecto de fractura dúctil (coalescencia de microhuecos) y fractura frágil (clivaje) y estableciendo la relación porcentual de ambas (área dúctil ó área frágil / área total x 100). Es común contar con cartillas que presentan gráficamente el aspecto visual que presenta la superficie de fractura para distintos porcentajes de área dúctil, a fin de obtener los mismos por observación directa y comparación.

Como se mencionara previamente, estas medidas resultan muy dependientes de la temperatura, especialmente para aceros ferríticos. La tenacidad y la ductilidad se incrementan con el aumento de la temperatura, aunque la transición dúctil - frágil generalmente no se produce de manera clara y definida. Por tal motivo, es común que se defina la transición como la temperatura necesaria para alcanzar un determinado valor de energía (por ej. 41 J, o 30 ft-lb) o de porcentaje de área dúctil (50 %), o algún nivel de expansión lateral (0.38 mm o 0.015”). La figura 2-2 muestra el cambio en los parámetros del Charpy con la temperatura, para un acero común utilizado en recipientes de presión (fuente *Metals Handbook*⁽³⁾). Nótese que la transición más definida se obtiene a través de la evaluación del porcentaje de área dúctil.

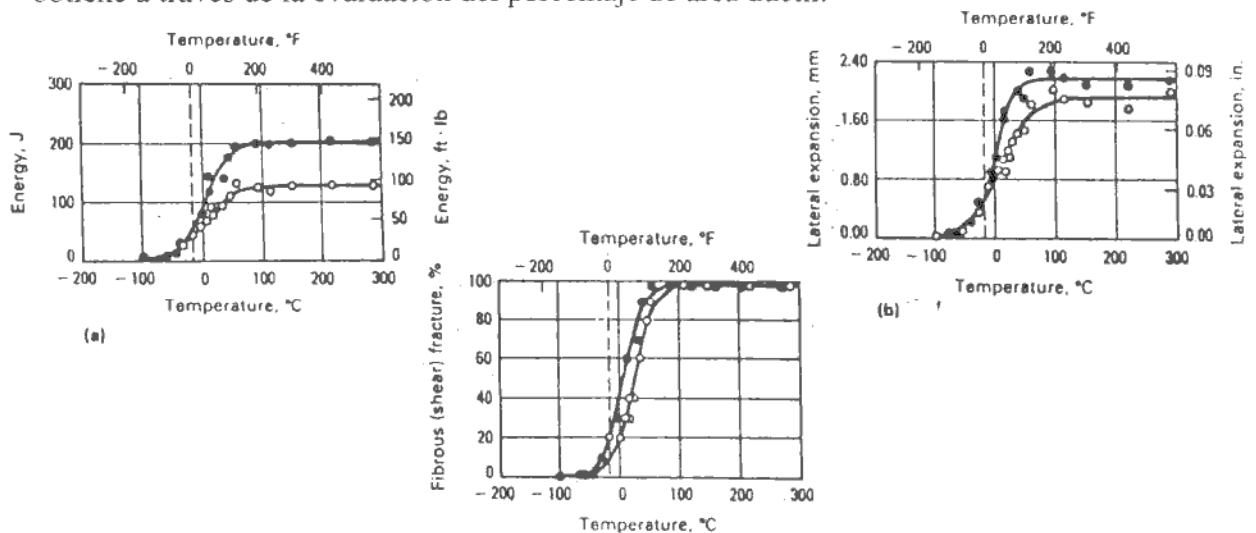


Figura 2-2: *Ensayo Charpy: transición dúctil - frágil*

2.2.- El ensayo Charpy instrumentado

La principal limitación del ensayo Charpy estándar reside en su carácter de ensayo “cualitativo”, en el sentido de que no provee parámetros que puedan ser utilizados cuantitativamente en el diseño, o que sean directamente extrapolables a otras configuraciones de probetas o dimensiones de las mismas. El factor de intensidad de tensiones crítico en condiciones de deformación plana (K_{Ic}) en el vértice de una fisura

aguda sí es un parámetro que puede ser utilizado directamente en aplicaciones de diseño. El mismo relaciona el tamaño de fisura, el campo de tensiones remoto y la geometría de la pieza. Por tal motivo, se han realizado numeros intentos por correlacionar el valor de energía total medido en el ensayo Charpy con probeta standard, con el K_{Ic} del material⁽³⁻⁵⁾. La mayoría de estas correlaciones son dimensionalmente incompatibles, ignoran las diferencias experimentales entre ambas medidas de tenacidad (agudeza de entalla, velocidad de carga) y generalmente son válidas para entornos muy limitados de materiales y datos. Además, pueden presentar una dispersión importante. Pese a estas limitaciones, son en muchos casos muy útiles para proveer estimaciones de la fractotenacidad del material, y muchas normas y estándares hacen uso de las mismas para definir niveles mínimos de energía Charpy a satisfacer.

La adición de instrumentación adicional al péndulo permite obtener el valor instantáneo de carga aplicada durante el impacto, mientras se mantiene el bajo costo, probeta pequeña y simplicidad de operación. La figura 2-3 muestra esquemáticamente el cambio en el comportamiento del ensayo Charpy en función de la temperatura para un acero de media resistencia⁽³⁾. Puede apreciarse que la instrumentación permite discernir las distintas etapas involucradas en el proceso de fractura de la probeta.

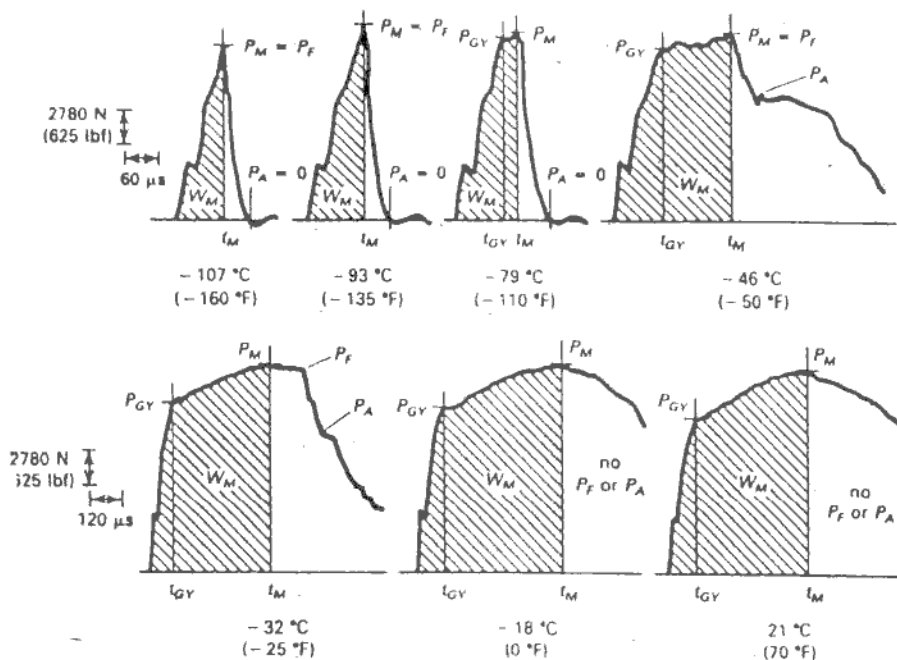


Figura 2-3: Respuesta carga - tiempo de un acero de media resistencia.

El valor de energía W_m está asociado con el área bajo la curva P vs t hasta el punto de carga máxima, P_m . Este valor de impulso es convertido en energía utilizando la segunda ley de Newton, considerando la reducción de velocidad que se produce en el péndulo durante el proceso de deformación y fractura. Esta reducción de velocidad es proporcional a la carga instantánea P que actúa sobre la probeta en cualquier instante de tiempo; la energía real absorbida estará dada por⁽³⁾:

$$\Delta E = E_a [1 - (E_a / 4E_o)]$$

2-1

donde E_0 es la energía cinética total disponible del péndulo ($1/2 m V_0^2$), y

$$E_a = V_0 \int P \cdot dt$$

2-2

donde V_0 es la velocidad inicial de impacto y m es la masa efectiva del péndulo. La posibilidad de separar la energía total absorbida en componentes incrementa notablemente la información provista por la instrumentación. La información de carga obtenida a partir de un ensayo Charpy V-Notch instrumentado permite establecer relaciones entre parámetros metalúrgicos de fractura y la temperatura de transición. Los estudios iniciales se concentraron en el rango total del comportamiento mecánico, desde el comportamiento totalmente elástico en la zona de baja energía Charpy (lower shelf), hasta el comportamiento elasto-plástico en la zona de transición y el comportamiento totalmente plástico en la zona de alta energía (upper shelf) (figura 2-3).

La instrumentación típica consiste en un golpeador instrumentado (generalmente con strain-gages de tipo semiconductor), un amplificador de señal de alta respuesta en frecuencia, un registrador-almacenador (osciloscopio digital) o interface A-D, una PC para el tratamiento de los datos, y algún tipo de dispositivo para la medición de velocidad y/o disparo del sistema de adquisición. El golpeador instrumentado no es más que una celda de carga dinámica, que registra la carga de compresión que actúa sobre el golpeador (tup) mientras está en contacto con la probeta. Esta es la instrumentación típica, aunque pueden presentarse variantes de acuerdo a los requerimientos particulares de cada caso. Por ejemplo, en el caso del ensayo de materiales frágiles, la incorporación de strain-gages a la probeta misma aparece como una opción conveniente, dados los reducidos tiempos del evento de impacto.

2.3.- Requerimientos globales del ensayo Charpy instrumentado

A comienzos de los 70's aparecen las primeras máquinas de impacto provistas con instrumentación, lo cual lleva a que se realicen distintos estudios con el objetivo de analizar los aspectos característicos relacionados este tipo de ensayo, a la vez de asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos. En esta etapa se destacan los trabajos realizados por D. R. Ireland ⁽⁶⁻⁸⁾, quien trabajando para la firma *Effects Technology* (fabricante de péndulos instrumentados comerciales) establece una serie de criterios, que son adoptados por el Electric Power Research Institute (EPRI)⁽⁶⁾.

La señal de carga obtenida de un golpeador instrumentado está sujeta a la acción de efectos de origen dinámico que "enmascaran" la carga real absorbida por la probeta para deformarse y fracturarse. Por lo tanto, el procedimiento de análisis de señal debe minimizar esta desviación. La figura 2-4 muestra en forma esquemática una curva típica obtenida a partir de un ensayo de impacto instrumentado de probeta Charpy. A simple vista se distinguen tres áreas donde las especificaciones del ensayo deben ser identificadas: carga inercial, limitada respuesta en frecuencia y filtrado de la curva.

Carga inercial: En el instante inicial, cuando el golpeador impacta la probeta, la señal recibida por el transductor está determinada por la respuesta inercial del sistema probeta-soporte, quedando “oculta” la respuesta real carga - deformación de la probeta. Esta situación se mantendrá mientras las ondas de presión que se transmiten desde el punto de impacto no lleguen a los soportes o apoyos de la probeta. Por lo tanto, el período de tiempo en el cual la respuesta del sistema estará condicionado por factores dinámicos

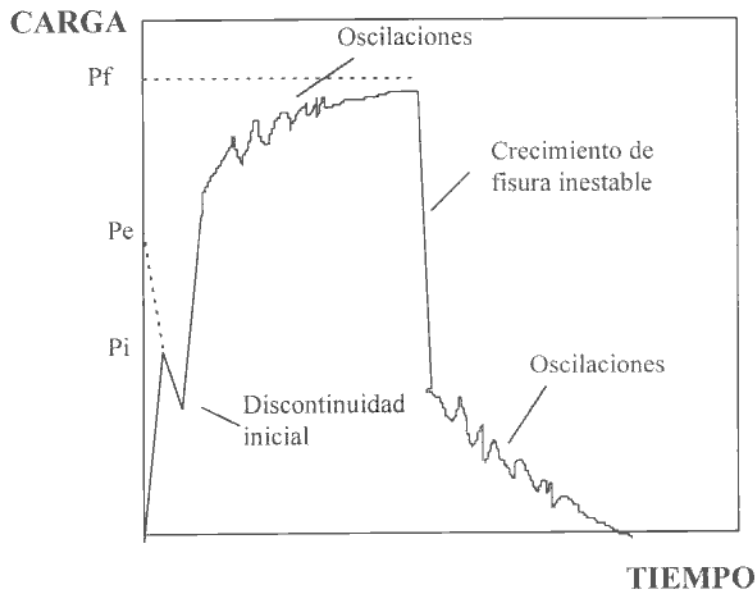


Figura 2-4: Diagrama típico carga-tiempo

dependerá de la velocidad de propagación de las ondas de presión en la probeta (es decir, la velocidad del sonido), y de las dimensiones de la misma. El período de oscilación de origen inercial, para una probeta de relación W/S (figura 2-1) igual a 1/4, está dado por la siguiente aproximación empírica ⁽⁷⁾ :

$$\tau = 3.36 (W/S_0)(E B C_s)^{1/2} \quad 2-3$$

donde W es el ancho de la probeta, B es el espesor, Cs es la compliancia (inversa de la rigidez) de la misma, E es el módulo de Young y So es la velocidad del sonido en la probeta. Para una probeta de acero de dimensiones Charpy standard, τ es aproximadamente 30 μ s. De acuerdo a la experiencia, se requiere aproximadamente un período de tiempo entre 2τ y 3τ para que la oscilación sea disipada. A partir de estas consideraciones se determina una especificación empírica para obtener una evaluación confiable de carga o tiempo de fractura dada por:

$$t \geq 3\tau \quad 2-4$$

El control de t podrá realizarse a través de la selección de una velocidad de impacto V_0 adecuada. El valor de “3” está determinado para el caso de respuesta en frecuencia ilimitada. El procedimiento original del EPRI establece un factor de 2.3, el cual podrá ser adoptado si se utiliza un filtrado selectivo para ajustar la curva.

Respuesta en frecuencia: La respuesta en frecuencia real e idealizada de cualquier componente mecánico o electrónico es ilustrada en la figura 2-5. Para el caso idealizado, F_r representa la mayor frecuencia a la cual la señal puede pasar sin ser totalmente atenuada. En el caso real, F_r es la frecuencia indicada por fabricantes y técnicos, que corresponde a una atenuación específica desde A hasta A_R . El valor utilizado más comunmente corresponde a una atenuación de 3 db.

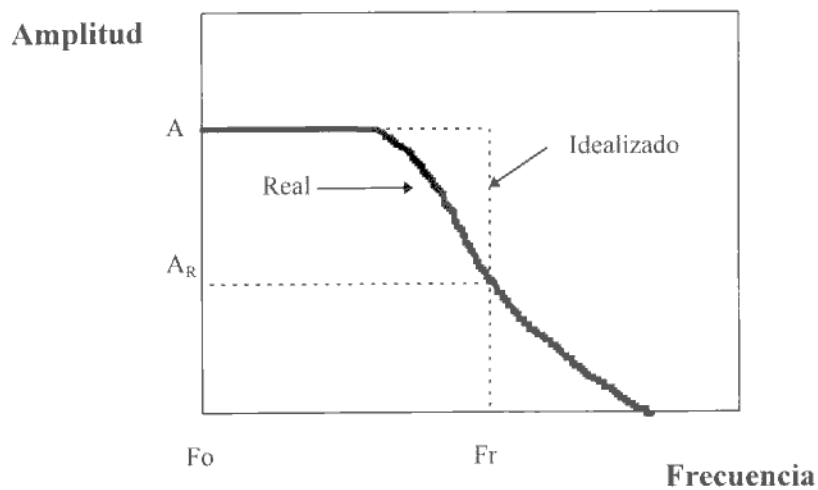


Figura 2-5: Representación esquemática de la respuesta en frecuencia ideal y real

El decibel (dB) está definido por:

$$\text{dB} = 20 \log_{10} (\text{volts}_{\text{in}} / \text{volts}_{\text{out}}) \quad 2-5$$

Los 3 dB de atenuación corresponden a una frecuencia para la cual

$$\text{volts}_{\text{out}} \cong 0.7 \text{ volts}_{\text{in}} \quad 2-6$$

En general, para el ensayo de impacto instrumentado asegurar un 10 % o menos de reducción de señal puede considerarse suficiente. De acuerdo a la expresión anterior, esto corresponderá aproximadamente a una atenuación de 0.915 dB.

Frecuentemente el comportamiento de un componente electrónico se expresa a través del tiempo requerido para que una señal se incremente del 10 al 90 % de la amplitud

total (rise time), en lugar de utilizar la respuesta en frecuencia. La relación entre la frecuencia de la señal f y el rise time t_r para una onda sinusoidal es:

$$t_r \cong \frac{0.35}{f} \quad 2-7$$

Para otras formas de ondas, la constante 0.35 puede variar entre 0.34 y 0.39. La forma general de la señal de carga del ensayo Charpy puede asimilarse a la de una onda sinusoidal. Si consideramos una atenuación de señal máxima del 10 %, el tiempo de respuesta T_R de la instrumentación puede establecerse como:

$$T_R = \frac{0.35}{f_{0.915}} \quad 2-8$$

donde $f_{0.915}$ es la frecuencia correspondiente a una atenuación de señal del 10 %. Por lo tanto, el problema potencial de limitada respuesta en frecuencia puede evitarse si se especifica que "t" (tiempo a fractura para fractura elástica, tiempo a fluencia para fractura elasto-plástica) cumpla con la condición:

$$t \geq 1.1 T_R \quad 2-9$$

donde T_R es el definido en la ecuación 2-8.

Filtrado de la curva: el filtrado de las oscilaciones de la curva puede obtenerse a través de la especificación de un T_R mínimo. La amplitud de las oscilaciones es entonces reducida de manera tal que la disparidad entre la carga de contacto del golpeador y la carga de deformación efectiva es mínima. Empíricamente se ha determinado⁽⁸⁾ que para circuitos resistivos - capacitivos la condición

$$T_R \geq 1.4 \tau \quad 2-10$$

es suficiente para realizar un filtrado electrónico sin alterar la curva total.

Actualmente, la incorporación de técnicas digitales permite, por otra parte, realizar filtrados por "software" de la curva, luego que la misma ha sido obtenida y adquirida por la instrumentación disponible. De esta manera se elimina el riesgo de excesivo filtrado que pueda afectar la representación real de la respuesta de la probeta. Esta metodología fue la adoptada en el presente trabajo.

Energía mínima: los requerimientos establecidos para lograr registros carga-tiempo aceptables generan como consecuencia la necesidad de controlar la velocidad de impacto V_0 . Al controlar la velocidad, es inherente controlar la energía de impacto E_0 . La reducción de la velocidad de impacto durante el ensayo debe ser entonces minimizada. Un criterio conservativo es⁽⁸⁾:

$$E_0 \geq 3 W_m \quad 2-11$$

donde W_m es la energía del sistema disipada al punto de carga máxima P_m (figura 2-3). Este requerimiento asegura que la velocidad de impacto no es reducida más del 20 % al valor de carga máxima. Este requerimiento, sin embargo, es difícilmente cumplible con probetas Charpy prefisuradas de materiales de muy alta tenacidad.

2.4.- Ensayo Charpy con probeta prefisurada

Mediante la introducción de una prefisura generada por fatiga en una probeta Charpy, las limitaciones en la utilización cuantitativa de los resultados obtenidos del ensayo Charpy a causa de la falta de agudeza de la entalla y de profundidad de la misma son en gran parte resueltas. De esta manera la probeta Charpy se convierte en una probeta del tipo fractomecánico dinámico. Ahora es posible, dentro de ciertas limitaciones, el cálculo de la tenacidad a la fractura a partir de la información que provee la instrumentación.

Tenacidad a la fractura lineal elástica: cuando la fractura es elástica (la misma ocurre antes de alcanzarse la condición de fluencia generalizada), el factor de intensidad de tensiones K_{IC} puede ser calculado aplicando la mecánica de fractura lineal elástica (LEFM)⁽⁹⁾:

$$K_{IC} = \frac{[4P_M]}{[BW^{1/2}]} \frac{3(a/W)^{1/2} [1.99 - (a/W)(1-a/W)(2.15 - 3.93(a/W) + 2.7(a/W)^2)]}{2(1-2a/W)(1-a/W)^{3/2}} \quad 2-12$$

donde P_M es la carga máxima alcanzada, a corresponde a la longitud de fisura, W es el ancho de la probeta y B es el espesor de la misma. El requerimiento de tamaño de ASTM⁽⁹⁾ para obtener un K_{IC} válido es muy limitante, incluso si se utiliza el valor de resistencia a fluencia dinámico. Sin embargo, el criterio de aceptabilidad de ASTM puede ser muy conservativo, por lo que si no se ha producido fluencia generalizada, generalmente se acepta el cálculo de un valor de K_{IC} . La tasa de intensificación de tensiones K es calculada como:

$$K = K_{IC} / t_M \quad 2-13$$

donde t_M es el tiempo requerido hasta alcanzar la carga máxima. El menor K para la probeta Charpy prefisurada bajo carga de impacto es del orden de $11 \times 10^4 \text{ Mpa}\sqrt{\text{m}} \cdot \text{s}^{-1}$.

Las curvas de respuesta al impacto: La información carga - tiempo o carga - desplazamiento obtenida a partir del ensayo Charpy con probeta prefisurada puede ser de difícil interpretación, particularmente para tiempos muy reducidos (primera etapa de la curva), y para materiales frágiles. Por otra parte, la utilización de procedimientos de evaluación extraídos de formulaciones para el caso cuasi-estático restringe la aplicabilidad de esta metodología. Estas dificultades y restricciones son salvadas a través de la aplicación del concepto de curvas de respuesta al impacto^(3,10,11,32).

La curva de respuesta al impacto relaciona cuantitativamente la respuesta de la probeta con el evento de impacto, dependiendo esta respuesta solamente de la reacción elástica del sistema probeta - golpeador. Este método se basa en el concepto de que la variación en el tiempo del factor de intensidad de tensiones dinámico K_I^{dyn} es el mismo bajo idénticas condiciones de impacto. Es decir, si la curva de respuesta al impacto es determinada previamente para varias condiciones, la tenacidad a la fractura dinámica puede ser obtenida a través de la medición del tiempo a fractura (t_f). Las curvas de respuesta al impacto pueden ser medidas o calculadas. Uno de los métodos experimentales más utilizados consiste en la instrumentación de la probeta con un strain-gage cercano al vértice de la fisura. Previamente, se realiza una calibración de la señal del mismo en términos del factor de intensidad de tensiones. La figura 2-6 muestra curvas de respuesta al impacto para probetas Charpy de acero, con una longitud de fisura inicial de 5 mm, para distintas velocidades de impacto⁽³⁾. Estos datos fueron obtenidos con un péndulo de impacto de 300 J de capacidad. Las curvas para diferentes velocidades de impacto son similares. El factor de intensidad de tensiones K_I^{dyn} depende linealmente de la velocidad de impacto V_0 y es independiente de la masa del péndulo m_0 . La figura 2-7 muestra la utilización de las curvas de respuesta al impacto. Mediante la determinación del tiempo a fractura, a través de la curva de impacto para la velocidad de impacto seleccionada se obtiene directamente el valor del factor de intensidad de tensiones dinámico K_I^{dyn} .

El tiempo a fractura t_f se puede determinar de distintas maneras. Una de las más usuales consiste en la utilización de la señal proveniente de dos strain gages, uno situado sobre la probeta, cerca del vértice de la fisura, y otro en el golpeador. Otro procedimiento consiste en registrar la señal magnética que se produce cuando la fisura se dispara, en una probeta que fue previamente levemente magnetizada. La señal es recogida con un pickup magnético, similar al utilizado en los clásicos tocadiscos⁽³⁾.

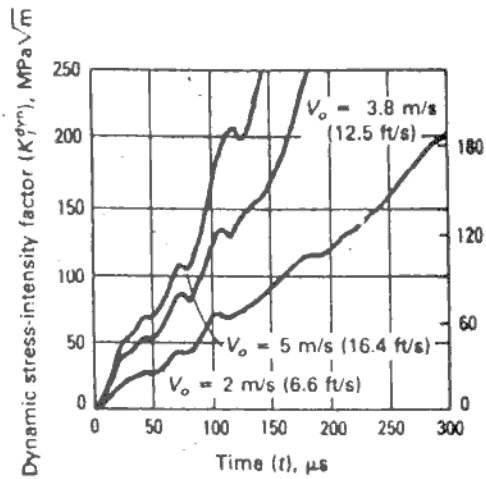


Figura 2-6

Dynamic stress-intensity factor (K_i^{dyn}), ksi \sqrt{in} .

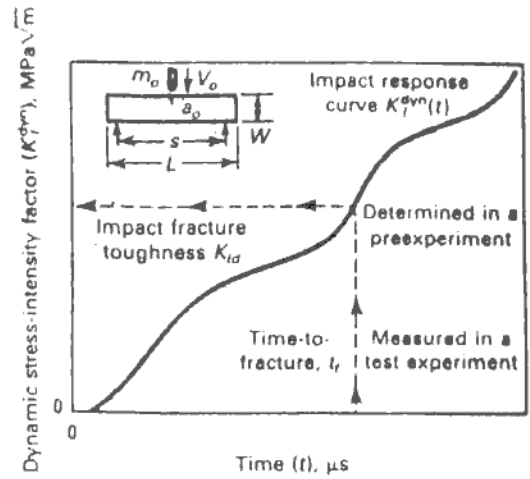


Figura 2-7

El procedimiento descrito, basado en la utilización de curvas de respuesta al impacto, es particularmente útil para el análisis de materiales frágiles, como aceros de alta resistencia o en el "lower shelf". T. Kobayashi y sus colaboradores^(10,11), han aplicado con éxito esta metodología en el análisis de las propiedades a fractura de los materiales cerámicos. Debe tenerse en cuenta que este ensayo, una vez determinadas las curvas de respuesta, sólo requiere de la determinación del tiempo a fractura para determinar el valor del K_i^{dyn} . El requisito de $t_f \geq 3\tau$ no es aplicable en este tipo de ensayos. Esto se debe al hecho de que la información de Carga no es utilizada, ya que el tiempo al impacto es el único parámetro necesario (junto con la velocidad de impacto y geometría) para ingresar a la curva o expresión de la respuesta al impacto de donde se obtienen el valor correspondiente del K_{ID} .

3.- Aplicación de la Mecánica de fractura elasto-plástica al ensayo de impacto Charpy (marco teórico)

La validez de los resultados de la mecánica de fractura lineal elástica tiene como requisito que se satisfaga la condición de fluencia en pequeña escala. Es decir, que las dimensiones de la zona plástica asociada al vértice de la fisura sean mucho más pequeñas que las dimensiones características de la pieza. Esto implica que en los materiales tenaces, la obtención de resultados válidos exige la utilización de probetas de grandes dimensiones, que generalmente no representan el comportamiento de las estructuras reales en servicio. Esto limitaría, por otra parte, la utilización de la probeta Charpy para obtener parámetros fractomecánicos válidos. Para extender el análisis al rango elasto-plástico, se introdujeron dos parámetros: el COD y la integral J. El primero de ellos se basa en la medición, durante el evento de fractura, de la apertura de la boca de la fisura en conjunto con la carga aplicada. Este método (muy difundido en análisis de soldaduras, normalizado para el caso quasi-estático), no lo consideramos en principio aplicable al caso de impacto, por las dificultades prácticas inherentes. No obstante, algunos investigadores han realizado experiencias con este método^(12,13,45,46), con resultados diversos.

3.1.- La integral J

La integral "J" constituye el parámetro más apropiado para utilizar en el tipo de ensayo bajo análisis. La misma requiere de la información Carga - Desplazamiento del punto de aplicación de la carga, información que puede ser obtenible en el ensayo de impacto.

La integral J fue propuesta originalmente por Rice^(14,15) a fines de los 60. La misma constituye una herramienta matemática que permite evaluar el campo de deformaciones en el vértice de una fisura en la región elasto-plástica. La expresión (3-1) corresponde a la definición de la integral J de acuerdo a Rice:

$$J = \int_C \left(W dy - t \frac{\partial u}{\partial x} ds \right) \quad 3-1$$

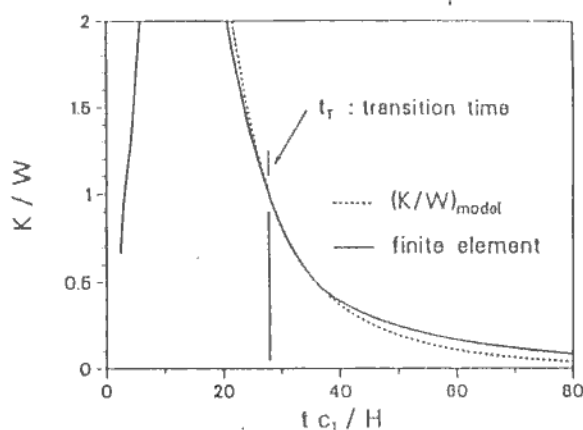
donde W es la densidad de energía elástica, dada por

$$W = W(x, y) = \int_0^{\epsilon} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij} \quad 3-2$$

C es una curva que rodea el vértice de la fisura en sentido antihorario, t es el vector tracción definido según la normal exterior a la curva C, u es el vector desplazamiento, y ds es un elemento de arco a lo largo de C.

Es posible demostrar que el valor de la integral (3-1) no depende del camino de integración seleccionado. De esta manera, el parámetro J caracteriza el campo de deformaciones en el vértice de una fisura.

En el caso en que la carga sea aplicada rápidamente o en forma impactual, existen términos de energía cinética que no son contemplados en la formulación original de la integral J . Por tal motivo, la utilización de la misma en su formulación original está supeditada al hecho de que el término de energía cinética sea de magnitud despreciable respecto al componente de energía potencial elástica. Este problema fue analizado en sumo detalle por Nakamura et al ⁽¹⁶⁾, quienes a través de análisis analítico (modelado numérico por el método de los elementos finitos) determinaron que el tiempo a fractura debe superar un cierto valor t_T , llamado tiempo de transición, para que pueda ser aplicada la integral J en su formulación original (figura 3-1). Este tiempo de transición asegura que la componente energética por aspectos cinéticos es muy reducida respecto a la componente de energía por deformación. Para la probeta Charpy de dimensiones estándar, este tiempo resulta del orden de los 10 a 30 μs .



C_1 : velocidad de onda
 H : espesor de probeta

Figura 3-1: Tiempo de transición de acuerdo a Nakamura et al(Ref.16).

En un material elastoplástico, el tiempo de fractura en un ensayo Charpy con velocidades de impacto del orden de 1 a 3 m/s, está en el rango de cientos de μs , con lo cual se verifica que la integral J es totalmente aplicable en su formulación original.

3.2.- Tenacidad a la fractura elasto-plástica dinámica, J_{IC} , curva J-R

A partir de la interpretación física de la integral J , es posible arribar a una formulación alternativa de dicha integral⁽¹⁷⁻¹⁸⁾:

$$J = -\frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad 3-3$$

donde **B** es el espesor del material, **U** la energía potencial elástica y **a** corresponde a la longitud de fisura. En esta formulación se basa el método desarrollado por Begley y Landes para determinar el valor de **J** en función del desplazamiento del punto de aplicación de la carga. Este método resultó poco práctico, pues además de requerir el ensayo de varias probetas, no permite “per se” la determinación del **J** correspondiente al evento crítico (primera extensión de fractura). Sólo resulta fácilmente identificable el valor de **J** correspondiente al evento crítico cuando se produce la inestabilidad sin crecimiento estable previo, lo cual no constituye lo general en materiales elastoplásticos. A través de un análisis realizado por Rice, Paris y Merkle⁽¹⁹⁾, se demuestra que para profundidades de fisura tal que la plasticidad queda confinada al ligamento remanente, la expresión (3-3) se puede transformar en:

$$J = \frac{2}{bB} \int P d\delta \quad 3-4$$

La expresión (3-4) es la base de los métodos desarrollados posteriormente para la determinación del J_{IC} del material.

3.2.1.- Método multiprobeta

El método propuesto por Landes y Begley consiste en el ensayo de varias probetas (cuatro a seis), de idéntica configuración geométrica y con fisuras suficientemente profundas para poder aplicar el análisis de Rice, Paris y Merkle. Cada una de las probetas se carga hasta un cierto desplazamiento elegido adecuadamente. Para cada probeta este desplazamiento es diferente, de manera que con las probetas ensayadas se cubre el rango de desplazamientos dentro del cual se logra la rotura total de la probeta. Una vez que la probeta es cargada hasta el desplazamiento estipulado y se la descarga, se la somete aun teñido térmico (heat tinting), a unos 300 °C durante 10 / 15 minutos. Luego de este proceso, se carga nuevamente hasta la rotura, para proceder al examen de la superficie de fractura. De esta manera se pone de manifiesto la magnitud de la extensión dúctil estable.

El examen de la superficie de fractura permite determinar que en la zona de extensión estable existen en realidad dos partes diferenciadas. Una de ellas, adyacente al vértice de la fisura, no está asociada con la extensión real de la misma, sino con la deformación plástica que se produce en el vértice por la aplicación de la carga. la otra parte constituye la extensión propiamente dicha, con separación del material. Una expresión analítica para el valor de **J** aplicado en función del incremento de longitud de fisura producido por deformación del vértice es la dada en la norma AST E-813⁽¹⁾:

$$J_I = 2 \sigma_y \Delta a \quad 3-5$$

donde Δa representa la magnitud de la “zona stretch” y es igual al avance que experimenta por deformación el vértice de la fisura cuando es cargado. La expresión (3-5) define la ecuación de una recta, denominada comúnmente “blunting line”. La misma no es la única aproximación propuesta, existen otros modelos que describiremos en el punto 3.6.

En el criterio de Begley y Landes, se adopta como valor crítico de J_{IC} el correspondiente al inicio del crecimiento estable de la fisura. El procedimiento propuesto originalmente para obtener dicho punto consiste en trazar la curva J vs Δa a partir de los datos obtenidos de las probetas ensayadas hasta distintos valores de deformación y encontrar su intersección con la “blunting line”. La figura 3-2 muestra de manera esquemática el procedimiento descrito.

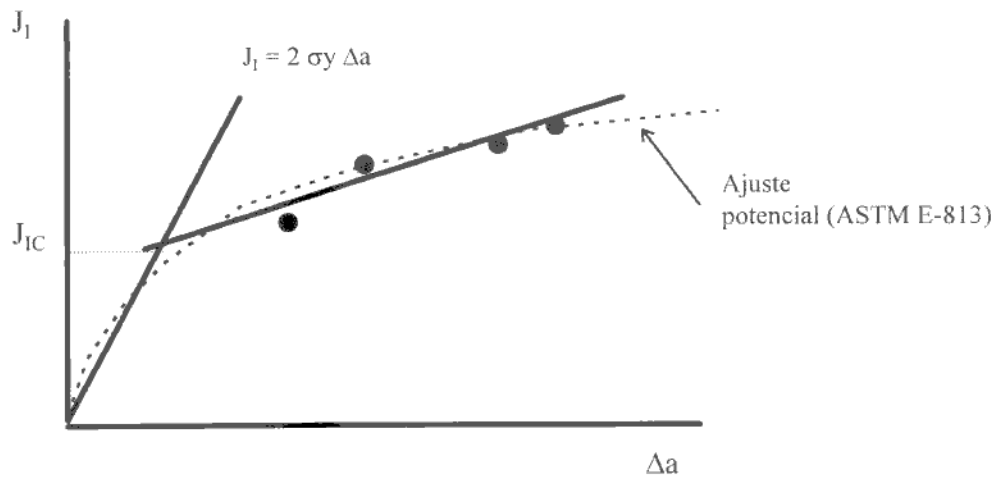


Figura 3-2: Obtención de J_{IC} por método multiprobeta

El método planteado permite la determinación del valor crítico de J a partir del cual se produce el crecimiento estable de la fisura. En la versión del 87 de la norma ASTM E-83, se adopta un ajuste potencial para describir el comportamiento de la curva J - R , estableciéndose el procedimiento para determinar el J_{IC} . Es necesario aclarar que para que el valor de J obtenido sea considerado válido, es necesario que las características de las probetas utilizadas (espesor B y ligamento remanente b) satisfagan la condición:

$$B, b \geq \alpha J_{IC} / \sigma_y \quad 3-6$$

donde α es un parámetro cuyo valor puede ser convalidado por la experiencia, y que puede tomar un valor aproximadamente igual a 50. De acuerdo a la norma ASTM E-813⁽¹⁾, por ejemplo, el valor de α se ubica en 25.

3.2.2.- Método de la “key curve”

El método de la “key curve” fue presentado originalmente por Ernst y colaboradores^(20,21), mostrando a través de un análisis dimensional que para geometrías simples, en las cuales la plasticidad está confinada en el ligamento remanente, la relación carga - desplazamiento tiene la forma:

$$\frac{PW}{Bb^2} = f(a/W; \Delta/W; L/W; B/W; prop.mat.) \quad 3-7$$

donde P = carga aplicada

Δ = desplazamiento total del punto de aplicación de la carga

a = longitud de fisura

b = ligamento remanente

B = espesor de probeta

W = a + b = ancho de probeta

L = largo de probeta o distancia entre apoyos.

Basándose en la asunción de que la carga P es independiente de la historia del crecimiento de la fisura, es posible realizar la separación de variables **a** y Δ para P utilizando la siguiente relación:

$$\frac{P}{BW(b/W)^2} = H(\Delta/W)g(a/W) \quad 3-8$$

La función g (a/W) está dada por:

$$g(a/W) = \exp(-\alpha b/W) \quad 3-9$$

con

$\alpha = 0$ (flexión en tres puntos)

$\alpha = -0.522$ (probeta compacta)

La extensión de fisura incremental es entonces calculada de acuerdo a la expresión:

$$da = \frac{b}{\eta} \left[\frac{H'}{H} \frac{1}{W} - \frac{1}{P} \frac{dP}{d\Delta} \right] \quad 3-10$$

con

$$H' = \partial H / \partial (\Delta / W)$$

$$\eta = 2 - \alpha b / W$$

En las ecuaciones (3-8) y (3-10), la función de calibración $H (\Delta/W)$ representa el comportamiento carga - desplazamiento de probetas con diferentes (pero estables) longitudes de fisura. Básicamente, puede ser obtenida a partir de un ensayo $P - \Delta$. En el caso de utilizarse el procedimiento experimental, es necesario mantener la longitud de fisura constante durante la carga. Por lo tanto, solamente se puede utilizar la primer parte de la misma, previo a que se produzca el inicio del crecimiento de la fisura, es decir, no resulta posible utilizar la información hasta deformaciones elevadas. Una forma de prolongar la deformación al punto de iniciación es a través del uso de probetas con dimensiones reducidas (sub-size) o con entallas redondeadas (blunt notches). En el caso de probetas sub-size, el resultado puede verse afectado debido a que es más difícil lograr frentes de fisura por fatiga rectos, además de ser más susceptible a inhomogeneidades del material que provocarían menor confiabilidad estadística. En el caso de las probetas "blunt notch", el mayor radio de la entalla puede influenciar la relación carga - desplazamiento, sobre todo en probetas de tamaño reducido como la probeta Charpy. Por estas razones, se han utilizado métodos numéricos para la determinación de las curvas de calibración, pero existen dificultades (o es muy caro) para modelar adecuadamente el proceso en la zona de comportamiento elasto-plástico, que exige una reproducción muy precisa del comportamiento real del material.

Todos estos inconvenientes han llevado a que distintos investigadores optaran por buscar alternativas para generar las "curvas de calibración". Kobayashi et al⁽¹¹⁾ utiliza la primer parte de la curva para generarlas, pero debe recurrir a algún método alternativo para determinar la ubicación del punto de iniciación; Herrera y Landes^(22,23,24) propusieron el "método de normalización" para determinar una curva de calibración propia para cada probeta ensayada, el cual requiere de la determinación precisa (P , v , a) de otro punto sobre la curva (en este caso del punto final del ensayo); recientemente, X.C. Yin⁽²⁵⁾ propone un método iterativo basado en la "key curve" para determinar la curva J-R. Al igual que Kobayashi, éste también requiere de la determinación por otra vía del punto de iniciación de la fisura.

3.3.- Factor η plástico

A partir del análisis de Ernst y colaboradores⁽²⁰⁾, es posible asumir que la carga absorbida por la probeta puede representarse como el producto de dos funciones separadas: una que depende de la geometría de fisura y otra que depende de la deformación del material. Esta forma separable llevó a la definición de J a partir de un factor (llamado posteriormente η) que multiplica al área bajo la curva carga -

desplazamiento por unidad de área del ligamento sin fisurar. De esta manera, J puede ser evaluado a partir del ensayo de una probeta, si este factor η es conocido para la configuración de probeta bajo análisis.

Recientemente, Sharobeam y Landes⁽²⁶⁾ analizaron registros carga - desplazamiento de probetas ensayadas previamente de diferentes geometrías y materiales. Demostraron de manera experimental la separabilidad de variables en la región plástica bajo condiciones cuasi - estáticas.

Si bien la probeta Charpy corresponde a una configuración de flexión en tres puntos, para la cual el valor de η está determinado teóricamente y corresponde a $\eta = 2$, existen dos aspectos básicos a considerar que tornan cuestionable tomar directamente este valor sin realizar una validación experimental del mismo. En primer término, la condición dinámica del ensayo puede afectar el comportamiento del material, limitando la separabilidad de variables. En segundo término, resulta importante determinar el rango de profundidades de fisura en las cuales se mantiene esta separabilidad de variables, ya que condiciona el valor de Δa hasta el cual es posible obtener un valor de J válido. Por estas razones, se considera necesario la validación experimental del valor $\eta = 2$ y la verificación del mismo en un rango de a/W razonable, para la probeta Charpy estándar.

El método propuesto por Sharobeam y Landes⁽²⁶⁾ para la determinación experimental del η_{pl} utiliza el principio de normalización. El mismo expresa que la carga puede ser expresada como el producto de dos funciones: una función de la longitud de fisura y la otra del desplazamiento plástico:

$$P = G(a/W) H(v_{pl}/W) \quad 3-11$$

donde:

P = carga aplicada
 v_{pl} = componente plástico del desplazamiento
 W = ancho de la probeta

Si la carga es separable, la relación $S_{ij} = P(a_i) / P(a_j)$, correspondiente a dos probetas idénticas con diferentes longitudes de fisura estacionarias a_i y a_j , respectivamente, debe permanecer constante cuando las cargas son determinadas para idénticos desplazamientos plásticos. La figura 3-3 ilustra este principio.

Matemáticamente, este principio puede ser expresado como:

$$S_{ij} = \frac{P(a_i)}{P(a_j)} \Big|_{v_{pl}} = \frac{G(a_i/W)H(v_{pl}/W)}{G(a_j/W)H(v_{pl}/W)} \Big|_{v_{pl}} \quad 3-12$$

$$S_{ij} = \frac{G(a_i / W)}{G(a_j / W)}$$

$$S_{ij} = C = \text{const.}$$

3-13

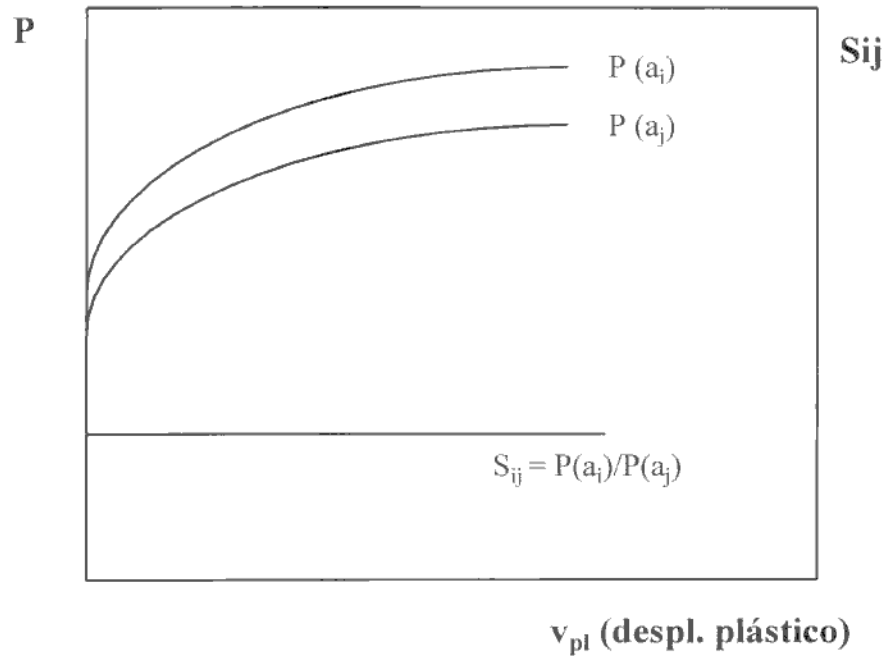


Figura 3-3: Separabilidad de carga en la región plástica

La existencia de η permite la determinación de J como una función directa del trabajo aplicado a la probeta,

$$J = \frac{\eta}{Bb} \int P dv$$

3-14

Combinando esta expresión con la (3-3),

$$J = -\frac{1}{B} \frac{dU}{da}$$

se obtiene

$$\eta = b \frac{-dU}{da} / \left(\int P dv \right)$$

3-15

En el caso de la determinación del η_{pl} en lugar del η , se debe incluir solamente el área plástica bajo la curva, y v debe ser reemplazado por v_{pl} . Sustituyendo la ecuación (3-11) en la (3-15), se obtiene:

$$\eta_{pl} = -\frac{G'(a/W)}{G(a/W)}(b/W) \quad 3-16$$

donde

$$G'(a/W) = \frac{dG(a/W)}{d(a/W)} = -\frac{dG(b/W)}{d(b/W)} \quad 3-17$$

El método de cálculo propuesto por Sharobeam y Landes se basa en la relación proporcional que existe entre el parámetro de separación, S_{ij} , y la función dependiente de la geometría, $G(a_i/W)$;

$$S_{ij} = A \cdot G(a_i/W) \quad 3-18$$

donde A es una constante.

Sharobeam y Landes⁽²⁶⁾ demostraron que, bajo condiciones cuasi-estáticas, los pares S_{ij} - b_i/W se ajustan adecuadamente a través de una ley potencial (power law). Por lo tanto, la función de la geometría se convierte en una función potencial y puede ser representada por:

$$G(b/W) = C(b/W)^m \quad 3-19$$

donde C es una constante.

Por lo tanto, de la ecuación (7) obtenemos

$$\eta_{pl} = m \quad 3-20$$

De esta manera, representando los pares experimentales S_{ij} vs b_i/W y ajustando una función potencial, es posible obtener el valor del η_{pl} .

3.4. Método de normalización

El método de “normalización” fue propuesto por R. Herrera y J.D. Landes^(22,23,24). El mismo se basa en el análisis del método de la “key curve”, pero no se asume la existencia de una única curva de calibración universal. En su lugar, se determinan curvas de calibración individuales para cada probeta. Para ello, se debe asumir la existencia de una forma funcional para la curva de calibración. Como primer aproximación, se propone una curva de calibración que presenta una forma funcional descrita por una “power law”:

$$\frac{V_{pl}}{W} = \beta \cdot P_N^n \quad 3-21$$

$$P_N = \frac{PW}{Bb^2 g\left(\frac{b}{W}\right)} \quad 3-22$$

donde β es un coeficiente que depende del material y n es el exponente (que corresponde al ajuste de Ramberg-Osgood).

La determinación experimental de ambas constantes requiere de la determinación de dos puntos donde las variables que interactúan (la carga \mathbf{P} , el desplazamiento \mathbf{v} y la longitud de fisura \mathbf{a}) resulten conocidos. Los puntos sugeridos son el punto inicial, donde a_0 es conocido, y el punto final, donde \mathbf{P} y \mathbf{v} pueden ser unívocamente determinados y la longitud de fisura final a_f se puede medir luego de realizado el ensayo.

Separando las componentes elástica y plástica del desplazamiento⁽²³⁾, es posible arribar a una expresión del desplazamiento instantáneo v_i dado por:

$$v_i = P_i \cdot Cs(a_i / W) + W\beta \cdot \left[\frac{PW}{Bb_i^2 g(b_i / W)} \right]^n \quad 3-23$$

donde $Cs(a_i/W)$ es la compliancia de la probeta, b_i es el ligamento remanente instantáneo y $g(b_i/W)$ una función de la geometría de fisura que depende del tipo de probeta.

El valor instantáneo de a_i puede ser determinado a partir de la expresión (3-23), aunque no directamente pues la compliancia $Cs(a_i/W)$ está generalmente expresada en forma polinomial. Por lo tanto, a_i debe ser determinada en forma iterativa.

Una vez que se determina el valor de a_i , el valor de J puede ser calculado a partir de P_i , v_i y a_i , utilizando la aproximación dada por Ernst et al y utilizada en el método standard para la determinación de curvas J-R⁽²⁷⁾:

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad 3-24$$

$$J_{pl}(i) = \left[J_{pl}(i-1) + \frac{\eta_i}{b_i} \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_N} \right] \cdot \left[1 - \gamma_i \frac{(a_i - a_{i-1})}{b_i} \right] \quad 3-25$$

donde $\eta_i = \eta = 2$

$\gamma_i = \gamma = 1$, y

$$A_{pl(i)} = A_{pl(i-1)} + (P_i + P_{i-1})(v_{pl(i)} - v_{pl(i-1)})/2$$

Más simplemente, J puede ser determinado directamente a partir del diagrama P vs v :

$$J_{pl} = \frac{\eta_i}{Bb_i} \int P_i dv_{pl(i)} \quad 3-26$$

En la ecuación (3-24),

$$J_{el} = \frac{K^2}{E} = \frac{P_i^2 f^2(a_i/W)}{B^2WE} \quad 3-27$$

donde K es el factor de intensidad de tensiones, E es el módulo elástico, y $f(a_i/W)$ es un factor geométrico. Es posible demostrar que la componente plástica de J de las ecuaciones (3-25) y (3-27) son idénticos.

El método propuesto por Herrera y Landes⁽²³⁻²⁴⁾ para obtener la constante β y el exponente n a partir de las mismas curvas de ensayo requiere de la determinación del punto final, donde el valor de a_f debe ser medido. En el caso del ensayo de impacto Charpy, no es posible contar con este punto, debido a que el ensayo implica la rotura total de la probeta. Sólo en el caso en que el ensayo se detiene compulsivamente (por ejemplo utilizando algún dispositivo mecánico) resultará posible contar con la información completa relativa al punto final del ensayo.

3.5. Aplicaciones al caso dinámico

Los métodos utilizados por los distintos investigadores que han trabajado en el desarrollo de métodos de ensayo para la caracterización de parámetros fractomecánicos elasto-plásticos (bajo condiciones de impacto) pueden sintetizarse en:

. Determinación de J_{IC} :

- . Energía absorbida hasta la carga máxima ⁽²⁸⁻³²⁾
- . Método multiprobeta ^(33,40)
- . Determinación de iniciación por métodos de caída de potencial o resistivos ^(41,44)
- . Determinación de la iniciación por el método de “cambio de compliancia” ^(36,38,39,47,48,49)

. Curva J-R:

- . Método multiprobeta ^(33,40)
- . Método de la “Key curve” ^(36,38,39,42,43,48,49)

El método de la “key curve”, con distintas variantes, aparece como una de las opciones más aplicables al análisis de ensayos de impacto. La posibilidad de determinación de las curvas J-R a partir de un ensayo uniprobeta resulta atractiva, ya que permite mantener las ventajas de bajo costo y simplicidad asociadas con el ensayo de impacto del tipo Charpy.

El enfoque de T. Kobayashi ⁽³³⁻³⁹⁾, uno de los investigadores más activos en este tema, para determinar la curva J-R de un material elasto-plástico puede resumirse en los siguientes pasos:

- 1.- Determinación de la curva P vs v a partir del ensayo de impacto
- 2.- Utilizando el concepto de “cambio de pendiente de compliancia”, determina el punto de iniciación del crecimiento de la fisura.
- 3.- Se asume una forma funcional para la “key curve” (en este caso “Power law”).
- 4.- Se determina la “curva de calibración”, ya sea mediante la utilización de probetas sub-size o ajustando la parte de la curva plástica hasta la iniciación.
- 5.- Con la curva de calibración y la información del diagrama P vs v se determina la curva J-R.

Este enfoque aparece como uno de los más apropiados para la generación de curvas J-R bajo condiciones de impacto. Los problemas que pueden presentarse se centran básicamente en la determinación del punto de iniciación, ya que el punto donde se produce el cambio de pendiente de la curva $\Delta C-C/C$ vs v puede no resultar suficientemente definido. La utilización de probetas sub-size o de entalla redondeada para la determinación de las curvas de calibración, por otra parte, no aparece como una opción adecuada dadas las diferencias de comportamiento que puede presentarse a causa de la disparidad geométrica entre estas probetas y las prefisuradas.

3.6. Método propuesto para la determinación de la curva J-R dinámica

3.6.1. Alternativa multiprobeta

Las ventajas competitivas del ensayo Charpy respecto a otras técnicas, como ya se mencionara, reside básicamente en su rapidez, simplicidad y mínimo costo. El mantenimiento de estas “ventajas” en el campo de la adaptación del método para la evaluación fractomecánica de los materiales torna necesario que se disponga de técnicas de evaluación también simples, rápidas y económicas. Desde este punto de vista, la alternativa “single specimen” o uniprobeta aparece como la más apropiada, dado que con un solo ensayo es posible obtener la curva J-R del material. Sin embargo, a los fines de la definición del método uniprobeta más apropiado, es necesario contar con un método alternativo de mayor confiabilidad (a priori) que permita contar con un medio de contrastación para evaluar la performance del método uniprobeta que se desarrolle. Como en el caso estático, el método multiprobeta aparece como la opción más adecuada. La ventaja de este método consiste en que se puede contar con valores de crecimiento de fisura reales (medidos) en distintos puntos de la curva J-R, que posteriormente pueden ser contrastados y comparados con los predichos por las técnicas alternativas que se propongan.

En el caso del ensayo de impacto, la utilización del método multiprobeta requiere de la detención del desplazamiento del punto de aplicación de la carga de manera precisa (por ende violenta), para lo cual es necesario recurrir a dispositivos especiales sobre el péndulo. Por otra parte, el tratamiento de los datos del ensayo (sobre todo si sólo se dispone de información Carga - Tiempo) constituye otra dificultad adicional. En el punto 4. se describe en detalle la metodología experimental y de tratamiento de datos utilizada.

La realización de los ensayos consiste en el impacto de probetas con profundidad de fisura inicial $a/W \cong 0.5$, hasta alcanzar un desplazamiento del punto de aplicación de la carga predefinido y variable ensayo a ensayo. De esta manera se alcanzan distintos valores de crecimiento de fisura (Δa). Posterior al ensayo, se realiza un “heat tinting” de la probeta (calentamiento de la misma a aprox. 300 °C durante 10/15 minutos), se la enfría en nitrógeno líquido y se la impacta para producir la fractura total, o se continúa con el crecimiento de la fisura por fatiga. Sobre la superficie de fractura, con ayuda de un microscopio óptico se mide la longitud de fisura inicial (a_0) y la final (a_f), estimándose entonces el crecimiento total ($a_f - a_0$). Dado que el frente de fisura generalmente no es constante, se toma el promedio de 5 mediciones sobre líneas equidistantes (figura 3-4)

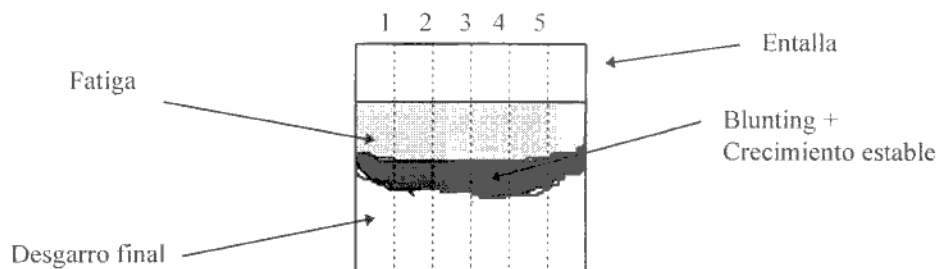


Figura 3-4: Superficie fractura (multiprobeta)

Para calcular el valor de J correspondiente a cada ensayo, se utiliza la fórmula de Garwood, la cual fue modificada para considerar que las longitudes de fisura inicial (a_0) de las distintas probetas son levemente diferentes (no es posible asegurar que la prefisura por fatiga alcance desarrollos similares, sobre todo en este tamaño de probeta):

$$J(i) = J(i-1) \cdot \frac{(W - a(i))}{(W - a(i-1))} + \frac{2}{B(W - a(i-1))} \left[E(i) - E(i-1) \frac{(W - a_0(i))^2}{(W - a_0(i-1))^2} \right] \quad 3-28$$

El valor Δa medido incluye el crecimiento real de fisura y el “blunting” o redondeo del vértice de la misma previo al crecimiento. El crecimiento estable real de la fisura se dará una vez que se ha alcanzado un cierto valor de crecimiento por “blunting”. La relación más usual entre el valor de “J” y el valor de crecimiento de fisura por redondeo del vértice es la dada por Landes y Begley⁽³⁴⁾:

$$J = 2 \sigma_o \cdot \Delta a \quad 3-29$$

donde σ_o corresponde a la tensión de flujo del material, definida como:

$$\sigma_o = \frac{\sigma_{ys} + \sigma_{m\acute{a}x}}{2} \quad 3-30$$

Sin embargo, esta no es la única expresión disponible para la estimación de la “blunting line”. Kobayashi⁽³⁴⁾ menciona otras aproximaciones, como la de Kodaira et al que es aplicable al acero A533B:

$$J = 3.7 \sigma_{ys} \cdot \Delta a \quad 3-31$$

mientras que Nakamura et al⁽³⁴⁾ propone:

$$\Delta a = 0.75 SZW = 0.75 (89 J/E) \quad 3-32$$

En el presente trabajo se analizará cuál de las expresiones propuestas es la más apropiada para el tipo de ensayo y material bajo estudio.

Para el cálculo de las expresiones 3-29 y 3-31 es imprescindible contar con el valor de tensión de fluencia y tensión máxima dinámica. Para ello, se determina en primer lugar el valor de carga de fluencia (P_y) y carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) en el diagrama P vs t ó P vs v. El valor de P_y se determina de manera automática, a través de una subrutina que determina el punto donde la pendiente de la curva P vs v pierde la linealidad. Con los

valores de carga determinados, se calcula la tensión de fluencia y máxima utilizando la relación propuesta por Server⁽⁵²⁾:

$$\sigma_{yd} = 2.85 \frac{P_y W}{B(W-a)^2} \quad 3-33$$

$$\sigma_{md} = 2.85 \frac{P_{mx} W}{B(W-a)^2} \quad 3-34$$

La intersección de la “blunting line” con el ajuste de regresión aplicado sobre los pares $J - \Delta a$ determinados experimentalmente, define el punto de “iniciación” del crecimiento estable, con lo que se define el J_{IC} del material (si satisface los requisitos de tamaño).

3.6.2.- Método uniprobeta propuesto

El método de determinación de la curva J-R propuesto en el presente trabajo se basa en el método de la “key curve” de Ernst et al, utilizando curvas de calibración propias para cada probeta (es decir, de acuerdo a lo propuesto por Herrera y Landes). Se incluye, en el cálculo de las correspondientes curvas de calibración, el efecto del redondeo del vértice de la fisura (blunting) que no es tenido en cuenta por estos investigadores. A continuación se describen las hipótesis básicas de la metodología propuesta y los pasos que resumen la metodología de cálculo.

Siguiendo el análisis realizado por Ernst et al^(20,21) para la formulación del método de la “key curve”, las tres variables interactuantes durante el ensayo (P , v y a) están relacionadas a través de una función F de la forma:

$$P = F(a/W, v/W) \quad 3-35$$

donde a y v son adimensionalizadas a través del espesor de probeta W . Ernst mostró que la carga P es “separable” en funciones multiplicativas de a/W y de v/W , cuando el desplazamiento es separado en sus componentes elástica y plástica:

$$v = v_{el} + v_{pl} \quad 3-36$$

Por un lado, la relación funcional entre P , v_{el} y a está dada por:

$$v_{el} = P Cs(a/W) \quad 3-37$$

donde C_s es la función de compliancia. Por otro lado, entre P , v_{pl} y a , utilizando el principio de Ernst de separabilidad de funciones, se tiene en forma general:

$$P = G(a/W) H(v_{pl}/W) \quad 3-38$$

Para probetas de flexión (como la probeta Charpy), $G(a/W)$ se puede expresar en términos del ligamento remanente, b ($b = W - a$) de la siguiente forma:

$$P = \frac{Bb^2}{W} g(b/W) H(v_{pl}/W) \quad 3-39$$

donde nuevamente B corresponde al espesor de probeta. Para probetas de flexión con fisura profunda, $g(b/W) = 1$.

La propiedad de deformación del material está contenida entonces en la función $C(a/W)$ (componente elástica) y en $H(v_{pl}/W)$ (componente plástica). $H(v_{pl}/W)$ es una función de las propiedades de flujo del material, y puede ser obtenida en forma gráfica a partir de la separación de la ecuación (3-32) en su componente dependiente de la longitud de fisura, P_N , y la función de flujo plástico, H :

$$P_N = \frac{PW}{Bb^2 g(b/W)} = H(v_{pl}/W) \quad 3-40$$

Graficando P_N vs v_{pl}/W , es posible obtener gráficamente la forma funcional de H . Esta forma funcional dependerá de las propiedades del material y de la forma y dimensiones de la probeta. Por lo tanto, no existirá una forma general. Las curvas de calibración en el EPRI Plastic Handbook⁽⁵⁰⁾ utilizan el exponente de endurecimiento para desarrollar las soluciones. Se postula un comportamiento plástico del material que sigue una ley del tipo Ramberg-Osgood:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad 3-41$$

donde α es un coeficiente constante y n un exponente constante. Cuando las propiedades plásticas del material siguen una ley de este tipo, la forma funcional de H puede ser descripta por una ley del tipo potencial:

$$\frac{v_{pl}}{W} = \beta P_N^n \quad 3-42$$

donde n es el mismo exponente utilizado en el ajuste de Ramburg-Osgood y β es una constante. Como ya se mencionara, la determinación de las constantes β y n requiere de por los menos dos puntos. En el método de normalización propuesto por Herrera y Landes se utiliza el punto final y el punto inicial, donde P , v y a pueden ser unívocamente determinados.

El procedimiento propuesto para el tratamiento de la información obtenida del ensayo Charpy puede resumirse en los siguientes pasos:

1.- Se determina la curva Carga vs Desplazamiento del punto de aplicación de la carga (P vs v) a partir de la información Carga - tiempo (P vs t) y los parámetros del ensayo. En el punto 4.3 se describe la metodología utilizada para este fin (figura 3-5 a y b).

2.- Una vez determinada la curva P vs v , con la longitud inicial de fisura a_0 como dato se genera la correspondiente curva P vs v_{pl} , utilizando la expresión 3-43: (figura 3-5 c)

$$v = v_{el} + v_{pl}$$

$$\Rightarrow v_{pl}(i) = v(i) - v_{el}(i) = v(i) - P(i) Cs(a_0/W) \quad 3-43$$

3.- A continuación se normaliza la carga y el desplazamiento considerando la longitud de fisura y las dimensiones de la probeta. A diferencia de lo propuesto por los restantes investigadores que utilizan el concepto de la "key curve" para la obtención de la curva J-R, la "normalización" de la curva se realiza considerando una longitud de fisura que no es constante, sino que se considera el crecimiento de fisura por redondeo del vértice de la misma. Previamente debe determinarse cuál es la expresión de la "blunting line" más apropiada para cada caso. Se grafica P_N vs v_{pl}/W (figura 3-5 d).

4.- Se aplica el logaritmo natural a ambos miembros de la expresión (3-42), de manera tal que se obtiene:

$$\ln \frac{v_{pl}}{W} = \ln \beta + n \ln P_N \quad 3-44$$

5.- Se grafican los pares ($\ln v_{pl}/W$ vs $\ln P_N$) (figura 3-5 e)

6.- Se determina el punto donde la pendiente de la curva disminuye de manera marcada, ya sea de a través de estimación visual como automatizada a través de un programa de cálculo. Ese punto corresponderá al punto de iniciación del crecimiento estable de la fisura.

7.- Se ajusta, por mínimos cuadrados, una recta sobre la parte inicial de la curva y hasta el punto determinado en el paso 6. La pendiente de la recta corresponderá al exponente “n” de la expresión 3-42, mientras que la intersección de esta recta con el eje de ordenadas corresponderá al $\ln \beta$ (ver expresión 3-44) de donde se calcula el valor de β .

8.- A partir de los valores de n y β así determinados, se dispone entonces de la “curva de calibración” correspondiente a la probeta (figura 3-5 g).

9.- Para calcular el valor de longitud de fisura instantáneo para cada desplazamiento, se utiliza la siguiente expresión:

$$v(i) = P(i) \times Cs(a(i) / W) + W \cdot \beta \cdot \left[\frac{P(i)W}{B(W - a(i))} \right]^2 \quad 3-45$$

Dada la dificultad en extraer directamente el valor de a(i) de la ecuación 3-45, en la práctica el cálculo se realiza dando valores a a(i) hasta que se satisface la igualdad entre ambos miembros de la citada ecuación. De esta manera se obtienen los valores instantáneos de fisura en todos los puntos de la curva P vs v.

10.- El cálculo de J para cada punto se calcula separando su componente elástica y plástica (expresión 3-24):

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad 3-46$$

donde (3-27):

$$J_{el} = \frac{K^2}{E^*} = \frac{P(i)^2}{B^2 W E^*} f^2(a(i) / W) \quad 3-47$$

con E^* = módulo de elasticidad efectivo (corresponde al módulo de elasticidad estimado a partir de (P_y, v_y) y la expresión de compliancia de probeta $Cs(i)$).

La componente plástica de (3-46), dado que se conoce a(i) para cada punto, se estima a partir de la expresión 3-26:

$$J_{pl} = \frac{\eta_i}{B b_i} \int P_i dv_{pl(i)} \quad 3-48$$

donde η_i toma el valor 2, valor teórico confirmado experimentalmente (ver el punto 5). De esta manera se dispone de los pares $J(i), \Delta a(i)$ que permiten la construcción de la curva J-R correspondiente a la probeta bajo análisis (figura 3-25 h).

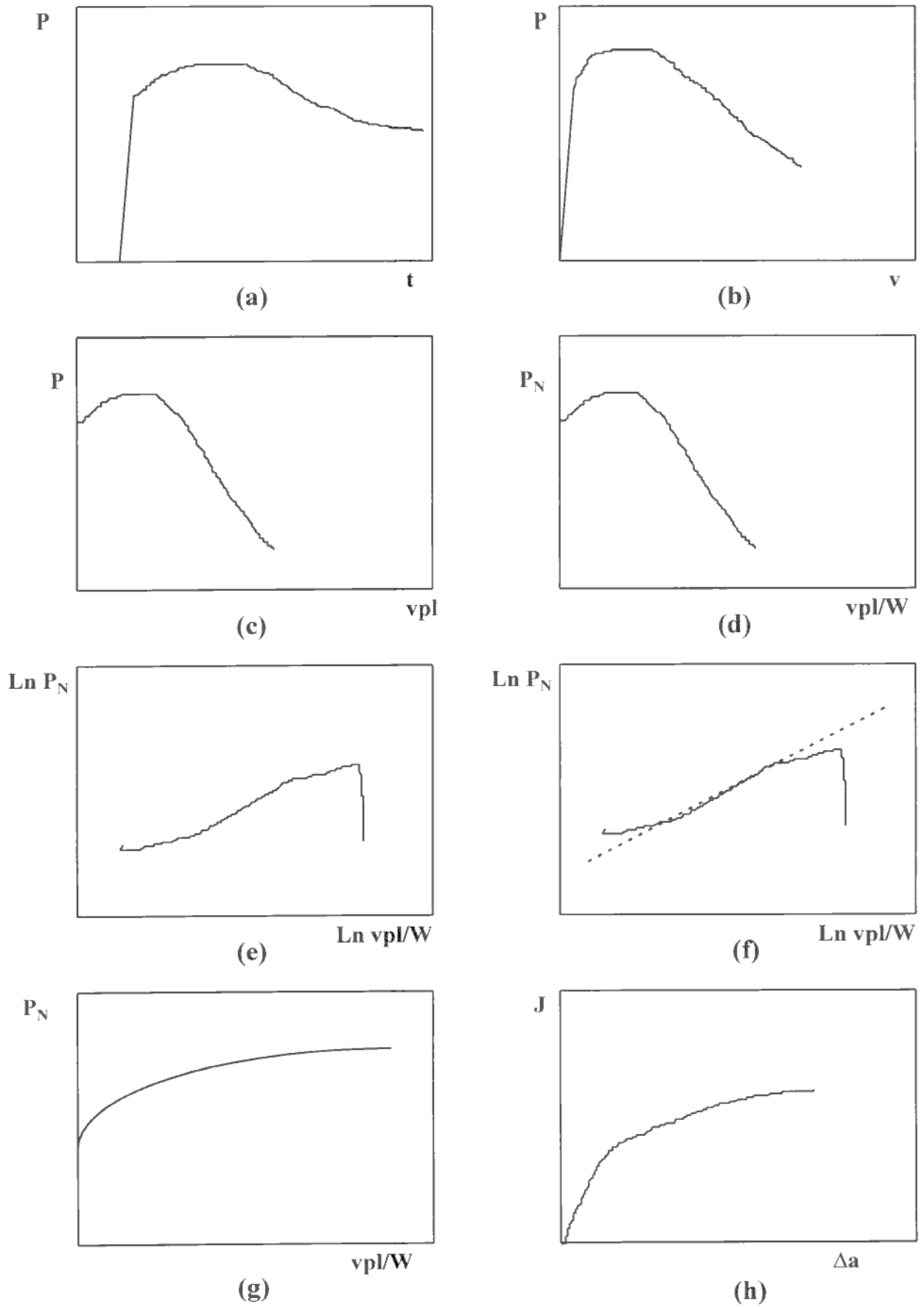


Figura 3-5: Pasos para la determinación de la curva J-R

Una vez obtenida la curva, es posible estimar de ella los distintos parámetros fractomecánicos asociados (J_{ID} , T_{mat} , etc.). La determinación del valor de iniciación, J_{ID} , corresponderá al punto donde la curva J vs Δa se desvía de la linealidad. Este punto puede determinarse previamente en la curva $\ln PN$ vs $\ln v_{pl}/W$ (figura 3-5 f) ó directamente a partir de la curva J vs Δa . El valor de J correspondiente a este punto será denominado el J_Q del material. Si se satisface la condición de fluencia en pequeña escala⁽¹⁾, dada en la expresión 3-6, el valor de J_Q se convierte en el valor del J_{ID} del material.

Programas de cálculo:

Los pasos 1 al 10 citados en el apartado anterior se realizan de manera automática con la ayuda de un programa de cálculo especialmente diseñado para tal fin (FRACDIN). El programa se escribió en lenguaje Qbasic, y permite la graficación y obtención de todos los parámetros citados, a partir de la información Carga - Desplazamiento del ensayo, las dimensiones características de las probetas y los parámetros de ensayo (masa del péndulo, velocidad inicial). Como salida del programa, se obtiene:

- . Tensión de fluencia y máxima del material
- . Curva P vs v_{pl}
- . Valores de los coeficientes n y β del ajuste.
- . Curva de calibración de la probeta
- . Curva J vs Δa
- . J_{ID} y validez del ensayo

4. MÉTODO EXPERIMENTAL

4.1.- Material

Este trabajo no tiene como objetivo específico la caracterización de algún material determinado, sino la puesta a punto de una metodología de ensayo que sea aplicable en cualquier material de comportamiento elasto-plástico. Para este trabajo se utilizó un acero aleado de alta calidad (lo cual asegura un comportamiento estable pese al tamaño reducido de las probetas). El acero es un 20MnMoNi (A533B según ASTM). Los trabajos realizados por T. Kobayashi con Charpy instrumentado se realizaron sobre este tipo de acero, con lo cual se cuenta con una base de contrastación para los resultados que se obtengan. La Tabla 4-I contiene la composición química del acero, mientras que la Tabla 4-II contiene las propiedades mecánicas principales (estáticas).

C = 0.21	Si = 0.30	Mn = 1.33
P = 0.008	S = 0.007	Cr = 0.13
Mo = 0.54	Ni = 0.76	Al = 0.025
Cu = 0.08	V = 0.01	Sn = 0.006
Co = 0.13		

Tabla 4-I: *Composición química (% en peso)*

Tensión de Fluencia MPa	Tensión última, UTS MPa	Reducción de área %
450	640	45

Tabla 4-II: *Propiedades mecánicas*

4.2.- Probetas

Todos los ensayos de evaluación de curva J-R se realizaron utilizando probetas del tipo Charpy standard ⁽²⁾ (CVN, 55 x 10 x 10 mm), prefisuradas por fatiga (figura 4-1b). La prefisura por fatiga se realizó a partir de una entalla previa mecanizada, de 3.5 mm de profundidad con fondo en “V”.

Para la determinación del factor η_{pl} , se utilizaron probetas del tipo “blunt notched” (figura 4-1a). Las mismas se caracterizan por poseer una entalla con fondo en “U”, que tiene por objeto retardar el inicio de la fractura. Estas probetas no poseen iniciador por fatiga.

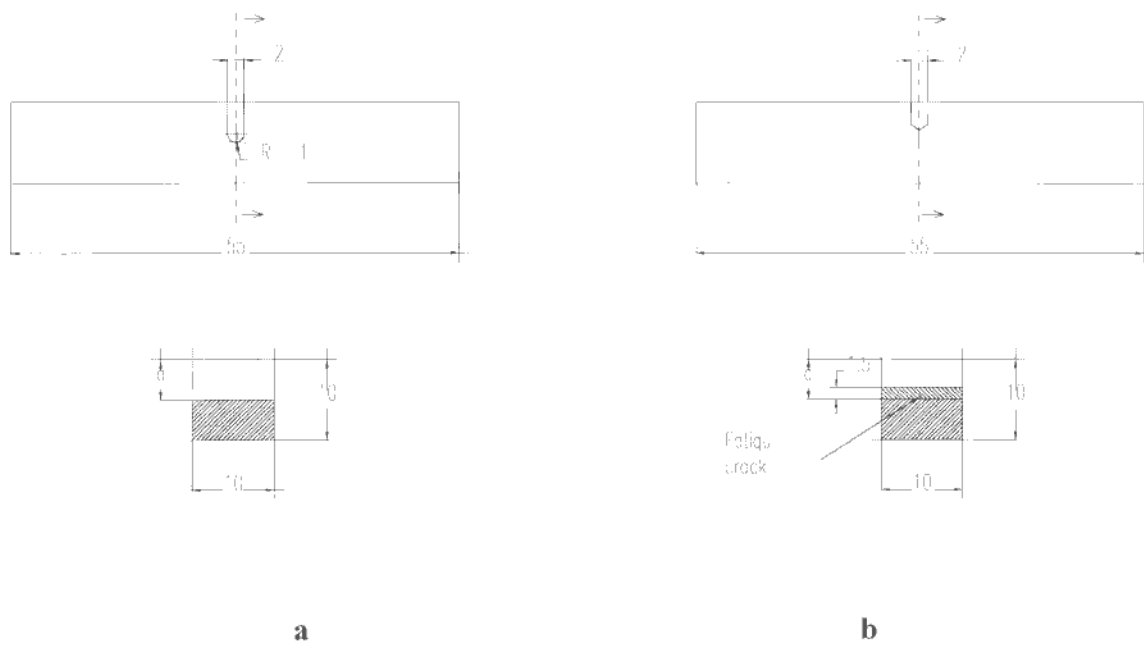


Figura 4-1: Probetas utilizadas

4.3 Equipamiento utilizado

4.3.1 Péndulo de impacto

Los ensayos de impacto se realizaron utilizando un péndulo de impacto Tinius Olsen de 358 Joules de capacidad⁽⁵¹⁾, facilitado por la Fundación Latinoamericana de Soldadura (FLS). La instrumentación del mismo (Dynatup Model 500) está constituida por el sistema sensor de carga (golpeador instrumentado), un amplificador de señal, un integrador, un osciloscopio Tektronix y un dispositivo optoelectrónico. El esquema de la figura 4-2 muestra los componentes del sistema utilizado:

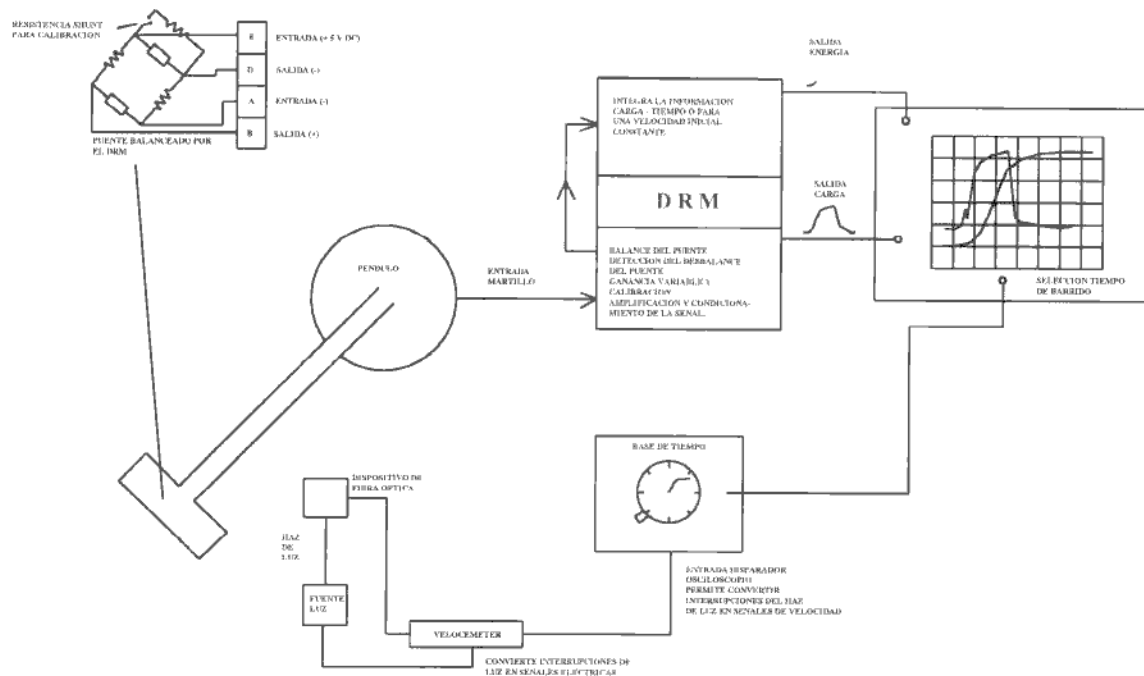


Figura 4-2: Esquema instrumentación péndulo Tinius Olsen 358.

La celda de carga la constituye un "martillo" o golpeador removible de la cabeza del péndulo, que posee 4 strain gages del tipo semiconductor de 450 ohms, dispuestos de manera de formar un puente de Wheatstone. Este puente está alimentado con una tensión constante de 5 Volts que provee el DRM (Dynamic Response Module).

El DRM model 500 tiene la función de proveer corriente continua al puente, además de proveer el balance, variar la sensibilidad de carga y proveer las funciones de calibración. Amplifica la señal proveniente del puente a un valor apto para ser graficada en el osciloscopio. Permite variar la sensibilidad de carga entre 20 kg/div. y 800 kg/div, y la energía entre 1 y 50 lbpie/div. Posee además cuatro posiciones posibles de filtrado de la señal.

El VDM (Velocimeter Display Module) provee la interface para graficar la señal de energía generada por el DRM, y puede ser utilizado para graficar la señal generada por el detector de velocidad.

El Velocimeter es un componente que utiliza un haz de luz controlado y un fotosensor para asegurar el exacto y real disparo de un osciloscopio u otro sistema adquireedor de datos. Permite además determinar la velocidad del péndulo antes, durante o después del impacto sin necesidad de contacto con el mismo.

La energía total absorbida durante el ensayo es indicada en un dial que tiene en cuenta la diferencia de energía potencial previa y posterior al impacto. Debido a que el péndulo utilizado posee una sola posición de disparo, fue necesario construir en el LEMIT (Laboratorio Interdisciplinario para la Investigación Tecnológica, La Plata) un

dispositivo que permitiera contar con distintas posiciones de disparo, y por ende distintas velocidades y energías de impacto (ver punto 4.3.3.).

La información proveniente del ensayo se registra fotográficamente por medio de una cámara especial que utiliza película Polaroid 667. Dado que el osciloscopio es del tipo analógico, no es posible almacenar la información del ensayo de manera directa (sí es posible en los actuales osciloscopios digitales).

4.3.2. Determinación de la velocidad de impacto

A los efectos de obtener los distintos parámetros emergentes del ensayo de impacto Charpy instrumentado, es imprescindible contar con la velocidad de impacto como una de las condiciones iniciales para el análisis. Ésta define la energía que recibe la probeta, por lo que es requerida su determinación precisa.

La instrumentación del péndulo dispone de un dispositivo optoelectrónico para realizar la medición de la velocidad (figura 4-3). El mismo consiste de un conjunto armado provisto de un haz de luz que incide sobre un fotosensor, que se encuentra fijado sobre el pie del péndulo. Sobre el extremo de éste se ubica una “bandera” rectangular que posee varias ranuras equidistantes separadas por una distancia de 0.04 in (1 mm). Definida una velocidad de barrido (por ejemplo 0.2 ms/división), se libera el péndulo desde la posición deseada y se registra en la pantalla del osciloscopio un gráfico similar al representado en la figura 4-4. Cada “pico” en el diagrama corresponde al pasaje de una ranura de la “bandera”. Para obtener el valor de velocidad, se realiza el siguiente cálculo:

$$= \frac{\text{Distancia}}{\text{tiempo}} \quad 4-1$$

Para lo cual se debe medir, sobre el registro, el tiempo (t) entre N número de picos. Por lo tanto,

$$= \frac{1(\text{mm}) \times N}{D \times R} \quad 4-2$$

donde D es el número de divisiones entre los N picos, y R es la velocidad de barrido en 10^{-3} segundos por división.

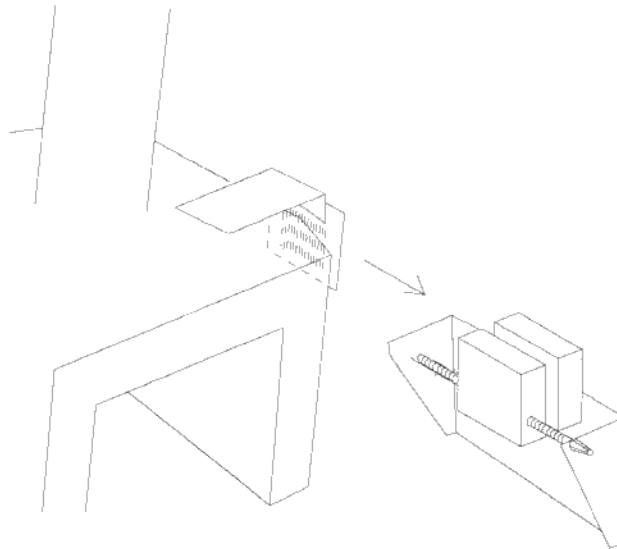


Figura 4-3: *Dispositivo optoelectrónico (medición de velocidad)*

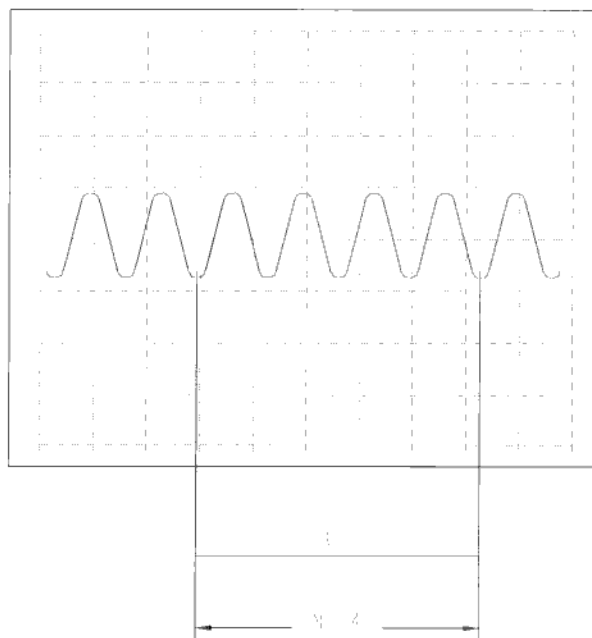


Figura 4-4: *Determinación de la velocidad de impacto*

4.3.3.- Dispositivo utilizado para variar la posición de disparo

El péndulo utilizado posee una sola posición de liberación, con la cual es posible disponer de toda la energía (358 Joules). Para los ensayos a realizar, era necesario contar con la posibilidad de realizar los mismos con menores niveles de energía o velocidad inicial. Por tal motivo, se fabricó especialmente un dispositivo mecánico que permitiera

contar con una amplia gama de posiciones de disparo (y por ende energías de impacto). La figura 4-5 muestra un esquema del dispositivo diseñado.

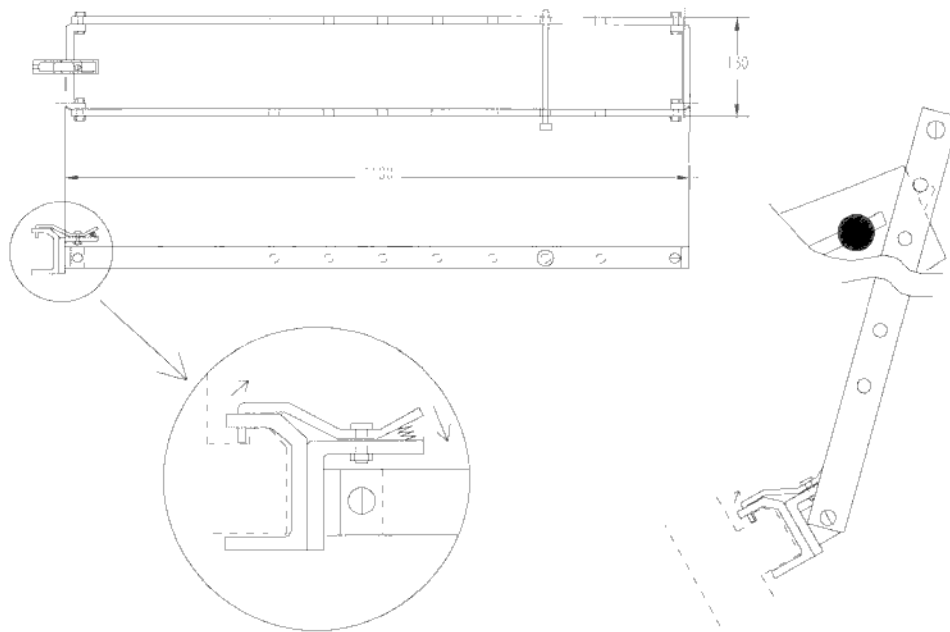


Figura 4-5: *Dispositivo fabricado para lograr diferentes posiciones de disparo del péndulo*

La energía total disponible al momento del impacto, está dada por la energía cinética que posee el péndulo. La energía cinética al momento del impacto (E_o) se obtiene como:

$$E_o = \frac{1}{2} m V_o^2 \quad 4-3$$

donde m es el valor de la masa del péndulo y v_o la velocidad del mismo al momento del impacto. Para determinar la masa efectiva del péndulo, se coloca el mismo en posición horizontal (controlado por nivel), apoyando el martillo del mismo en una balanza de precisión (esquema figura 4-6):

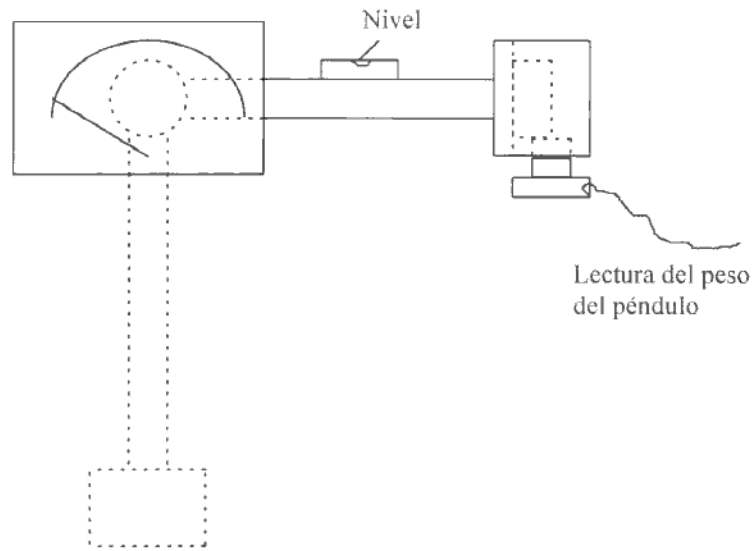


Figura 4-6: Determinación de la "masa" efectiva del péndulo

La masa del péndulo medida siguiendo el procedimiento citado resultó

$$m = 27.22 \text{ kg}$$

4-4

Utilizando el procedimiento descrito en el punto 4.2.2, se determinó la velocidad al momento del impacto correspondiente a las distintas posiciones de disparo disponibles. Con la masa medida y la velocidad obtenida se calculó la energía disponible al momento del impacto. La Tabla 4-III muestra los resultados obtenidos:

Posición	Energía (J)	Velocidad (Vo) (m/s)
0	1.7	0.27
1	5.6	0.59
2	14.0	0.99
3	26.5	1.42
4	42.0	1.72
5	358	5.10

Tabla 4-III: Velocidades energías iniciales disponibles

4.3.4. Dispositivo para el prefisurado de las probetas

Para el prefisurado de las probetas se utilizó un dispositivo diseñado especialmente para el prefisurado de probetas 3PB, por el Ing. Perez Ipiña en el LEMIT. La figura 4-7 muestra un esquema del dispositivo.

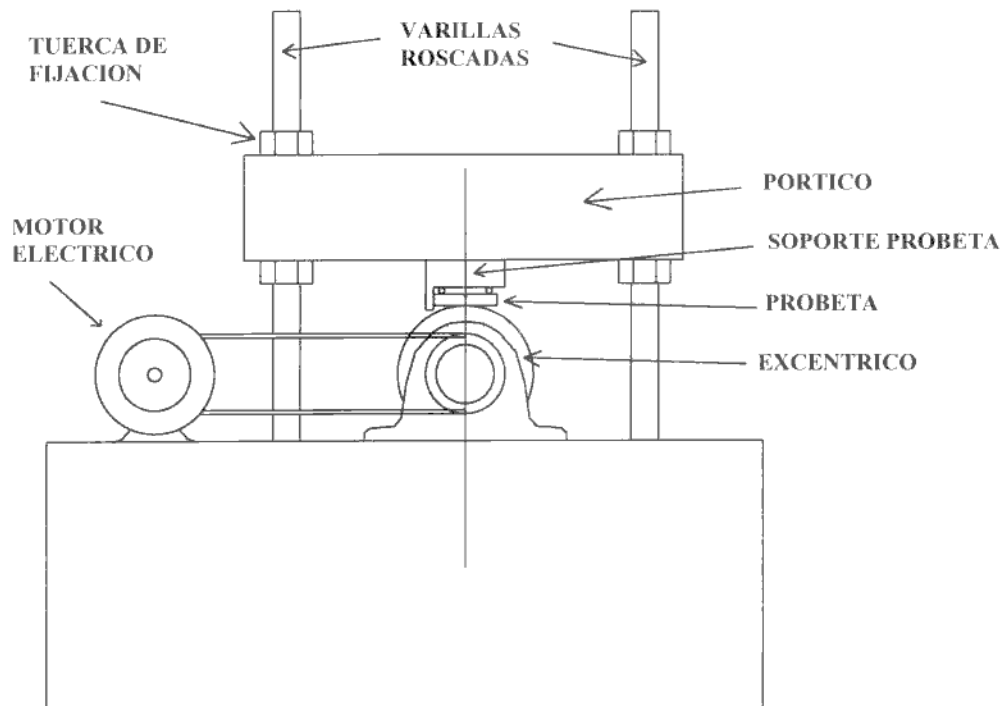


Figura 4-7: *Dispositivo de prefisurado (LEMIT)*

El dispositivo está constituido básicamente por un motor eléctrico y un rodamiento con eje excéntrico, encargado de aplicar sobre la probeta una deflexión determinada. Es decir, el proceso de prefisuración se realiza a desplazamiento constante, con lo cual la carga aplicada disminuye a medida que avanza la prefisura.

Cálculo de la carga de prefisuración

La carga de prefisuración se realizó de acuerdo a la norma ASTM E-813 ⁽¹⁾, la cual define la carga máxima de prefisuración como una fracción de la carga límite P_l dada por:

$$P_L = \frac{4}{3} \frac{Bb_o^2 \sigma_y}{S} \quad 4-5$$

donde B es el espesor de probeta, b_0 es la longitud del ligamento remanente ($W-a$), σ_y es la tensión de fluencia del material y S corresponde a la distancia entre apoyos.

Si se considera que:

$$\sigma_y \cong 500 \text{ MPa}$$

$$B = 10 \text{ mm}$$

$$b_0 = 6.5 \text{ mm}$$

$$S = 40 \text{ mm}$$

se obtiene:

$$P_L = 8450 \text{ N (861.3 kg)} \quad 4-6$$

De acuerdo a la norma ASTM E-813⁽¹⁾, la máxima carga admisible en el último tramo de la prefisuración no debe ser superior a $0.4 P_L$. Por lo tanto, la carga máxima a aplicar será:

$$P_{lim} = 0.4 \times P_L = 3380 \text{ N (344.5 kg)} \quad 4-7$$

Dado el sistema de prefisuramiento empleado (control por desplazamiento), se debió estimar el desplazamiento necesario para alcanzar un valor de carga similar al dado por [4-7]. Para ello se requiere de la función de compliancia de la probeta, la cual está dada por:

$$C_s E B = 32.35 - 159.24 \times (a/W) + 479.05 \times (a/W)^2 \quad 4-8$$

La obtención de la expresión [4-8] se detalla en el punto 4-4. Si se considera $E = 21000 \text{ kg/mm}^2$, $a = 3.5 \text{ mm}$ y $W = 10 \text{ mm}$, se obtiene que

$$C_s = 1.68 \times 10^{-4} \text{ mm/kg} \quad 4-9$$

Por lo tanto, el desplazamiento a aplicar en el prefisurado estará dado por:

$$\Delta = P_{lim} \times C_s$$

$$\Delta = 344.5 \text{ kg} \times 1.68 \times 10^{-4} \text{ mm/kg}$$

$$\Delta = 0.057 \text{ mm} \quad 4-10$$

Ubicando la flecha del excéntrico en ese valor, se prefisuraron las distintas probetas utilizadas hasta el valor de fisura final deseado. Para alcanzar una profundidad de fisura 0.5 mm, se requirieron aproximadamente 30000 ciclos. Es importante notar que la configuración empleada (desplazamiento constante) provoca un decrecimiento paulatino del nivel de tensiones en el vértice de la entalla, a medida que avanza la fisura. De esta manera se elimina el riesgo de sobrecargas puntuales que puedan plastificar localmente el vértice de la fisura.

4.3.5.- Dispositivo para ensayos con “Stop block”

Como se mencionara en el punto 3.5.1, para evaluar la performance de un método de ensayo uniprobeta se requiere contrastar los resultados del mismo a través de su comparación con algún método de aceptación indiscutible, suficientemente corroborado. En el caso estático, la posibilidad de detener en cualquier momento el ensayo permite relevar la longitud de fisura alcanzada hasta ese momento, de manera tal que resulta posible realizar la comparación entre la predicción teórica y el valor experimental medido. En el caso dinámico que nos ocupa, esto en principio es imposible, dado que el ensayo consiste en la aplicación de una carga impactual con energía suficiente como para fracturar totalmente la probeta. Aplicar energías de impacto menores provocaría variaciones muy importantes de la velocidad durante el impacto, con lo cual los resultados perderían confiabilidad (ver punto 2).

Una posible solución a este problema fue propuesta por T. Kobayashi⁽³³⁾, quien propuso el método que él denominó “stop block”. El mismo consiste en detener compulsivamente al péndulo con un tope mecánico, antes de que la probeta fracture totalmente. En este dispositivo, fabricado especialmente, es posible variar la posición en la cual se detiene el péndulo. En el registro carga - desplazamiento (cuando se cuenta con sistema con capacidad para registrar el desplazamiento del punto de aplicación de la carga), el punto de detención del péndulo aparece claramente definido.

En base a esta idea, se fabricó en el LEMIT un dispositivo para generar la detención brusca del péndulo durante su impacto con la probeta. La figura 4-8 muestra un esquema del dispositivo, especialmente fabricado para el péndulo utilizado en los ensayos. El mismo cuenta con separadores o delgas intercambiables, con las cuales se logra obtener distintas posiciones de detención del péndulo.

"Stop Block"

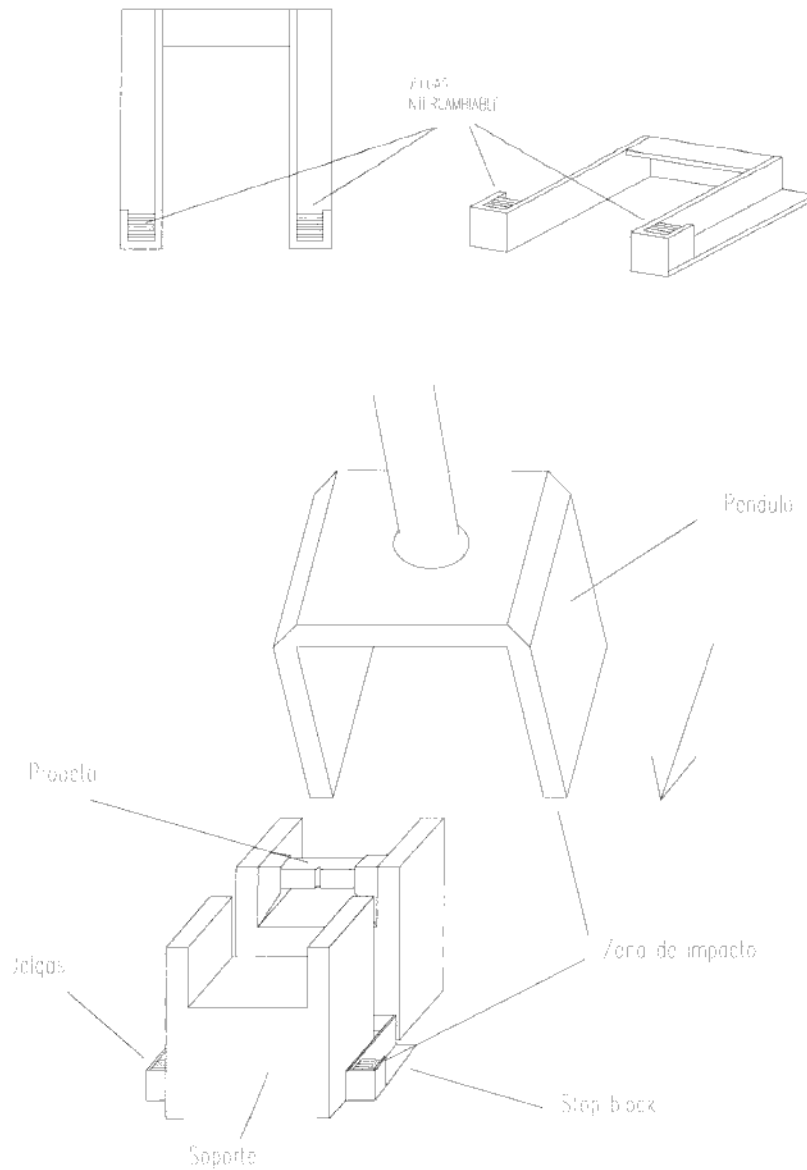


Figura 4-8: Dispositivo para ensayos "Stop Block"

En primer lugar, debe tenerse en cuenta que si la energía disponible en el péndulo en el momento de alcanzar el stop block es muy elevada, el péndulo puede sufrir daños mecánicos que afecten su posterior funcionamiento. Debe seleccionarse una energía / velocidad de impacto tal que la caída de velocidad durante la fractura no sea muy significativa, a la vez que la energía remanente al momento de impactar el stop block sea limitada. Para los ensayos realizados, se trabajó con una energía de impacto inicial de 42 J (1.72 m/s).

4.4.- Tratamiento de los datos de ensayo

4.4.1.-Obtención del registro carga-desplazamiento a partir del registro carga-tiempo.

La instrumentación disponible sólo permitió registrar la evolución de la carga aplicada (señal proveniente del “martillo”) en función del tiempo (figura 4-2). Para la obtención de los parámetros fractomécánicos es imprescindible contar con la información Carga - desplazamiento, lo cual debe ser inferido a partir de la información disponible. A medida que transcurre el evento de impacto, la energía inicial del péndulo se transfiere en parte a la probeta, que la “consume” en deformarse elástica y plásticamente y en fracturarse, mientras que otra parte se almacena en forma elástica por deformación del péndulo mismo. Esta energía absorbida por el sistema será responsable provocar una reducción en la velocidad del péndulo a medida que transcurre el impacto.

Una vez que el péndulo impacta con la probeta, la energía del mismo (E_0) se “gastará” entre los siguientes procesos:

$$E_0 = E_{dp} + E_{fp} + E_{cp} + E_m + E_{\mu} + E_r \quad 4-11$$

donde

E_{dp} = energía absorbida por la probeta en deformarse elástica y plásticamente

E_{fp} = energía consumida en generar superficies durante la fractura de la probeta

E_{cp} = energía cinética de las partes de la probeta que salen disparadas luego del ensayo

E_m = energía absorbida por el péndulo

E_{μ} = energía gastada en rozamientos y pérdidas durante proceso

E_r = energía remanente: es la energía que no se ha consumido en el proceso de impacto, y queda disponible en el péndulo.

La energía E_r es la que se normalmente se mide en el ensayo Charpy, y está dada por la altura que alcanza el péndulo luego del impacto. Por lo tanto, en el ensayo de impacto Charpy convencional se considera a la suma de energías $E_{dp} + E_{fp} + E_{cp} + E_m + E_{\mu}$ como una única energía total absorbida por la probeta.

De los términos citados, en el ensayo de un material elastoplástico es posible considerar que E_{cp} , E_m , E_{fp} y E_{μ} son de magnitud despreciable frente a E_{dp} . En el caso de materiales frágiles como cerámicos o metales de alta resistencia, la muy baja energía de deformación provoca que no puedan despreciarse estos términos de energía en el valor total.

Para obtener el valor de desplazamiento instantáneo, es necesario recurrir al principio de conservación de la cantidad de movimiento. El mismo puede ser expresado de la siguiente manera:

$$\delta v = \frac{1}{m} \int P dt \quad 4-12$$

Aunque en rigor se trata de un problema de conservación de la cantidad de movimiento angular, consideramos el problema como un caso de conservación de cantidad de movimiento rectilíneo, dadas las grandes dimensiones relativas del péndulo respecto al desplazamiento axial del mismo durante el proceso de fractura. En este caso m es la masa efectiva del péndulo, y la integral $\int P dt$ representa el área bajo la curva P vs t.

Dado que se trabaja con valores de P y T discretos, la expresión (4-12) queda expresada como:

$$v(i) = v(i-1) - \frac{(P(i) + P(i-1)) \cdot (t(i) - t(i-1))}{2m} \quad 4-13$$

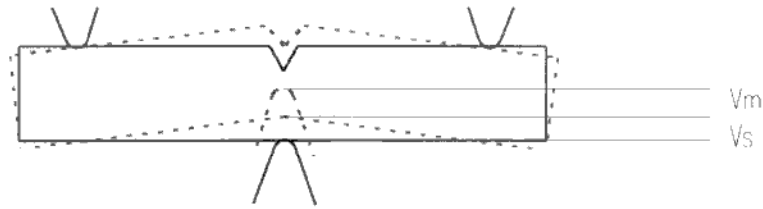
Obtenido el valor de velocidad instantánea $v(i)$ para cada punto, es posible obtener el valor del desplazamiento total $Vt(i)$, haciendo uso de la expresión

$$t(i) = v(i) \cdot t(i) \quad 4-14$$

por lo tanto, el desplazamiento punto a punto estará dado por:

$$t(i) = Vt(i-1) + \frac{(v(i) + v(i-1)) \cdot (t(i) - t(i-1))}{2} \quad 4-15$$

Sin embargo, el desplazamiento total así obtenido corresponde al desplazamiento de la probeta en sí, más el desplazamiento del punto de impacto del péndulo (a causa de que la rigidez del mismo no es infinita). La figura 4-9 muestra esta situación:



$$V_t = V_m + V_s$$

V_m = desplazamiento por flexión del péndulo
 V_s = desplazamiento del punto de aplicación de la carga (sobre la probeta)

Figura 4-9: Deformación total durante el impacto.

El desplazamiento neto del punto de aplicación de la carga, entonces, estará dado por:

$$s = V_t - P \times C_m \tag{4-16}$$

donde P es la carga instantánea aplicada y C_m es la “compliance” de la máquina (mm de desplazamiento por kilogramo aplicado). Ésta representa la deflexión del péndulo en el punto que está en contacto con la probeta, por la unidad de carga aplicada. En forma discreta, la expresión (4-16) se transforma en:

$$s(i) = V_t(i) - P(i) \times C_m \tag{4-17}$$

De esta manera es posible, a partir de la información $P(i)$ vs $t(i)$, obtener el correspondiente diagrama de valores $P(i)$ vs $V_s(i)$, a partir del cual realizar el análisis fractomecánico.

Con la información generada es posible obtener la energía instantánea absorbida por la probeta durante el proceso de deformación y fractura. Para ello se plantea que la energía perdida por el péndulo es igual a la diferencia entre la energía cinética inicial (dada por $v(0)$) y la energía cinética en el instante considerado (dada por $v(i)$). Como se citara anteriormente, esta diferencia de energía es absorbida por la probeta en sí y por la máquina (despreciamos E_μ y E_{cp}). La energía de máquina E_m será

$$E_m = \frac{P(i)^2 \times C_m}{2} \tag{4-18}$$

Esta energía corresponde al área bajo la curva carga - desplazamiento, asumiendo que la máquina en conjunto se comporta en forma elástica lineal.

Por lo tanto, la energía neta absorbida por la probeta durante el proceso de fractura estará dada por:

$$E(i) = \frac{1}{2}m(v(0)^2 - v(i)^2) - \frac{P(i)^2 \times Cm}{2} \quad 4-19$$

Se requiere en primer término, entonces, contar con el valor de compliancia de la máquina.

Programa “IMPACTO”

Los cálculos intermedios que permiten obtener la curva Carga - desplazamiento a partir de la información Carga - tiempo del ensayo, se realizan mediante un programa de cálculo realizado en lenguaje Qbasic. La entrada y salida del mencionado programa incluye:

Entrada (input):

- . Nro. de puntos de discretización de la curva
- . Valores discretos P - t
- . Masa efectiva del péndulo (27.22 kg)
- . Velocidad inicial péndulo

Salida (output):

- . Curva P vs t
- . Valores instantáneos de:
 - . velocidad del péndulo (v(i))
 - . desplazamiento total (Vt(i))
 - . desplazamiento punto de aplicación de la carga (V(i))
 - . Energía absorbida por la probeta (E(i))
- . Graficación de las variables mencionadas
- . Cálculo de valores de compliancia entre puntos definidos
- . Archivo de datos con información P-V (entrada a programa FRACDIN).

En el Anexo I se incluye un listado del programa IMPACTO.

4.4.2 Determinación de la función de compliancia

4.4.2.1. Compliancia de la máquina

Luego de que el golpeador del péndulo impacta con la probeta, el avance del mismo estará dado por la suma de la deformación que sufre la probeta, mas la deformación que sufrirá el péndulo mismo (figura 4-9). La deformación total que sufre el sistema probeta-péndulo esta dado por

$$V_t = V_m + V_s \quad 4-20$$

por lo tanto, la deformación neta sufrida por la probeta será igual a

$$V_s = V_t - V_m$$

La deformación total sufrida por el péndulo se asume que es totalmente elástica, y está dada por la expresión:

$$V_m = C_m \times P$$

Para la obtención de la compliancia, se parte de la expresión (4-20), es decir $V_t = V_m + V_s$. En el rango elástico, se puede plantear

$$V_t = C_t \times P = C_m \times P + C_s \times P = (C_m + C_s) \times P \quad 4-21$$

Es decir,

$$C_t = C_m + C_s \quad 4-22$$

$$\Rightarrow C_m = C_t - C_s \quad 4-23$$

Conociendo C_t y C_s , será posible entonces determinar C_m . Para ello, siguiendo a T. Kobayashi⁽³⁴⁾ se recurre al ensayo del tipo de "golpe débil" (low blow test) para asegurar que no se generan deformaciones permanentes, en una probeta con compliancia C_s conocida. En este caso, se utilizó una probeta de dimensiones Charpy estándar ($L = 55$ mm; $B = W = 10$ mm) pero sin entalla o fisura. La expresión de compliancia para esta probeta está dada por⁽³⁴⁾:

$$C_s E B = \frac{I^3}{4W^3} \left[1 + 2.85(W/l)^2 - 0.84(W/l)^3 \right] \quad 4-24$$

donde E = módulo de elasticidad = 21000 kg/mm^2

Para la probeta de dimensiones Charpy sin entalla, se obtiene

$$C_s E B = 18.54$$

Por lo tanto

$$C_s = 8.81 \times 10^{-5} \text{ mm/kg} \quad 4-25$$

Para obtener el valor de compliancia total C_t , se realiza el ensayo de golpe débil citado. El mismo se realizó a una velocidad de ensayo de 0.27 m/seg (posición 0 Tabla 4-III). La figura 4-10 muestra la fotografía obtenida de uno de los ensayos (se realizaron tres en total).

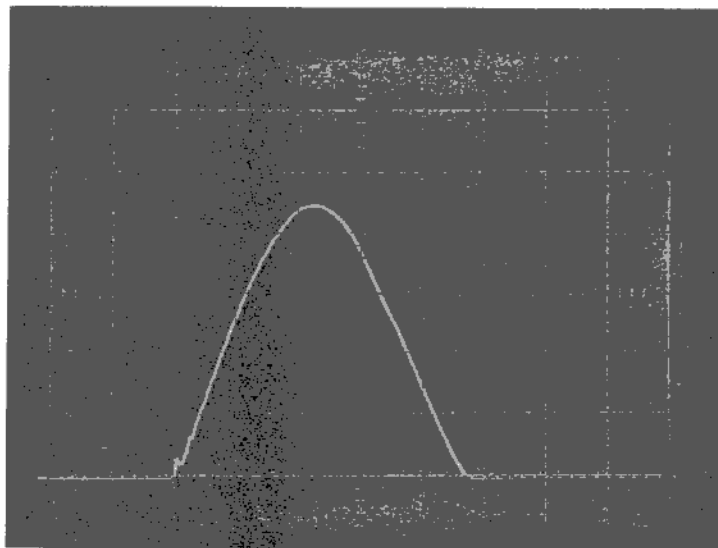


Figura 4-10: *Ensayo de "golpe débil"*

Los puntos de la curva P vs t fueron posteriormente discretizados, y cargados al programa de tratamiento de datos "IMPACTO" desarrollado para la generación de la información carga - desplazamiento. La figura 4-11 muestra la misma curva luego de discretizada.

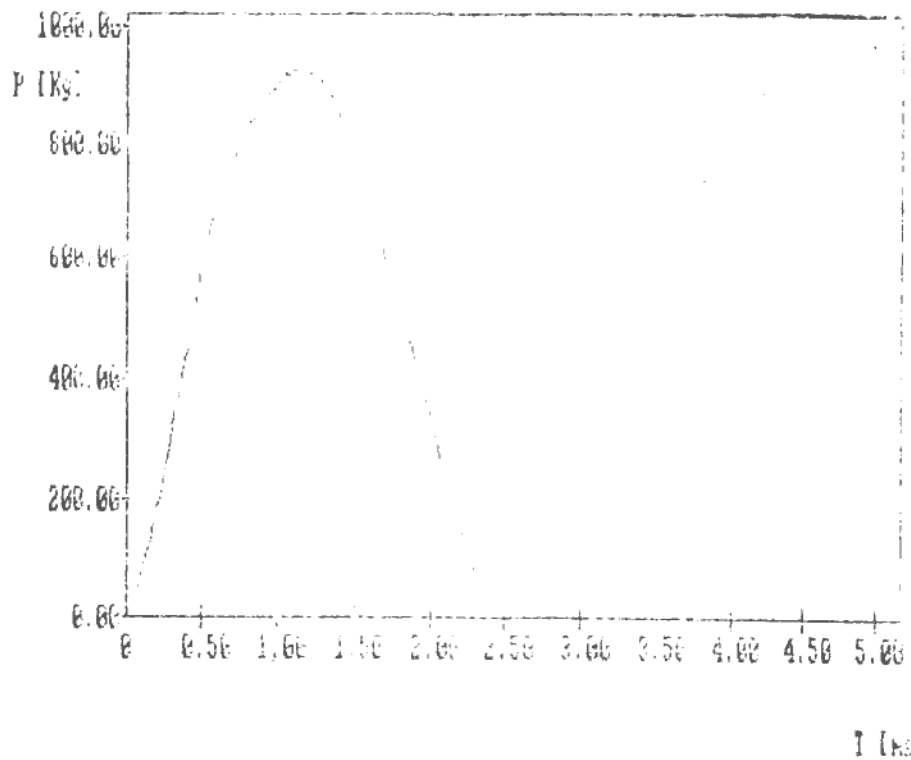


Figura 4-11: Carga vs tiempo ensayo de golpe débil (luego de discretización)

A partir de la expresión (4-15), es posible obtener el valor instantáneo de desplazamiento total $V_t(i)$, de manera de generar el correspondiente diagrama P vs V (figura 4-12).

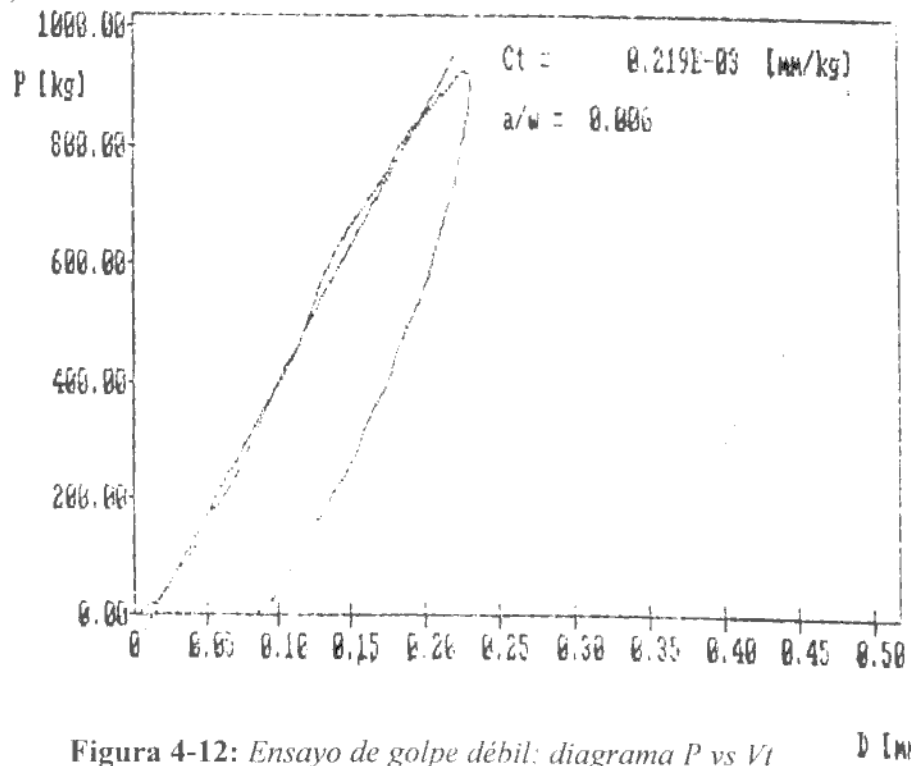


Figura 4-12: Ensayo de golpe débil: diagrama P vs V_t D [mm]

A partir del diagrama P vs V_t , el valor de compliancia de la máquina total C_t puede obtenerse ajustando por mínimos cuadrados la parte lineal de la curva. En la práctica se

promediaron los valores de C_t obtenidos de considerar la parte ascendente y la descendente de la curva. De esta manera se obtuvo:

$$C_t = 2.19 \times 10^{-4} \text{ mm/kg} \quad 4-26$$

Aplicando la expresión (4-23), se obtiene finalmente

$$C_m = C_t - C_s = 2.19 \times 10^{-4} \text{ mm/kg} - 8.81 \times 10^{-5} \text{ mm/kg}$$

$$\underline{C_m = 1.31 \times 10^{-4} \text{ mm/kg}} \quad 4-27$$

Métodos alternativos para la determinación de C_m

a) A través de la igualación de las contribuciones elástica de la máquina y de la probeta:

$$E_o = \frac{1}{2} P_m V_m + \frac{1}{2} P_m V_s \quad 4-28$$

donde E_o es la energía elástica total y P_m es la carga máxima alcanzada. E_o puede expresarse, en el rango elástico, como:

$$E_o = \frac{1}{2} P_m^2 (C_m + C_s) \quad 4-29$$

por lo tanto,

$$C_m = 2 E_o / P_m^2 - C_s$$

En nuestro caso (Tabla I) $E_o = 0.82 \text{ J}$ y $P_m = 930 \text{ kg}$ (figura 4-11), con lo que se obtiene:

$$\underline{C_m = 1.051 \times 10^{-4} \text{ mm/kg}} \quad 4-30$$

b) La otra alternativa consiste en considerar a la interacción entre el martillo y la probeta como una masa vibrante sobre un resorte, de manera tal que el registro carga - tiempo constituya media oscilación del sistema. El tiempo t de este $\frac{1}{2}$ ciclo está dado por:

$$t = \pi \cdot (m C)^{1/2} \quad 4-31$$

es decir,

$$t = \pi \cdot (m C_m + m C_s)^{1/2}$$

reordenando,

$$C_m = g / \rho_{\omega} (t / \pi)^2 - C_s \quad 4-32$$

donde $\rho_{\omega} = 27.22 \text{ kg}$
 $g = 9.81 \text{ m/seg}^2$

con lo cual,

$$C_m = 1.31 \times 10^{-4} \text{ mm/kg} \quad 4-33$$

A fin de considerar un valor único de C_m , se toma el valor promedio de los obtenidos de acuerdo a los tres métodos descriptos (4-27, 4-30 y 4-33). Se asume entonces, para los cálculos posteriores, un valor de C_m de:

$$C_m = 1.22 \times 10^{-4} \text{ mm/kg} \quad 4-34$$

4.4.2.2. Compliancia de la probeta

Los métodos utilizados para la determinación de parámetros fractomecánicos a partir del registro carga - desplazamiento, exigen la determinación de la compliancia de la probeta. En el caso lineal elástico, los valores de J y K están relacionados a través de la expresión⁽¹⁾:

$$J = G = (1 - \nu^2) K^2 / E \quad 4-35$$

De acuerdo a ASTM E399, para una probeta de flexión en tres puntos el valor de C_s puede determinarse a partir de la siguiente expresión teórica para el caso estático:

$$C_s E B = 2.0475 a (W - a) Y^2 \times l^2 / W^4 \quad 4-36$$

donde

$Y = 1.93 - 3.07 (a/W) + 14.53 (a/W)^2 - 25.11 (a/W)^3 + 25.8 (a/W)^4$
 $a =$ longitud de fisura
 $W =$ ancho probeta
 $B =$ espesor de probeta

Por otra parte, Bucci et al⁽³⁴⁾ propuso la siguiente relación, también para el caso estático:

$$C_s E B = \frac{0.24 l^3}{W^3} \left\{ 1.04 + 32.8 \left(\frac{W}{l} \right)^2 (1 + \nu) \right\} + \frac{2 l^2 (1 - \nu^2)}{W^2} \times Y \quad 4-37$$

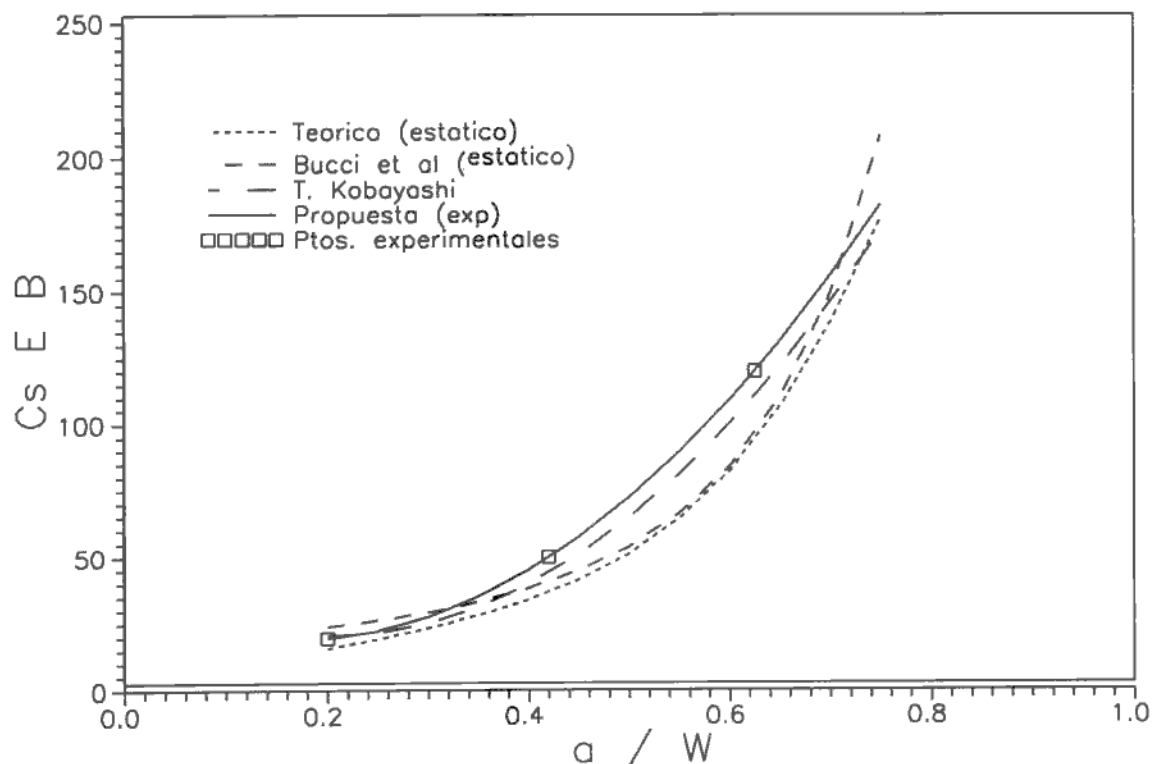


Figura 4-16: *Compliancia probeta Charpy en función de a/W*

La representación gráfica permite observar que tanto la expresión propia (4-40) como la de T. Kobayashi (4-38) entregan valores de compliancia levemente superiores a los obtenidos de la aproximación teórica (4-36) y la de Bucci et al (4-37), ambas para el caso estático. Se aprecia una muy buena correspondencia entre la expresión obtenida experimentalmente y la que presentara Kobayashi. Por lo tanto, dada la similitud de probetas y método experimental, se adopta para los futuros cálculos la expresión obtenida experimentalmente (expresión (4-40)).

Rango de validez de la función de compliancia C_s

No es posible establecer a priori si el valor de compliancia determinado es independiente o no de la velocidad de deformación. En tal sentido, T. Kobayashi^(34,11) realizó experiencias evaluando la compliancia elástica para distintas velocidades de impacto. La figura 4-17 muestra el resultado obtenido, para una relación $a/W = 0.6$. Puede apreciarse que el valor de compliancia se mantiene estable para velocidades de impacto entre 1 y 4 m/s, mientras que se presentan variaciones para velocidades entre 0 (estático) y 1 m/s. Esto se da tanto para la compliancia de máquina (C_m) como de la compliancia de la probeta (C_s).

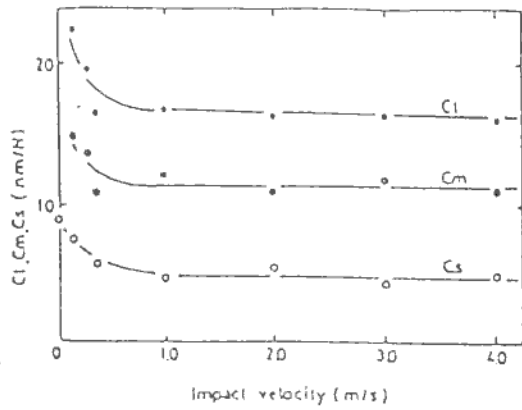


Fig.2: Relationship between impact velocity and compliances, C_t , C_m , and C_s . (Unnotched specimen)

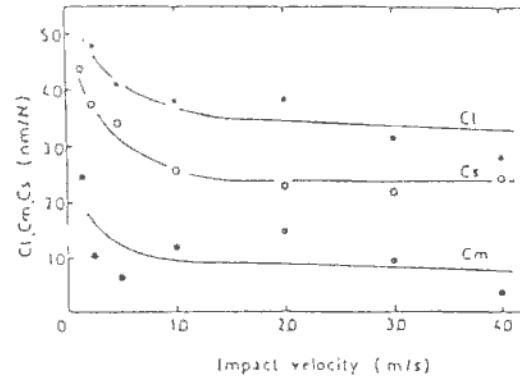


Fig.3: Relationship between impact velocity and compliances, C_t , C_m , and C_s . (Notched specimen: $a/W=0.6$)

Figura 4-17: Relación entre compliancias y velocidad de impacto (de (11))

Dado que en las experiencias realizadas en el presente trabajo se utilizaron velocidades de impacto entre 1 y 4 m/s, se considera que los resultados obtenidos por Kobayashi confirman la validez de la expresión (4-40) sin necesidad de corrección por velocidad.

4.4.3. Ensayo detenido compulsivamente (stop block test)

El principal problema a resolver en los ensayos con stop block, consistió en el hecho de que se disponía sólo de capacidad para obtener registros carga - tiempo. Por lo tanto, el desplazamiento máximo del punto de aplicación de la carga (aquel que se relacionará con la longitud de fisura final medida) no aparece definido en el diagrama, y debe ser inferido a través de estimación teórica. La figura 4-18 muestra la fotografía instantánea obtenida del osciloscopio de dos ensayos típicos realizado con el stop block:

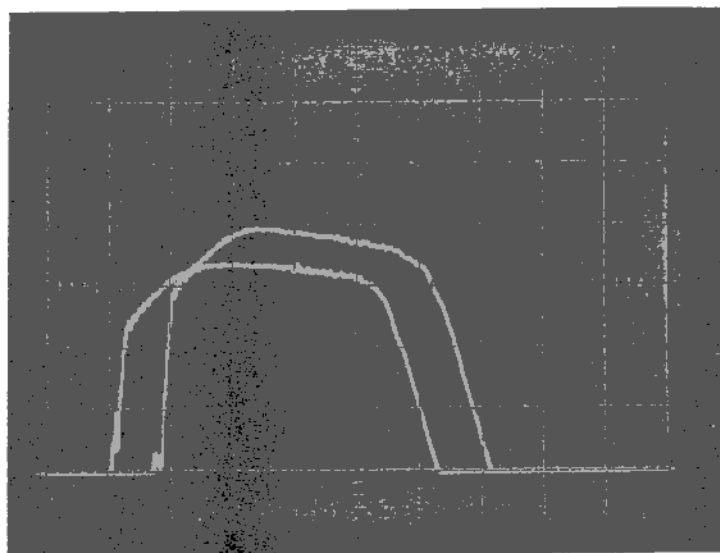


Figura 4-18: Ensayos típicos con stop block

Se aprecia que no es posible establecer de manera unívoca el punto de desplazamiento máximo del diagrama carga - tiempo. En algún momento del evento, el péndulo contacta con el stop block. Se produce entonces un incremento brusco de la carga de oposición al desplazamiento del péndulo (no registrada por la celda de carga, pues se aplica sobre la estructura del péndulo y no a través de la probeta). Luego de un desplazamiento muy limitado, el péndulo se detiene, retornando luego por efecto de la elasticidad del conjunto péndulo - stop block - probeta. La figura 4-19 muestra un esquema del registro carga - tiempo obtenido en el ensayo con stop block (comparar con figura 4-18):

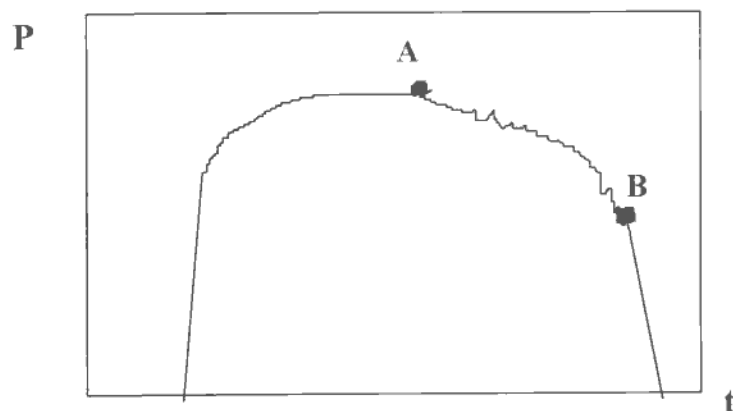


Figura 4-19: Esquema típico ensayo con stop block

En principio se distingue una zona entre dos puntos A y B donde es posible apreciar la presencia de una pequeña oscilación superimpuesta al registro carga - tiempo. Comparando los datos de los distintos ensayos realizados, se observó que esta zona tenía una duración aproximadamente constante (2.1 ms), con lo cual se estableció como hipótesis que la misma corresponde al momento de interacción entre el péndulo y el stop block. Con esta hipótesis es razonable que la duración del contacto presente un período similar para los distintos ensayos, ya que el mismo depende de las compliancias (o rigidez) del péndulo y del stop block utilizado.

Para obtener el registro carga - desplazamiento, que es la información mínima necesaria para obtener el valor de carga aplicada, utilizamos en principio el procedimiento habitual ya planteado (punto 4.3) partimos de la expresión para el cambio de velocidad (4-12):

$$\delta v = \frac{1}{m} \int P dt$$

Luego, con los datos discretizados del ensayo se obtenía la velocidad instantánea, el desplazamiento total y el desplazamiento del punto de aplicación de la carga a través de las expresiones 4-13, 4-15 y 4-17:

$$v(i) = v(i-1) - \frac{(P(i) + P(i-1)) \cdot (t(i) - t(i-1))}{2m}$$

$$t(i) = Vt(i-1) + \frac{(v(i) + v(i-1)) \cdot (t(i) - t(i-1))}{2}$$

$$F_s(i) = Vt(i) - P(i) \times Cm$$

El procedimiento descrito sólo puede ser aplicado hasta el punto A (inicio del contacto con el stop block). A partir de este punto y hasta el punto B, el péndulo se encontrará en contacto con el stop block, por lo que la carga real que actúa sobre el péndulo será la suma de la reacción de la probeta sobre ésta más la reacción del stop block. La primer reacción es conocida (corresponde a la carga registrada por la instrumentación), mientras que la segunda no lo es. Por tal motivo, se debe recurrir a una nueva hipótesis de trabajo:

Si se asume que el stop block se comportará de manera elástica, este será capaz de absorber la energía remanente del péndulo sin generar deformaciones permanentes. Por lo tanto, es posible estimar la forma en que varía la carga que absorbe. Si modelamos este comportamiento como un sistema masa - resorte, la carga absorbida por el stop block responderá a una ley de variación del tipo senoidal, como se puede apreciar en la figura 4-20:

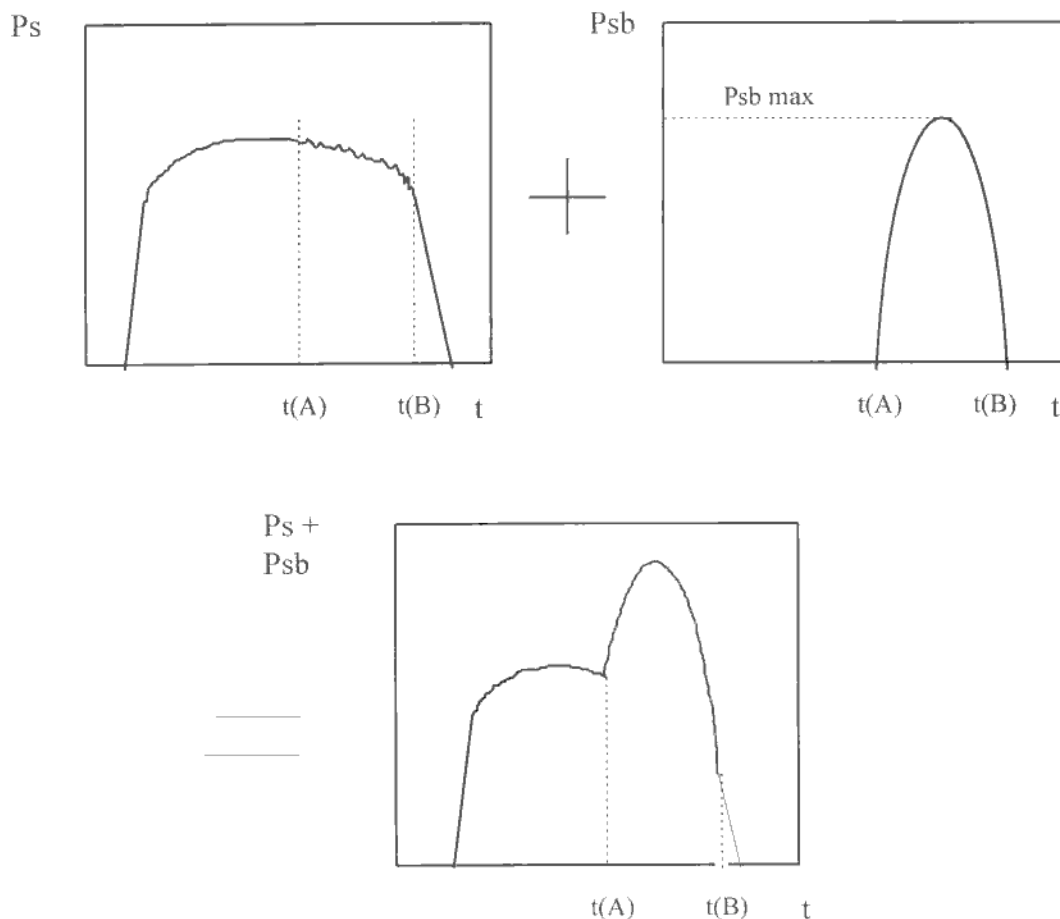


Figura 4-20: Componentes de la fuerza total sobre el péndulo

En la figura, Psb_{max} corresponde a la fuerza máxima absorbida por el stop block. La distribución de carga sobre el stop block en el tiempo puede ser representada a partir de:

$$Psb(i) = Psb_{MAX} \times Sen \left[\frac{(t(i) - t(A))}{(t(B) - t(A))} \times \pi \right] \quad 4-41$$

Por otra parte, la compliancia total del sistema (C_t) péndulo - stop block se puede obtener a partir de la expresión:

$$t = \pi(MC_t)^{\frac{1}{2}} \quad 4-42$$

donde t es el tiempo de interacción, estimado en 2.1 ms, y M es la masa efectiva del péndulo.

$$C_t = C_{sb} + C_m$$

Con $t = 2.1$ ms; $C_m = 1.22 \times 10^{-4}$ mm/kg, se obtiene

$$C_{sb} = 3.903 \times 10^{-5} \text{ mm/kg} \quad 4-43$$

Una hipótesis adicional que se considera, es que la velocidad del péndulo se hace cero en el punto medio entre A y B. Esta hipótesis se considera razonable, ya que la variación de velocidad también responde aproximadamente a una $\frac{1}{2}$ forma de onda sinusoidal. Por lo tanto, es posible estimar:

$$v \left(\frac{(t(A) + t(B))}{2} \right) = v(A) - \frac{1}{m} \int_{t(A)}^{(t(A)+t(B))/2} P(t) dt = 0 \quad 4-44$$

donde $P(t)$ está dado por la suma de la carga aplicada por el stop block y por la probeta,

$$P(t) = Psb(t) + p(t) \quad 4-45$$

luego,

$$v(A) - \frac{1}{m} \int \left[P_{sb_{MAX}} \operatorname{sen} \left(\pi \frac{(t(t) - t(A))}{(t(B) - t(A))} \right) + P(t) \right] dt = 0 \quad 4-46$$

$$\Rightarrow v(A) - \frac{P_{sb_{MAX}}}{m} \int \operatorname{sen} \left(\pi \frac{(t(t) - t(A))}{(t(B) - t(A))} \right) dt - \frac{1}{m} \int P(t) dt = 0 \quad 4-47$$

$$\Rightarrow -\frac{P_{sb_{MAX}}}{m} \cos \left(\pi \frac{(t(t) - t(A))}{(t(B) - t(A))} \right)_{t(A)}^{(t(A)+t(B))/2} = v(A) - \frac{1}{m} \int P(t) dt = C$$

$$\Rightarrow \frac{1}{m} P_{sb_{MAX}} [0 + 1] \frac{1}{\pi} = C \quad 4-48$$

$$\Rightarrow \boxed{P_{sb_{MAX}} = \frac{C \times m \times \pi}{t(B) - t(A)}} \quad 4-49$$

De esta manera es posible estimar el valor de $P_{sb_{MAX}}$ (carga máxima aplicada sobre el péndulo por el stop block).

La velocidad $v(i)$ durante el impacto con el stop block puede calcularse con la expresión:

$$v(i) = v(i-1) - \frac{1}{m} \int \left[P(i) + P_{sb_{MAX}} \operatorname{sen} \pi \left(\frac{t(t) - t(A)}{t(B) - t(A)} \right) \right] dt \quad 4-50$$

Mientras que el desplazamiento del punto de aplicación de la carga se calcula a partir de:

$$s(i) = Vt(i) - \left[P(i) + P_{sb_{MAX}} \operatorname{sen} \pi \left(\frac{t(i) - t(A)}{t(B) - t(A)} \right) \right] \times Cm \quad 4-51$$

De esta manera se está en condiciones de obtener la curva P vs V a partir de la curva P vs t, para los ensayos realizados con el Stop block. Los ensayos realizados permitieron corroborar la adecuación de la metodología propuesta para generar los registros P vs V. La figura 4-21 muestra el registro original, P vs t, de uno de los ensayos realizados con el stop block. Identificados los puntos A y B, se aplicó la metodología propuesta (expresiones (4-49,4-50 y 4-51) para generar la correspondiente curva P vs V. El resultado puede observarse en la figura 4-22.

Se aprecia que se presenta un punto claramente definido sobre el diagrama P vs V, a partir del cual la carga desciende bruscamente, con una pendiente típica de descarga elástica de la probeta. La forma del diagrama obtenido presenta el típico aspecto del que se obtiene en un ensayo estático donde se registra la información carga - desplazamiento, el cual es detenido en un punto definido y la carga retirada lentamente. El resultado que se obtuvo en los distintos ensayos de stop block realizados presenta un patrón similar al descrito en la figura 4-21, (con distintos desplazamientos máximos). Por tal motivo, se considera que las hipótesis adoptadas son correctas y permiten una determinación satisfactoria del diagrama real carga - desplazamiento (P vs V).

El programa IMPACTO contiene la opción para el tratamiento de los datos de ensayos realizados con el Stop Block.

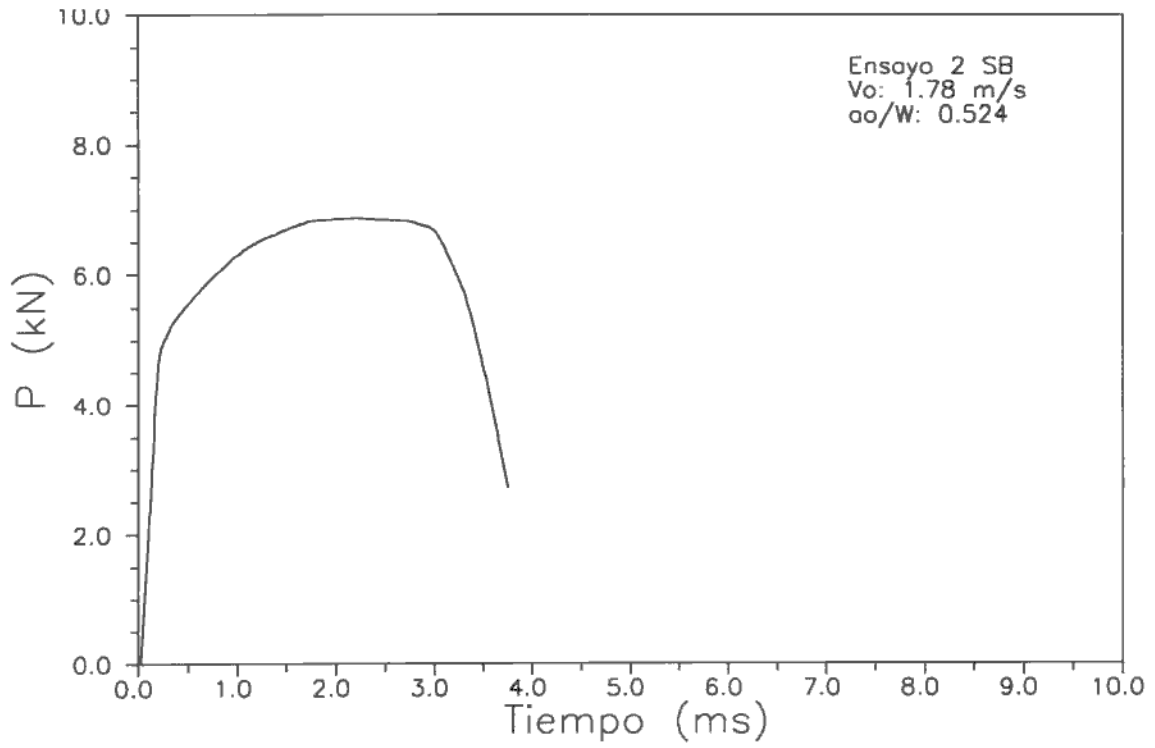


Figura 4-20: Registro original carga - tiempo ensayo con stop block

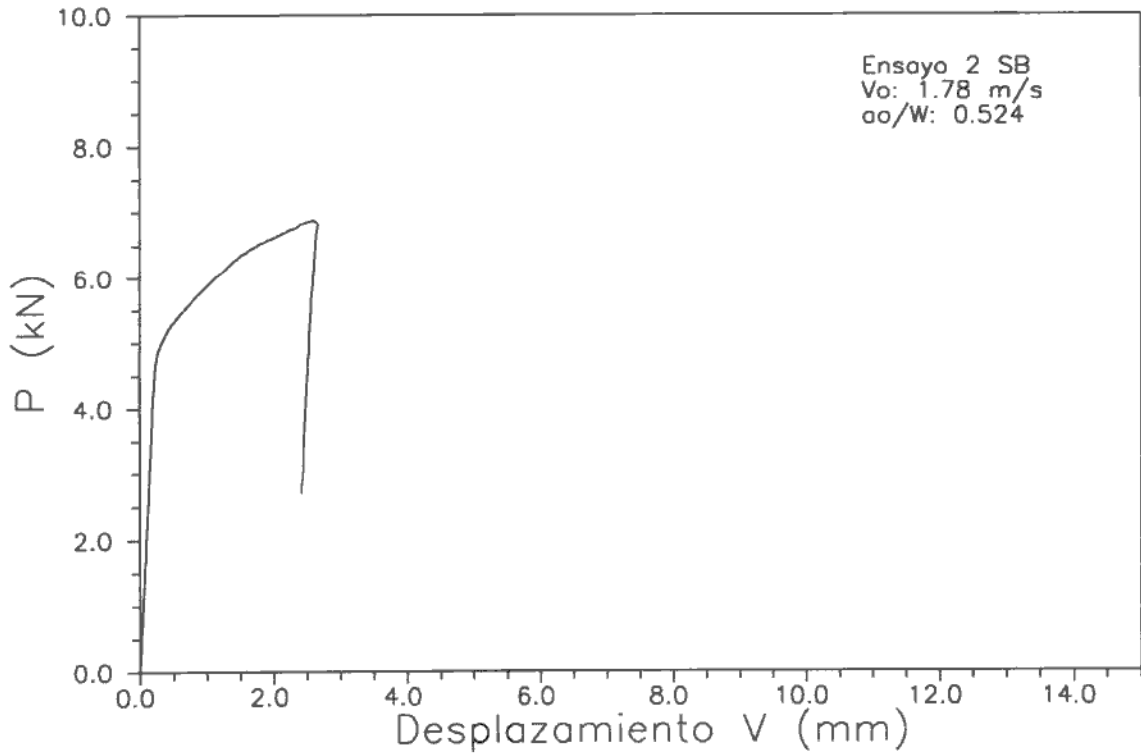


Figura 4-21: Registro P vs V obtenido a partir de P vs t (stop block)

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1. Tratamiento de los datos experimentales

Como ya se mencionara, la información emergente del ensayo consiste en un diagrama P vs t (carga - tiempo), el cual se presenta en forma gráfica en la pantalla del osciloscopio que posee el péndulo. La figura 5-1 muestra un diagrama típico de un ensayo de impacto de una de las probetas Charpy con prefisura.

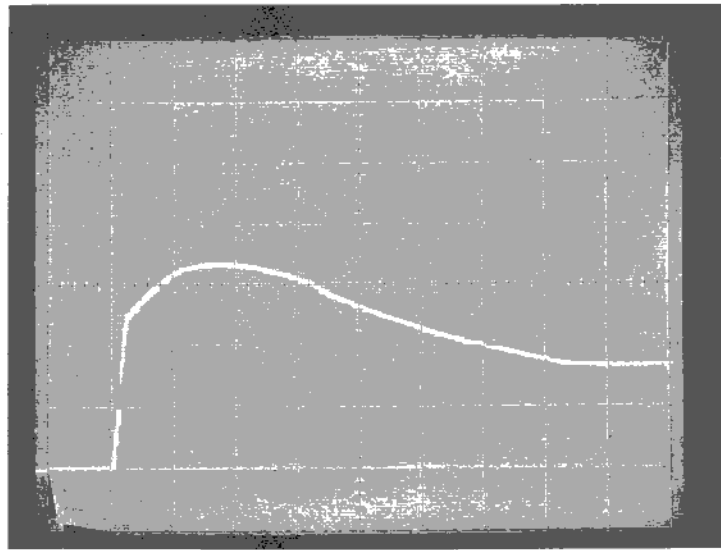


Figura 5-1: *Fotografía osciloscopio ensayo probeta Charpy prefisurada*

A partir de la fotografía (o del calcado de la pantalla), se discretiza la curva en pares P - t , los cuales son almacenados en un archivo de datos utilizando el programa IMPACTO.

Junto con los valores discretos de la curva P vs t , se deben introducir los valores de algunas constantes que se requerirán para los cálculos posteriores:

- . Número de puntos de discretización
- . Velocidad inicial al momento del impacto ($v(0)$)
- . Masa efectiva del péndulo
- . Tiempo inicial ($t(0)$)
- . Compliancia de la máquina (C_m)
- . Profundidad de fisura inicial (a_0).

El primer paso es reproducir el diagrama P vs t . La figura 5-2 muestra este diagrama, el cual se encuentra ahora almacenado en forma digital.

Aplicando la expresión (4 -13), junto con los parámetros correspondientes ya ingresados, es posible obtener a través del programa la variación de velocidad durante el transcurso del impacto. La figura 5-3 muestra el resultado obtenido.

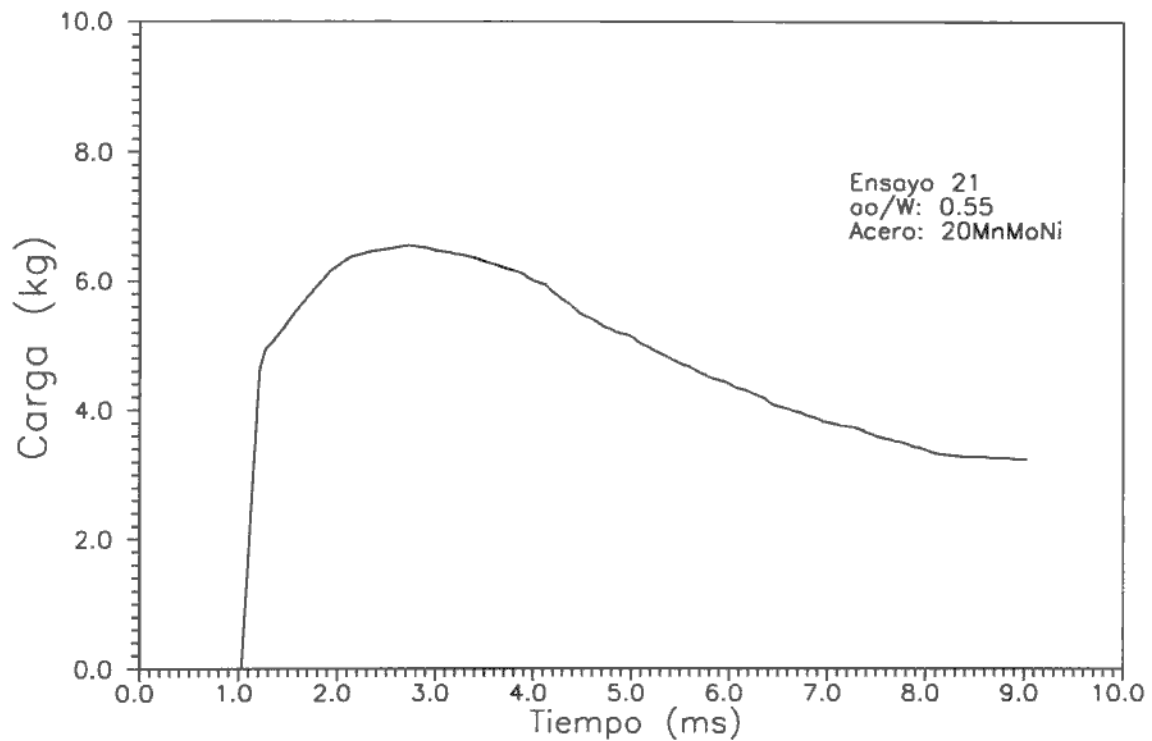


Figura 5-2: Curva P vs t obtenido por discretización de la original (figura 5-1).

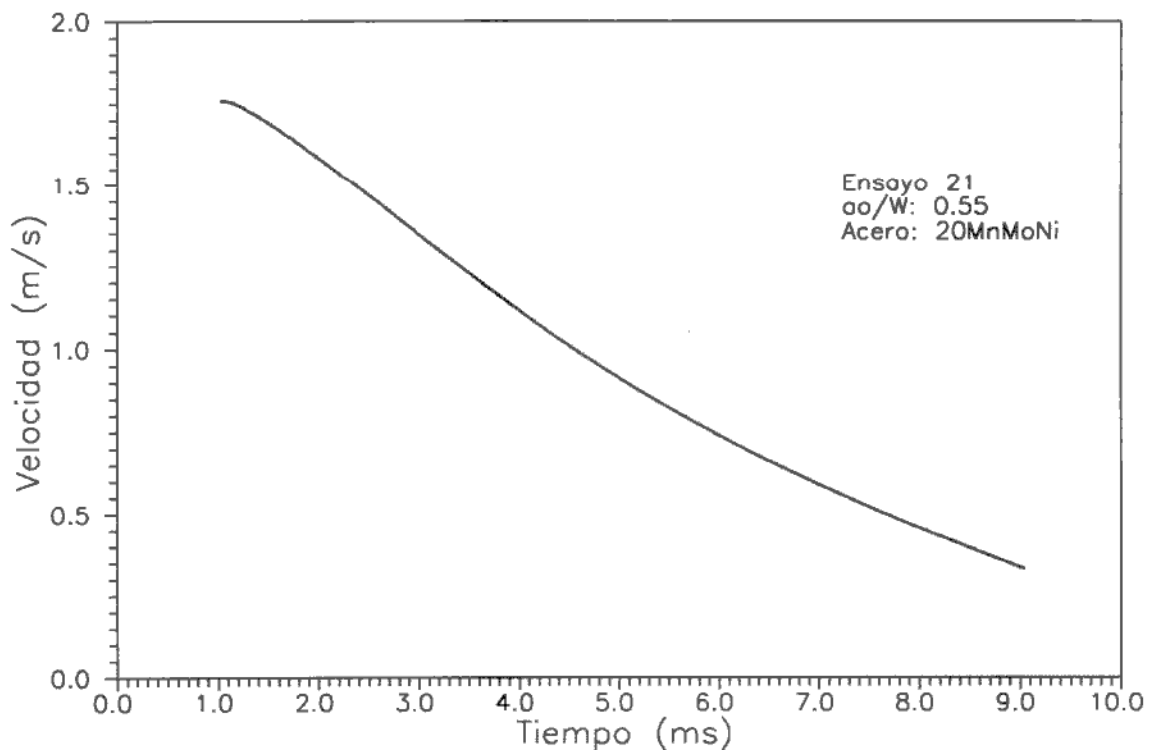


Figura 5-3: Variación de la velocidad del péndulo durante el ensayo

Con la información Carga - tiempo, la velocidad instantánea y la función de compliancia del péndulo, es posible obtener el registro carga - desplazamiento, utilizando la expresión (4-17). La figura 5-4 muestra el registro Carga vs desplazamiento del punto de aplicación de la misma (V), P vs V.

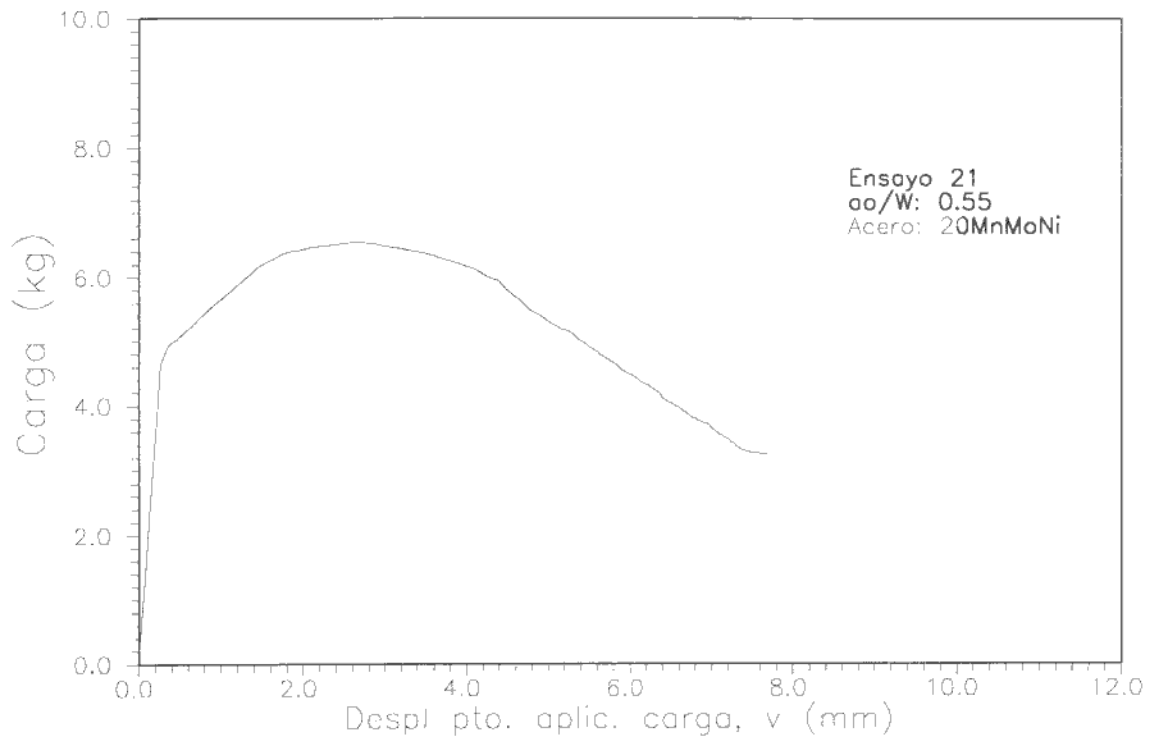


Figura 5-4: Registro P vs v

El registro P vs V constituye la base de cualquier análisis fractomecánico posterior, por lo cual es fundamental su correcta determinación.

A partir de registro P vs V, es posible conocer la energía neta instantánea absorbida por la probeta. La misma se calcula considerando el área bajo la curva P vs v, para todo punto. La figura 5-5 muestra la evolución de la energía absorbida en función del desplazamiento, para el ensayo bajo análisis. Este valor de energía es el que se utilizará posteriormente para la determinación de la integral J.

Una vez determinado el diagrama P vs V, conociendo la expresión de compliancia de la probeta (y el valor de a_0/W) es posible entonces separar las componentes elásticas y plásticas del desplazamiento. Para ello, se aplica la expresión (3-43), obteniendo finalmente el diagrama P vs v_{pl} , figura 5-6.

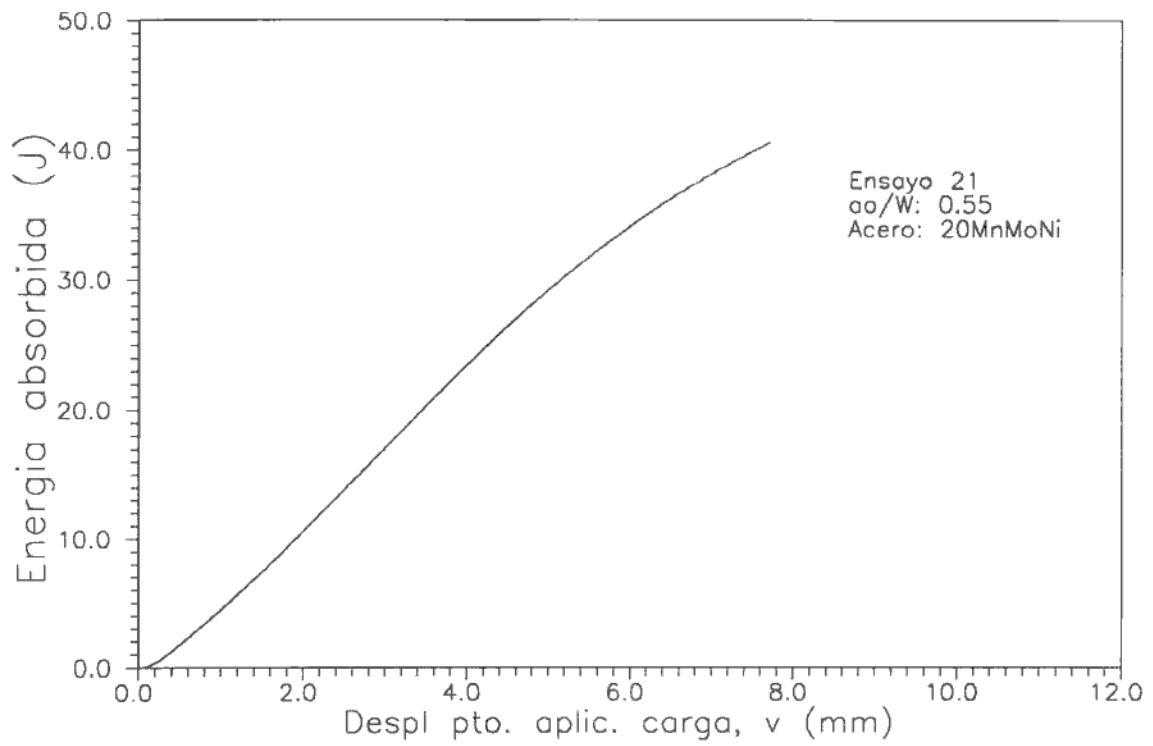


Figura 5-5: *Energía instantánea absorbida vs desplazamiento*

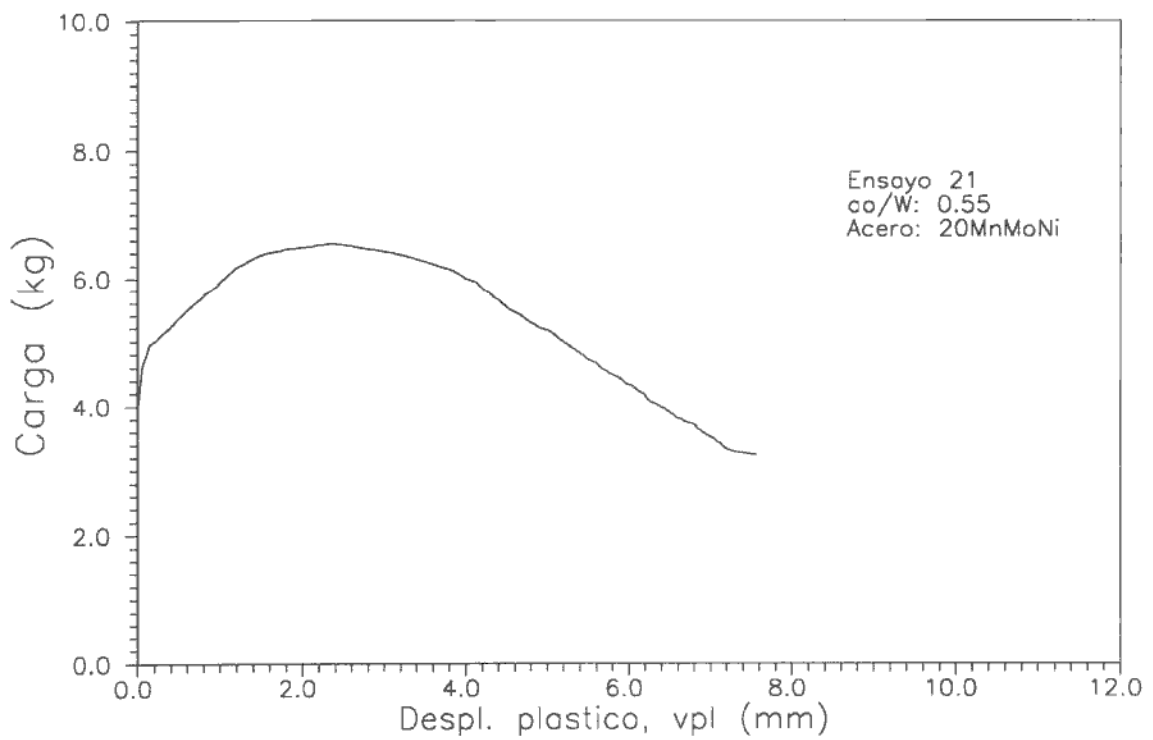


Figura 5-6: *Carga vs desplazamiento plástico, vpl.*

5.2. Determinación del factor η_{pl} - Ensayo probetas “blunt notch”

Se realizaron ensayos de impacto con probetas del tipo “blunt notch” (figura 4-1). Las mismas se mecanizaron con diferentes profundidades de entalla, a fin de cubrir el rango de ensayo donde se pretende garantizar la exactitud del crecimiento estable. La Tabla 5-I muestra las probetas ensayadas, con los a/W objetivo correspondientes.

Probetas	a / W (objetivo)
2	0.45
2	0.50
2	0.55
2	0.60
2	0.65
2	0.70

Tabla 5-I: *Valores objetivo entalla probetas Blunt notch*

Luego del ensayo, el valor inicial de a/W real fue medido cuidadosamente, registrandose el valor real para los cálculos posteriores.

Los ensayos se realizaron utilizando una velocidad de 1.72 m/s, es decir una energía inicial de impacto de 42 J. La escala en tiempo se seleccionó de manera tal de lograr la máxima resolución en la zona de la curva que se extiende desde el inicio hasta la carga máxima.

Las figuras 5-7 y 5-8 muestran los registros Carga vs Tiempo luego de discretizados. La figura 5-7 corresponde a la primera serie de ensayos, mientras que la figura 5-8 corresponde a la segunda serie. En el gráfico se indican los valores reales de a_0/W , medidos luego del ensayo.

Las figuras 5-9 y 5-10 muestran los mismos registros, luego que fueran convertidos a carga - desplazamiento (utilizando la metodología descrita en el punto 4.3).

Las figuras 5-11 y 5-12 presentan los registros P vs v_{pl} , obtenidos luego de separar la componente elástica del desplazamiento (expresión 3-43).

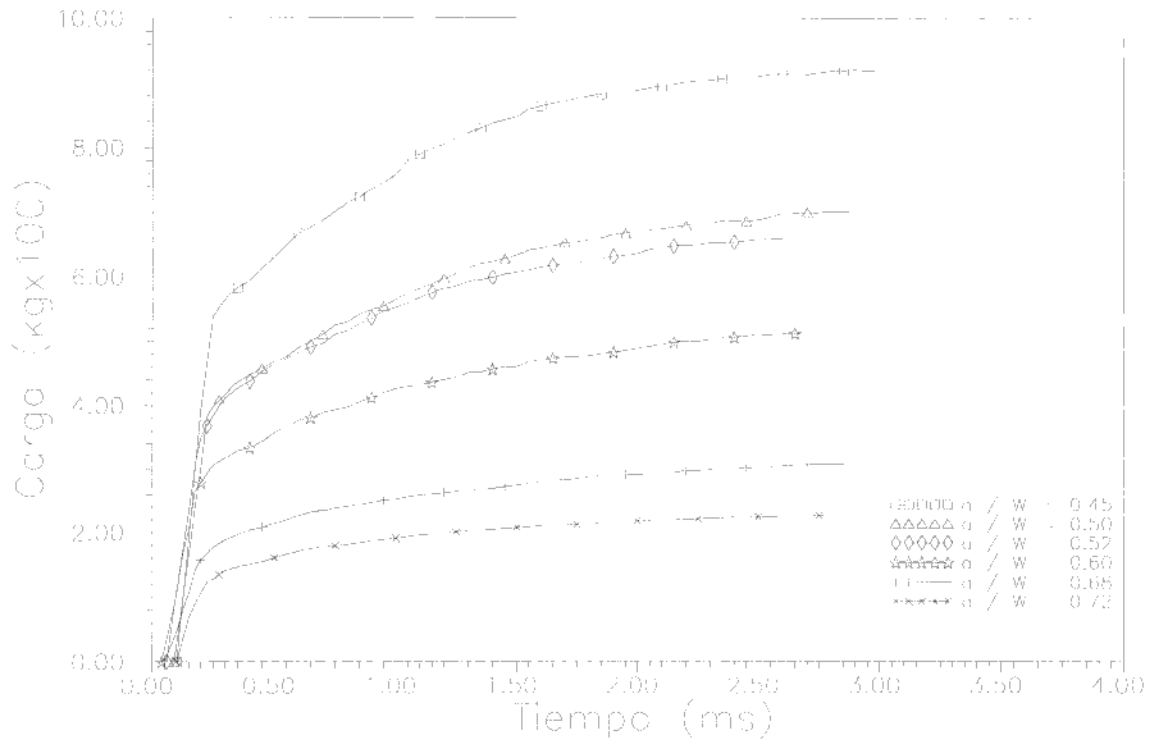


Figura 5-7: Registros P vs t primera serie de ensayos con probetas "blunt notch".

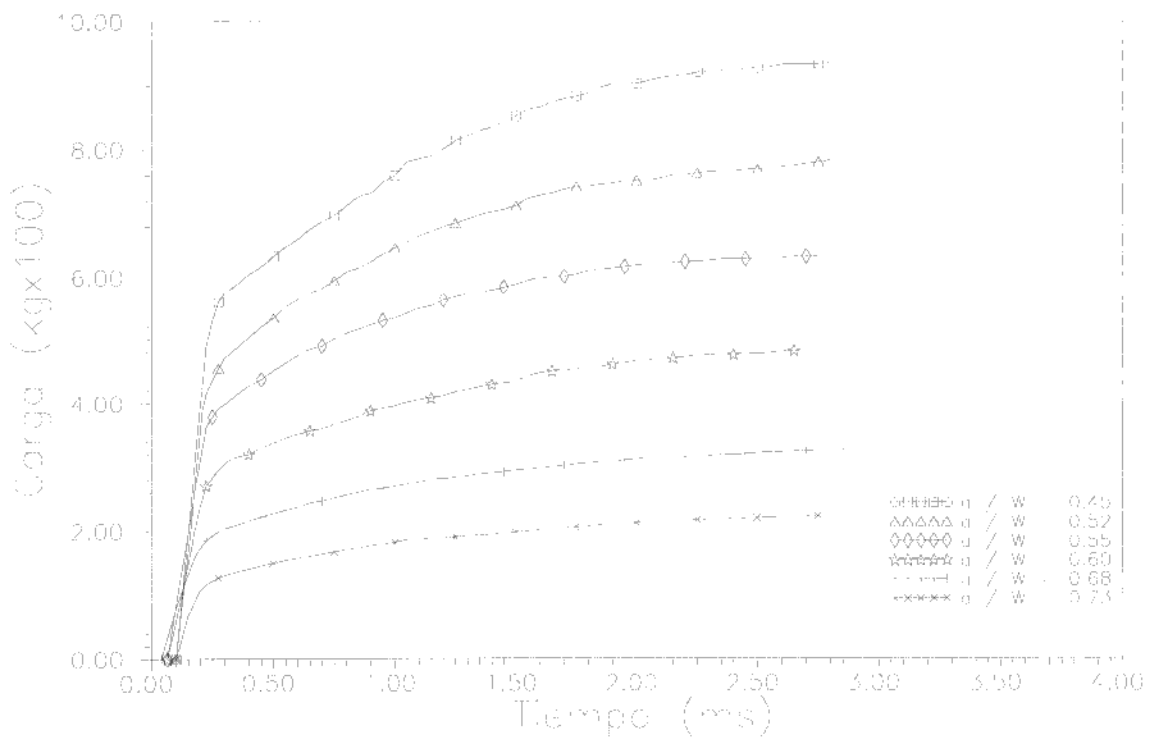


Figura 5-8: Registros P vs t segunda serie de ensayos con probetas "blunt notch".

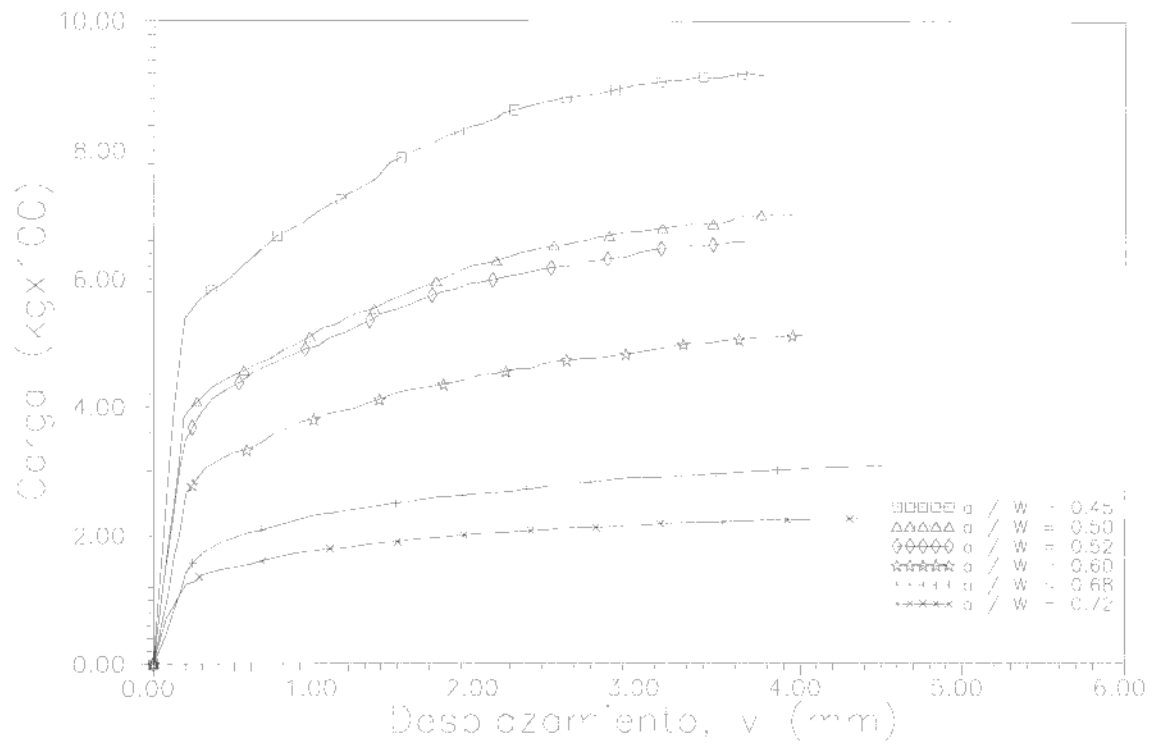


Figura 5-9: Registros P vs v primera serie de ensayos con probetas "blunt notch".

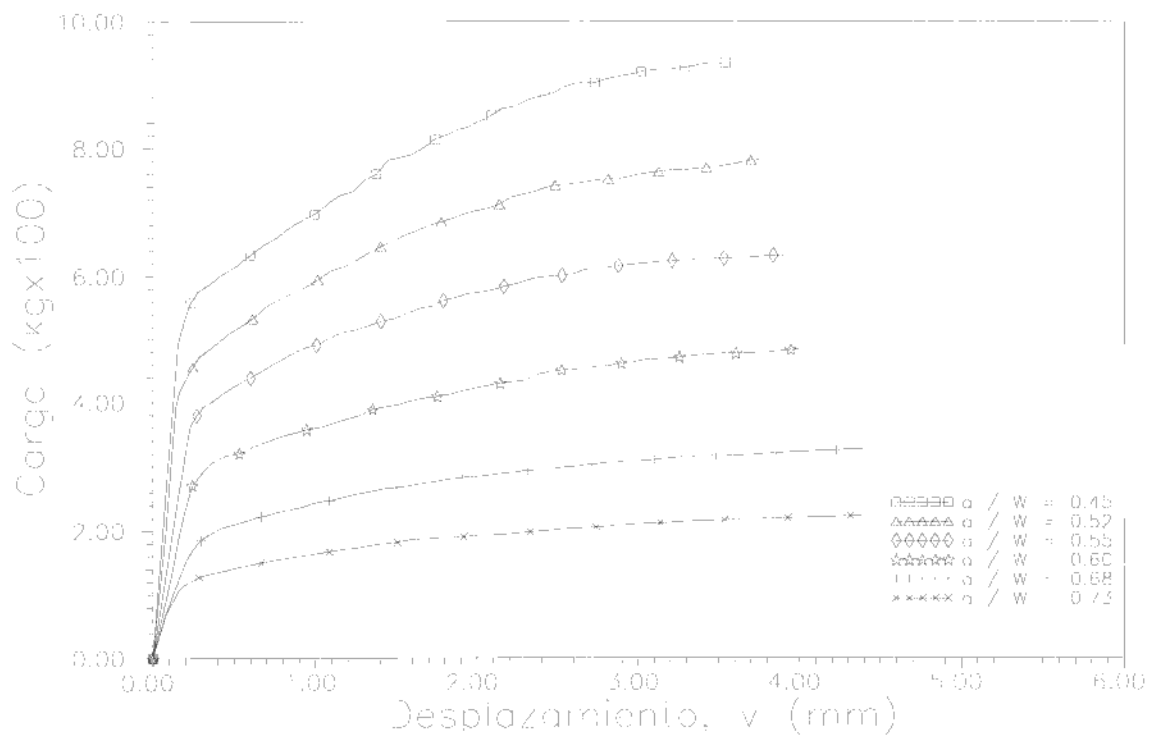


Figura 5-10: Registros P vs v segunda serie de ensayos con probetas "blunt notch".

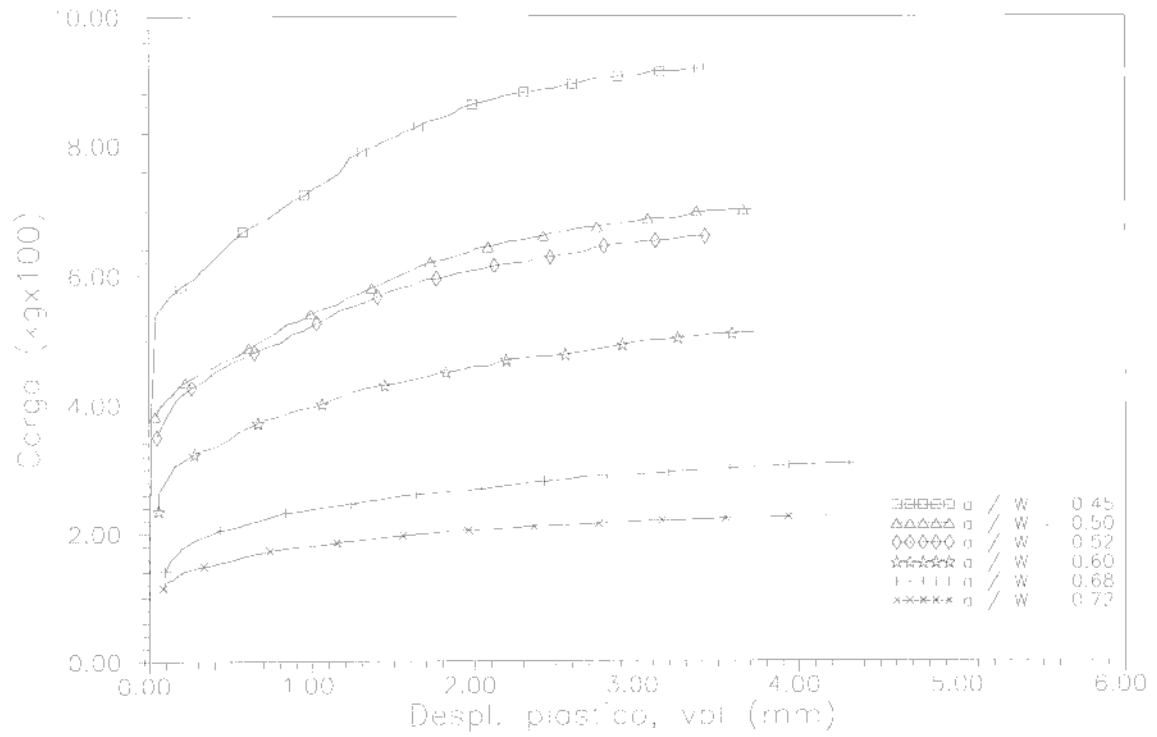


Figura 5-11: Registros *P* vs *vpl* primer serie de ensayos con probetas "blunt notch".

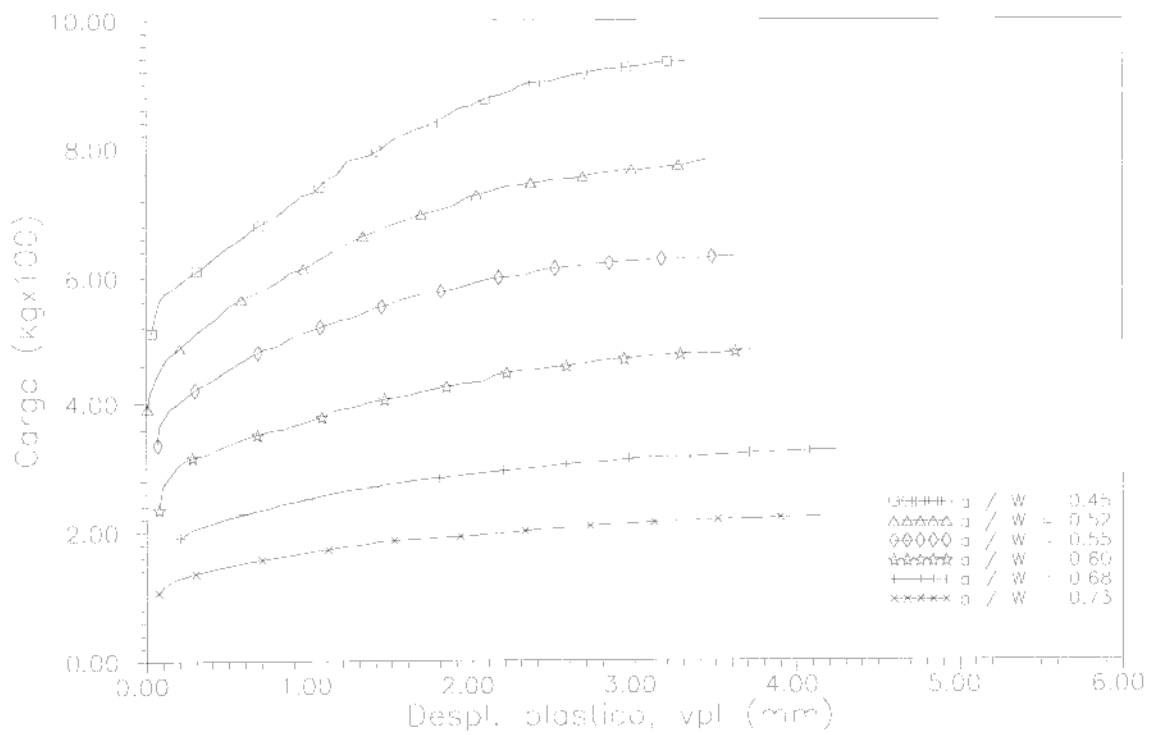


Figura 5-12: Registros *P* vs *vpl* segunda serie de ensayos con probetas "blunt notch".

Con los datos de los registros carga - desplazamiento plástico (P vs v_{pl}), es posible graficar los valores de S_{ij} en función de v_{pl}. Tomando como denominador el gráfico correspondiente a la probeta de relación a_i/W = 0.55, se obtienen las distintas curvas de S_{ij} como P(j) / P(i) para cada a_j y v_{pl}. (ver punto 3.3). La figura 13 muestra los resultados obtenidos.

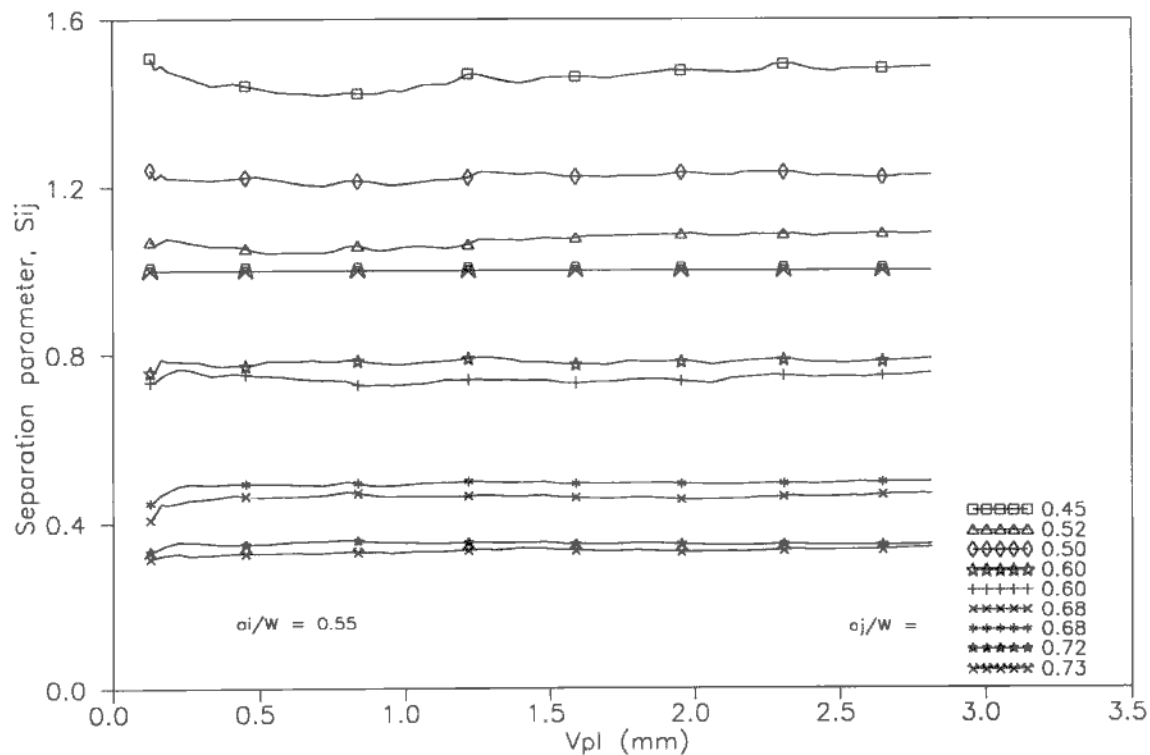


Figura 5-13: S_{ij} vs v_{pl} para las distintas probetas ensayadas.

Se aprecia claramente que las curvas S_{ij} vs v_{pl} presentan un comportamiento prácticamente constante, en todo el rango de relaciones a/W ensayadas. Estos resultados demuestran que la probeta Charpy de dimensiones estandar, con profundidades de fisura entre un 40 y un 75 % del ancho W, verifica el principio de separabilidad de variables que permite la aplicación de la metodología desarrollada para el cómputo de la integral J con una sola probeta.

A fin de verificar el valor del coeficiente η_{pl}, se procedió a obtener por cuadrados mínimos el valor de S_{ij} correspondiente a cada probeta, a fin de representar el mismo en función de b_i / W (o (W-a_i)/W). La figura 5-14 muestra el gráfico S_{ij} vs b_i/W. Se observa que ajusta muy bien con una power law. Se obtiene

$$m = 2.08 = \eta_{pl} \cong 2$$

5-1

Se verifica entonces que el valor de η_{pl} coincide con el correspondiente a la probeta de flexión en tres puntos para carga cuasi - estática (η_{pl} = 2).

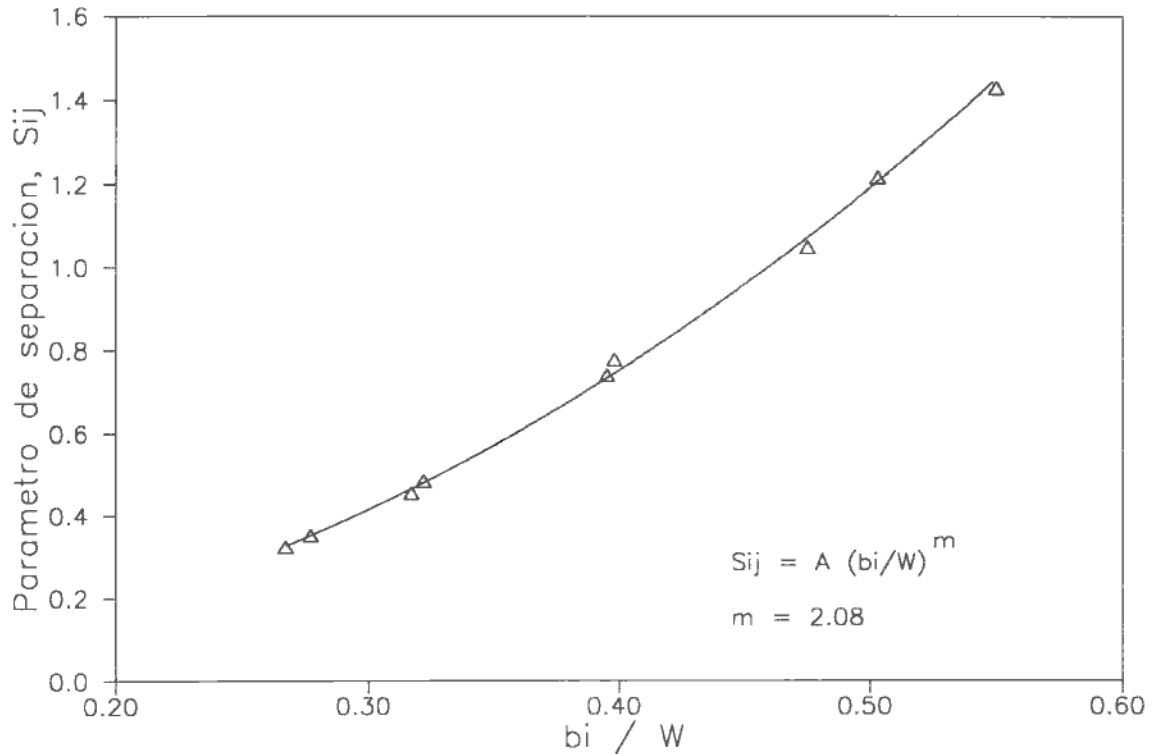


Figura 5-14: S_{ij} vs b_i/W (experimental)

5.3.- Ensayos con el “Stop block” (detenidos compulsivamente)

Con la metodología descrita en los puntos 3.5.1, 4.3.5 y 4.4.3, se realizaron 10 ensayos con probetas prefisuradas por fatiga con distintos desplazamientos máximos del punto de aplicación de la carga. La longitud de fisura inicial objetivo a obtener por fatiga fue de 5 mm ($a/W = 0.5$). El valor real de la prefisura (a_0) se midió luego del ensayo, promediando 5 valores tomados sobre el espesor de la probeta.

Todos los ensayos se realizaron disparando el péndulo desde la posición 4 (Tabla 4-III), es decir con una velocidad de impacto de 1.72 m/s. Luego del ensayo, se realizó un “heat tinting” y se fracturó la probeta totalmente, midiéndose la longitud de fisura alcanzada hasta el impacto con el stop block. Nuevamente, la longitud de fisura final (a_f) se determinó promediando los valores de 5 mediciones en el espesor de la probeta. En este valor se incluye el crecimiento de fisura real y el que puede haberse producido por redondeo del vértice de la fisura.

Las figuras 5-15 a 5-34 muestran los diagramas P vs t y P vs v de las 10 probetas ensayadas. Se distinguen los distintos desplazamientos máximos alcanzados, así como la precisa definición del punto de contacto con el stop block.

La Tabla 5-II resume los valores de longitud de fisura inicial, final, desplazamiento total y energía absorbida calculada para las 10 probetas ensayadas.

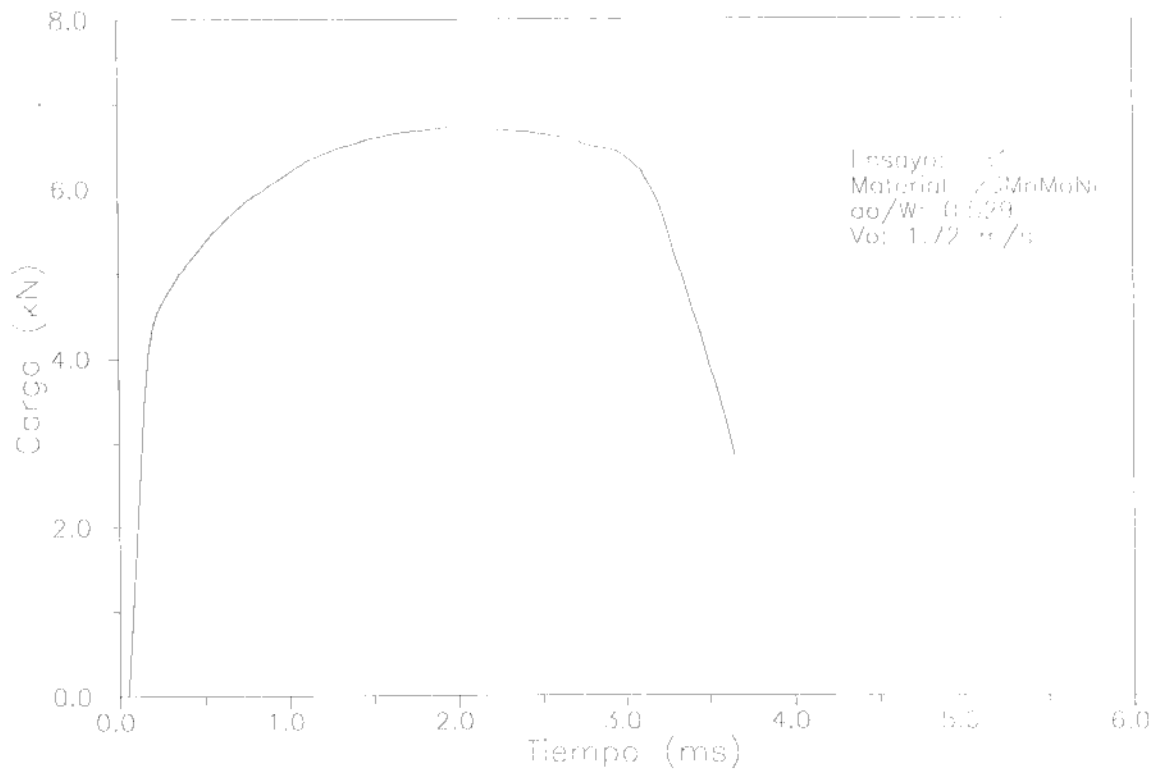


Figura 5-15: Ensayo 1 stop block: P vs t

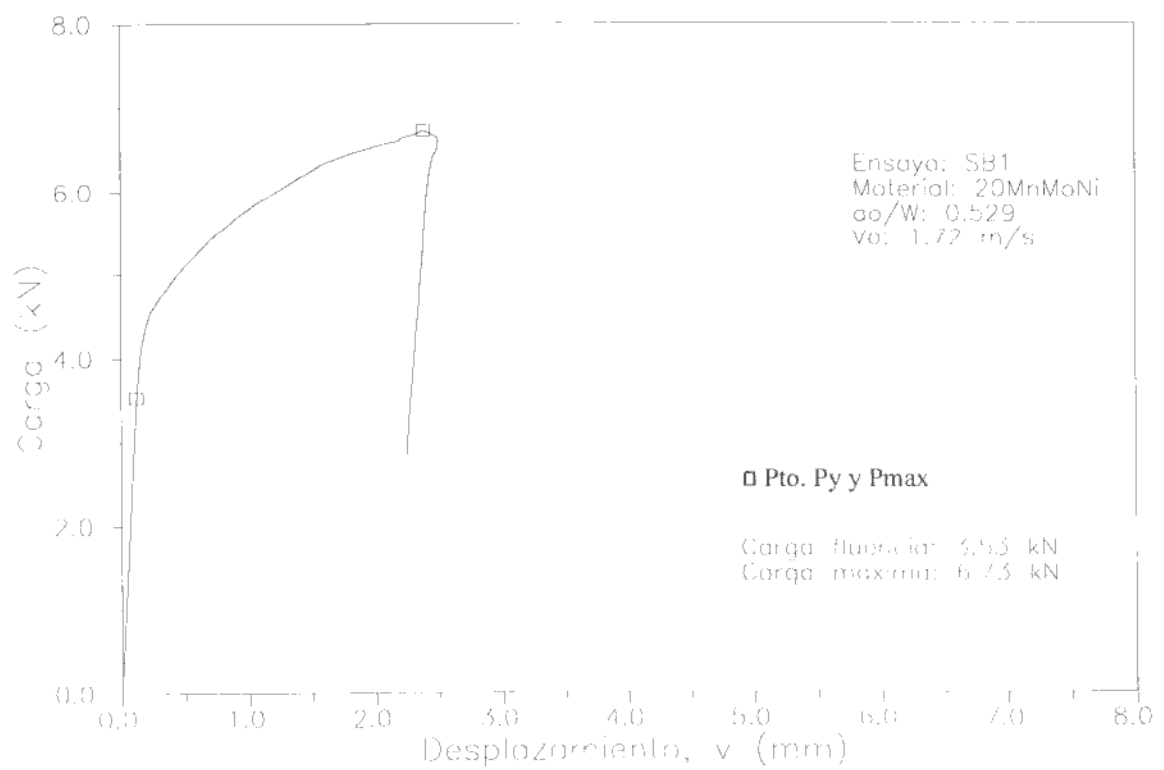


Figura 5-16: Ensayo 1 stop block: P vs v

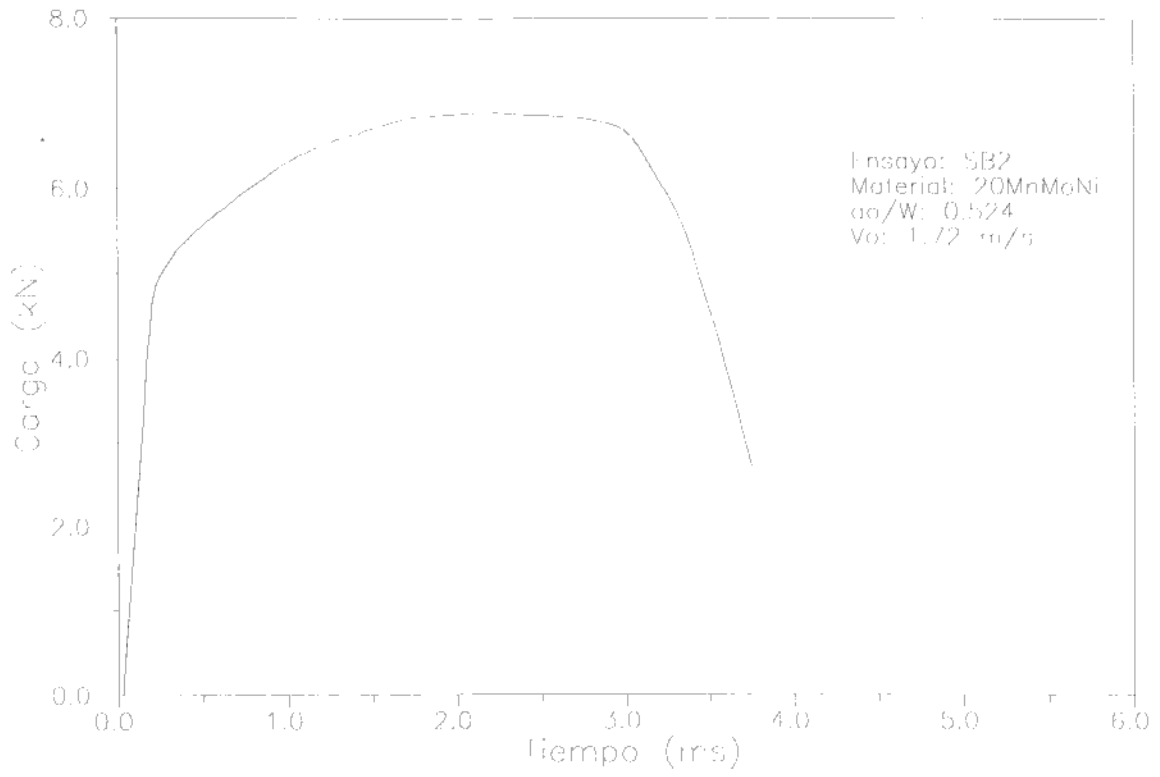


Figura 5-17: Ensayo 2 stop block: P vs t

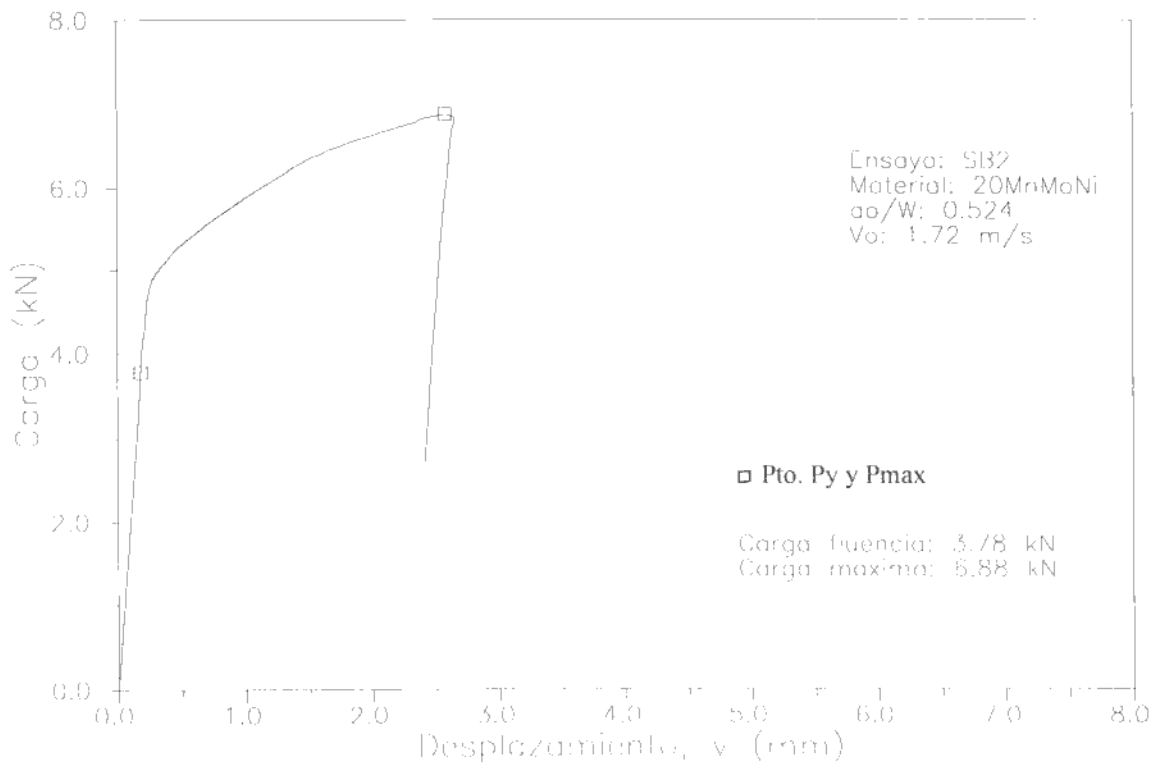


Figura 5-18: Ensayo 2 stop block: P vs v

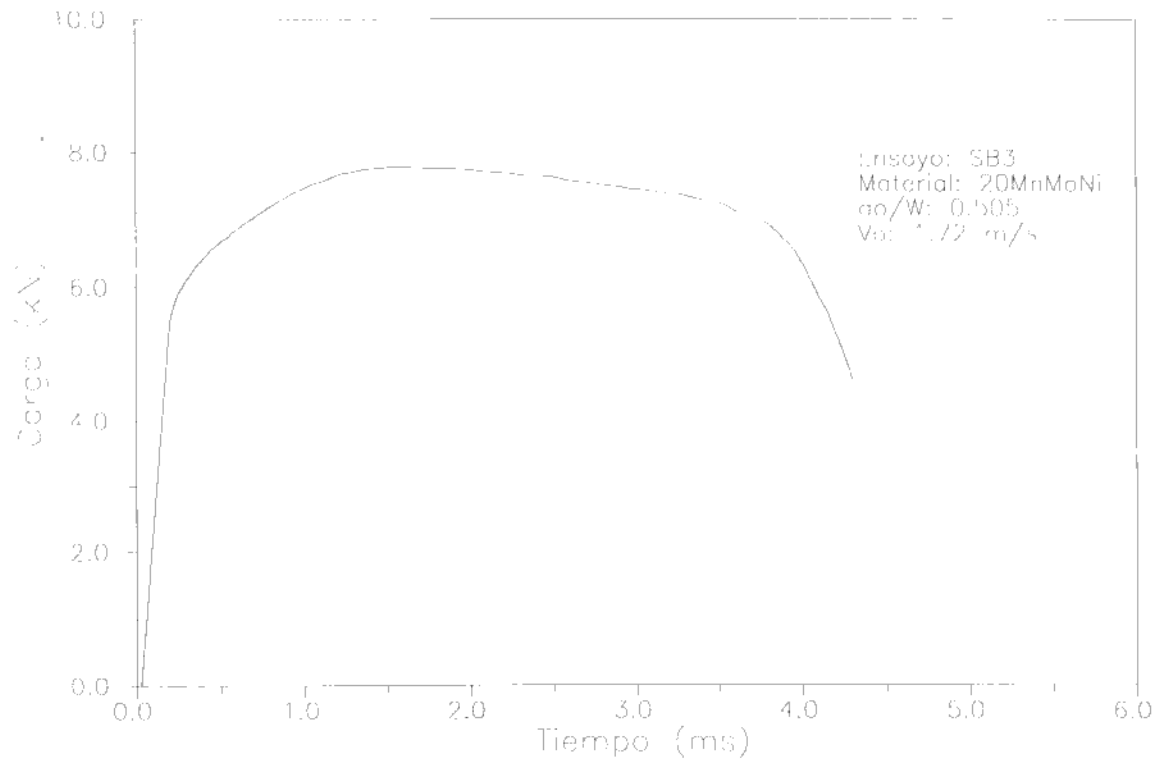


Figura 5-19: Ensayo 3 stop block: P vs t

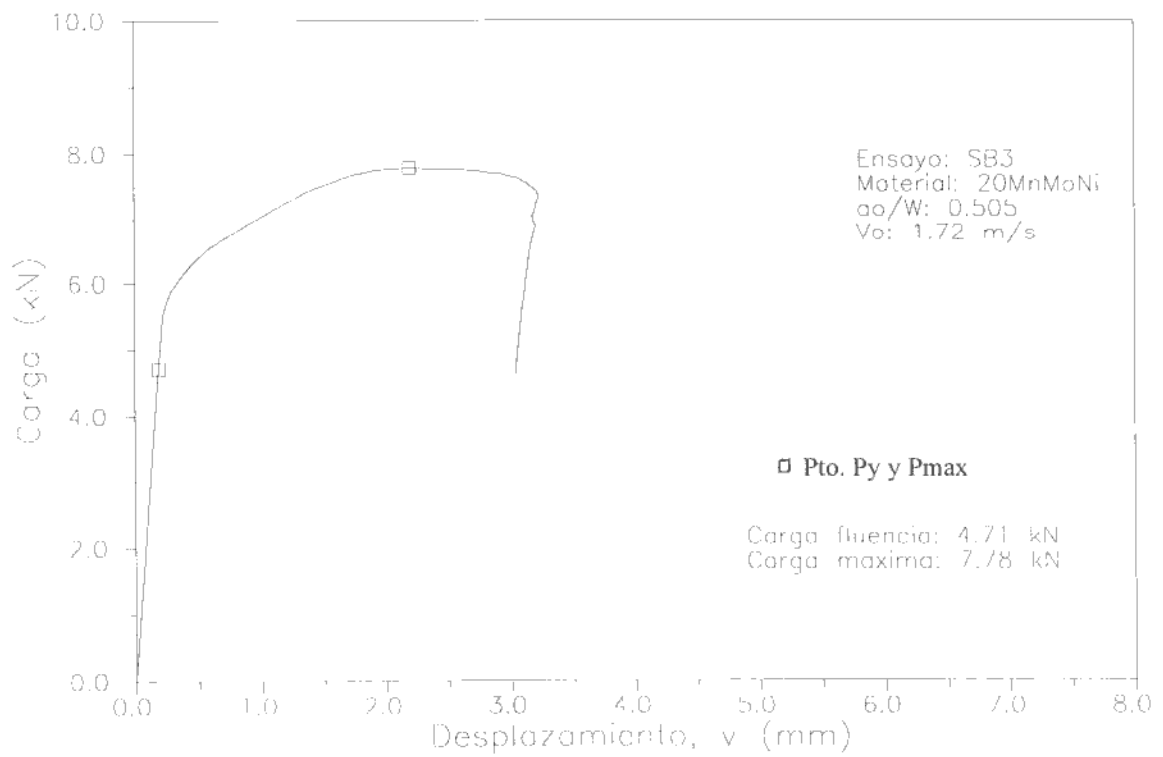


Figura 5-20: Ensayo 3 stop block: P vs v

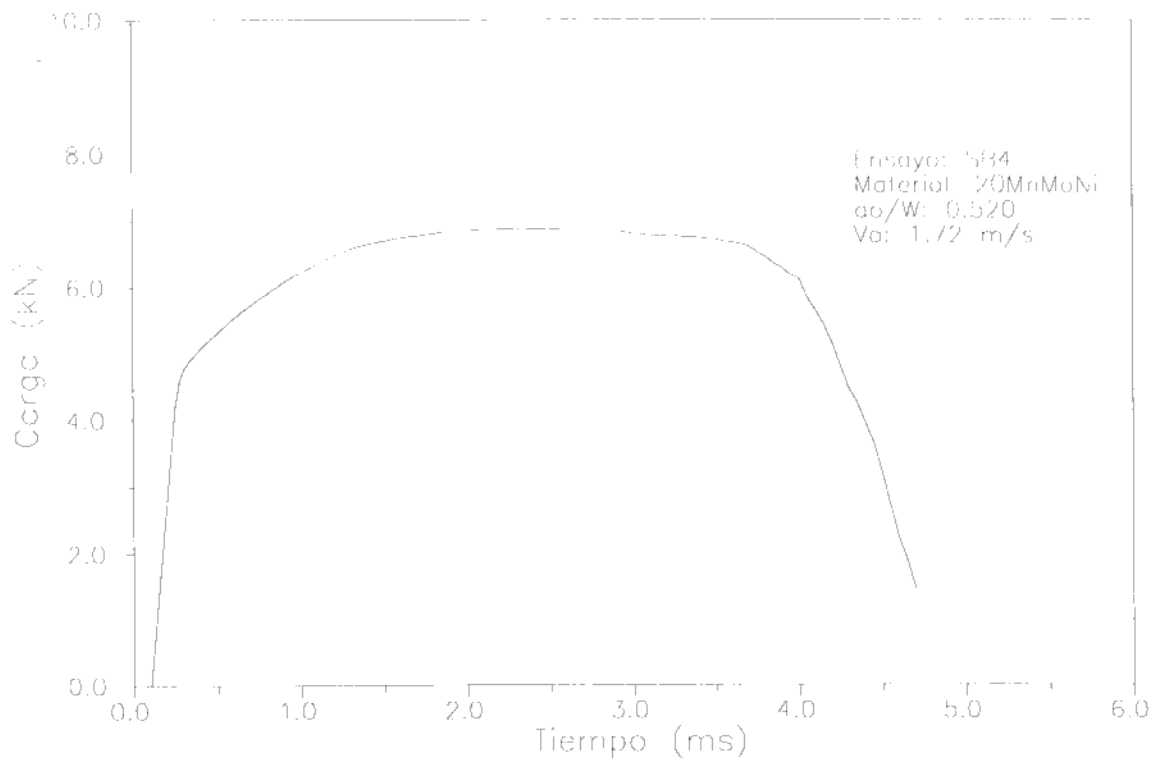


Figura 5-21: Ensayo 4 stop block: P vs t

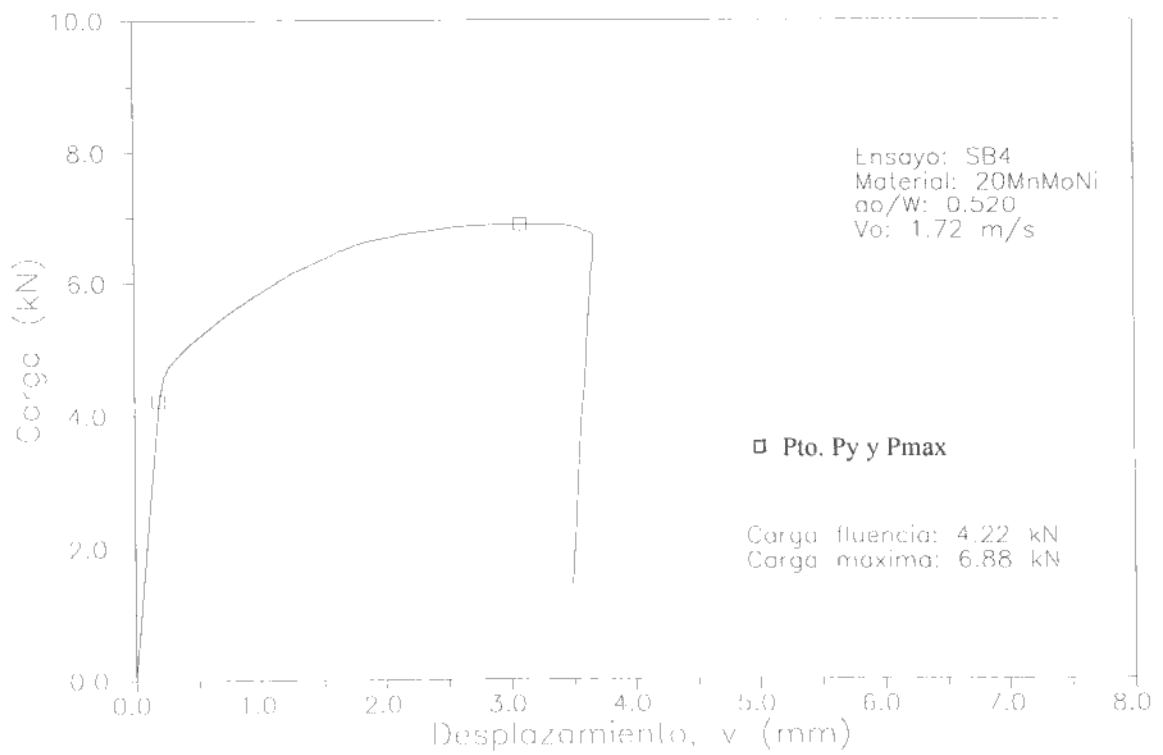


Figura 5-22: Ensayo 4 stop block: P vs v

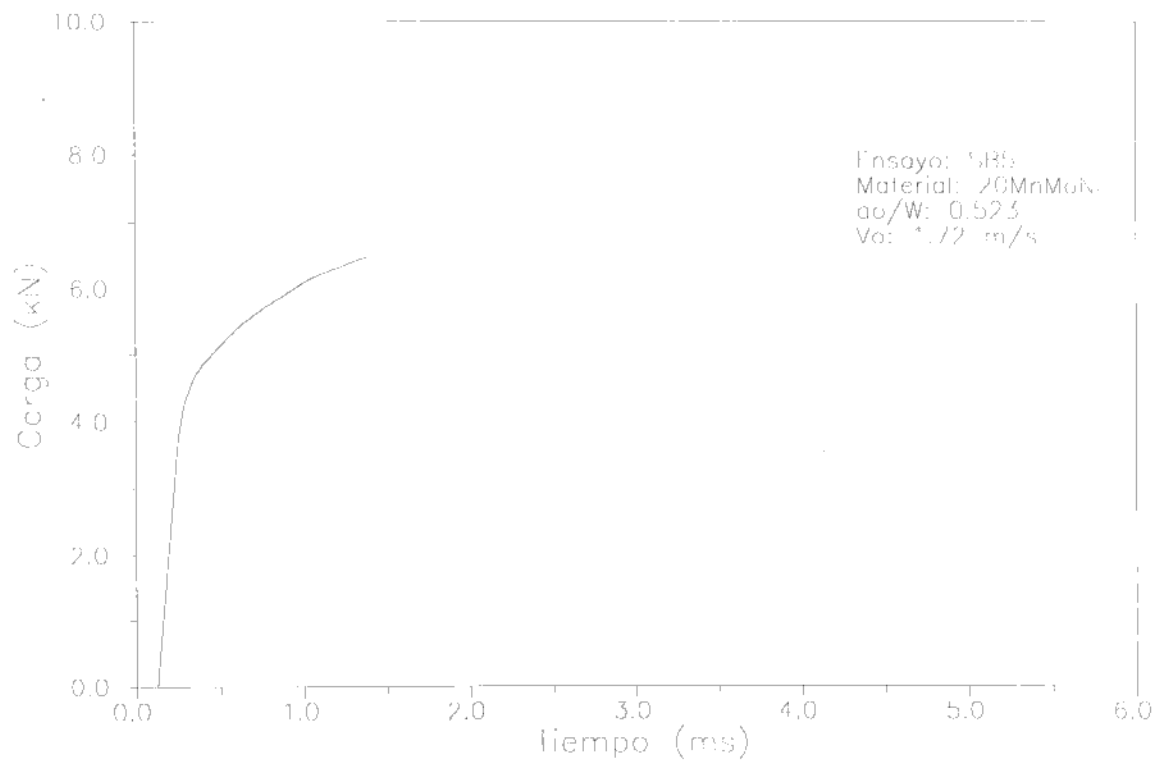


Figura 5-23: Ensayo 5 stop block: P vs t (archivo incompleto)

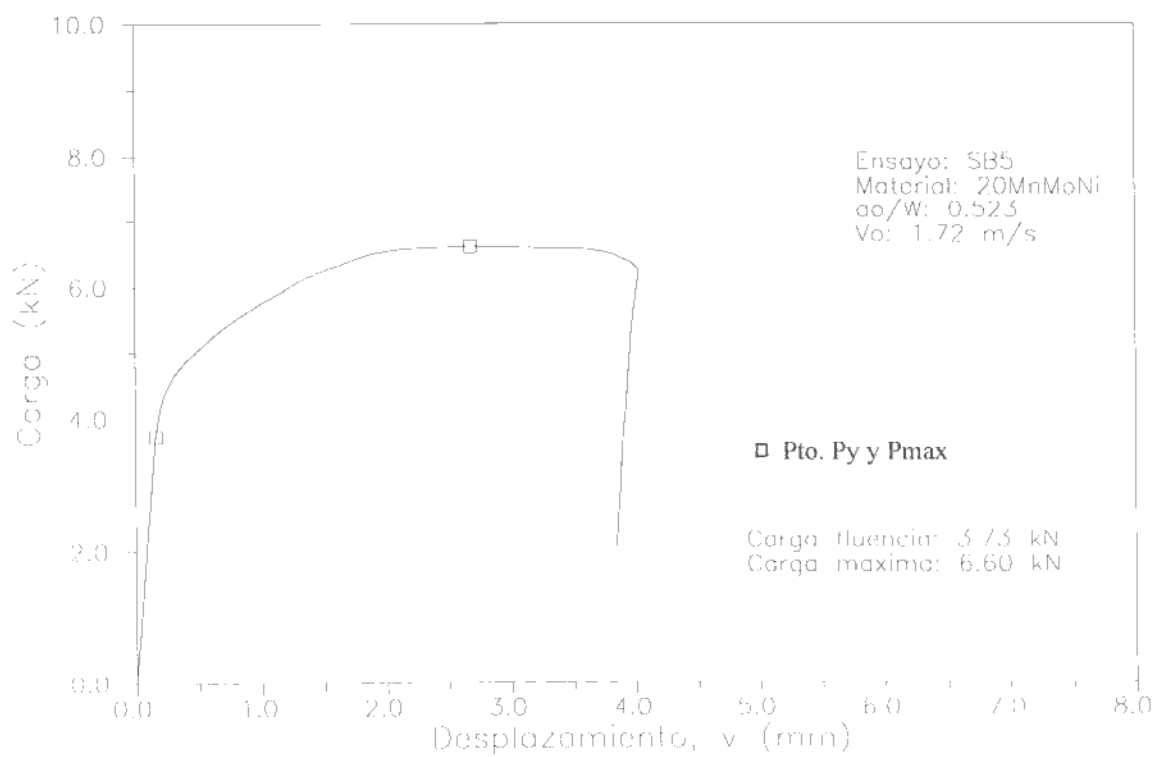


Figura 5-24: Ensayo 5 stop block: P vs v

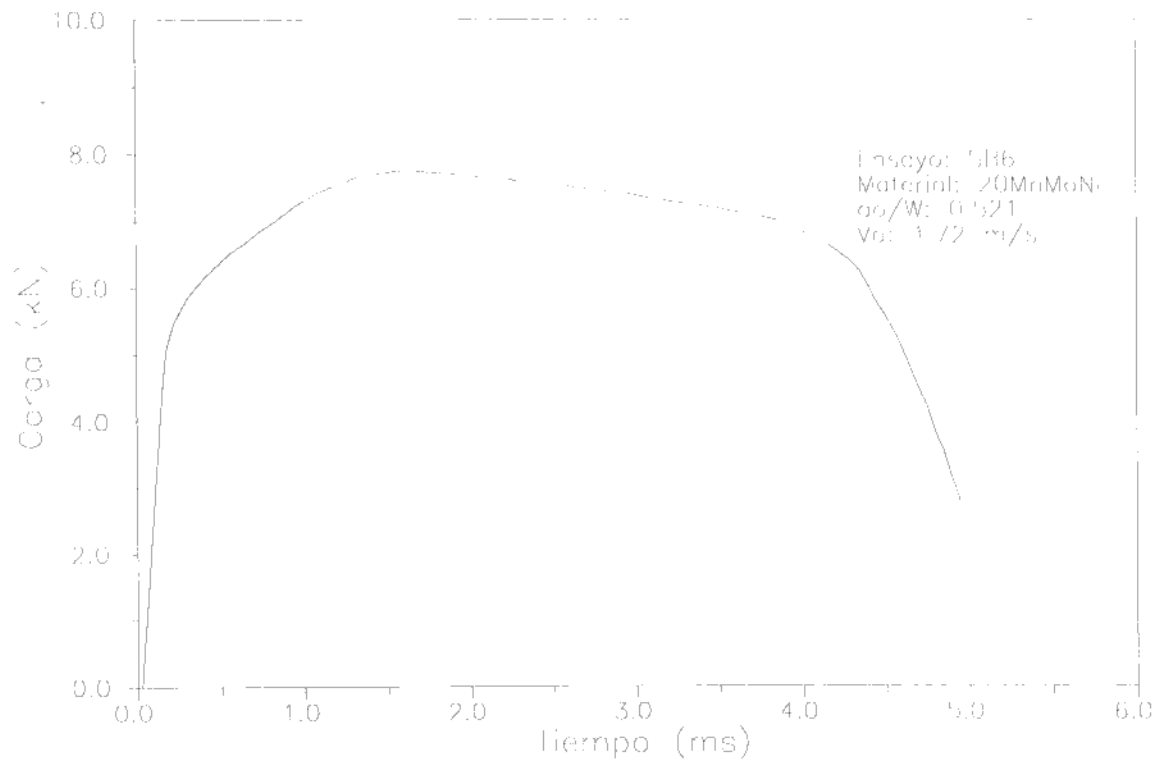


Figura 5-25: Ensayo 6 stop block: P vs t

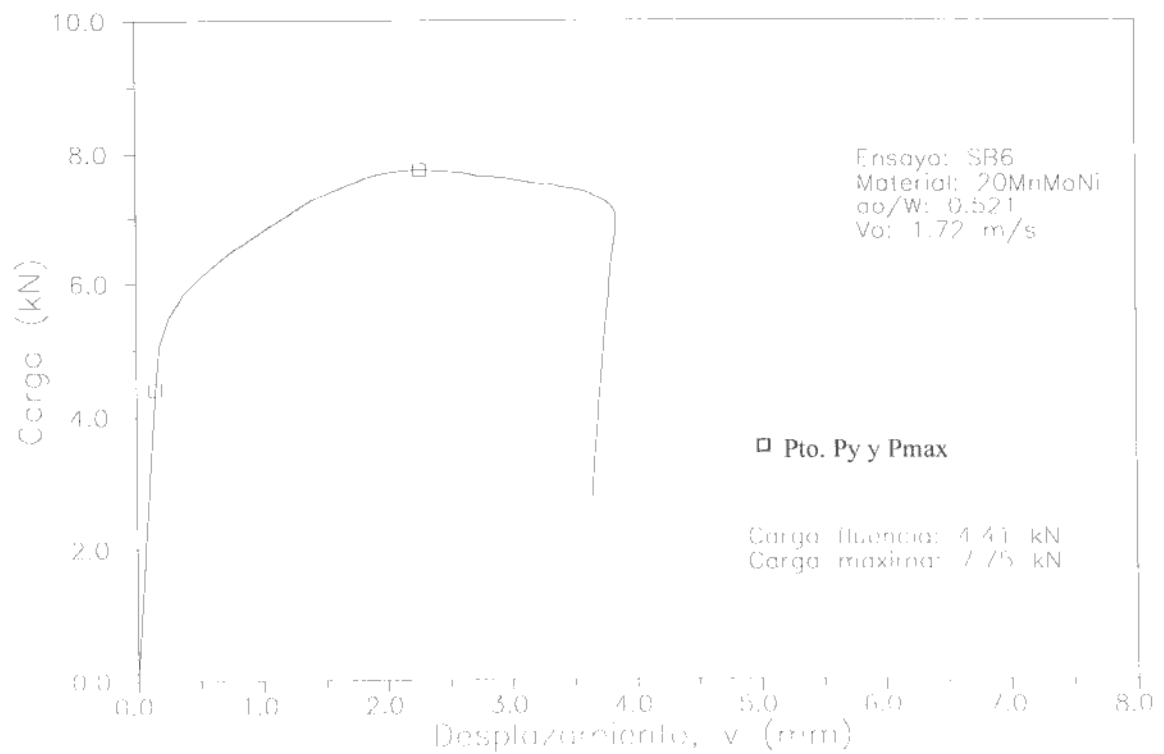


Figura 5-26: Ensayo 6 stop block: P vs v

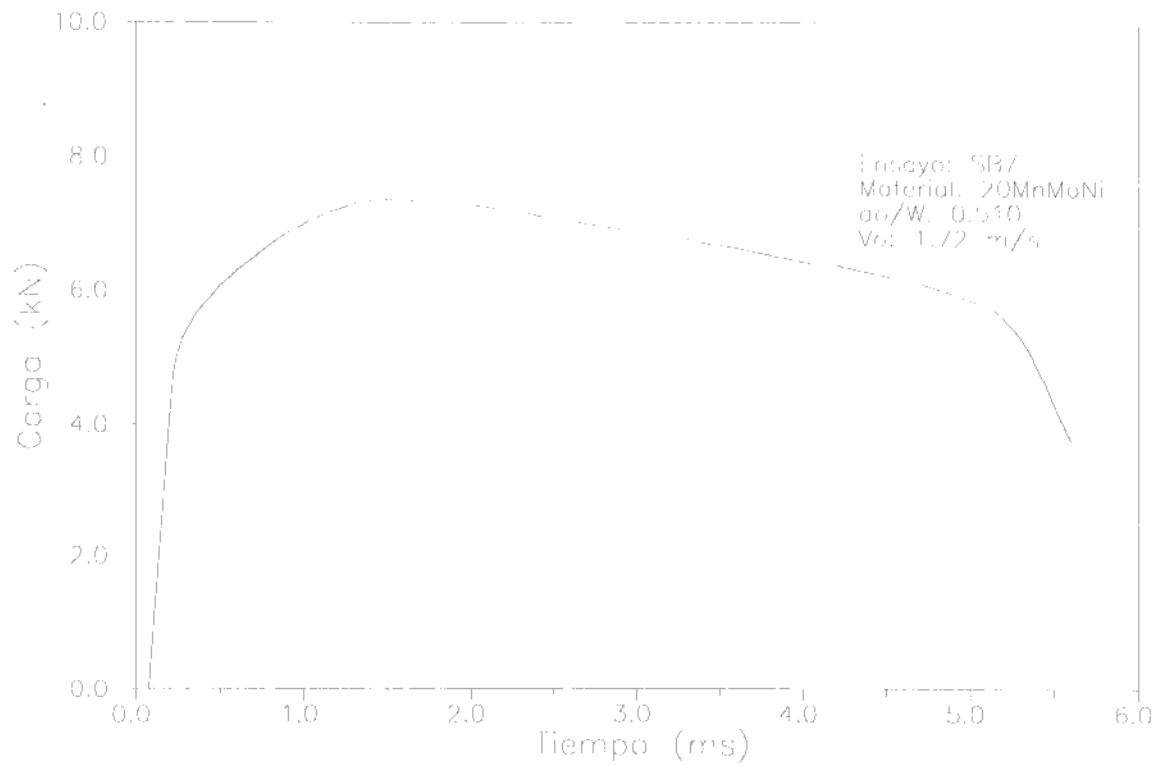


Figura 5-27: Ensayo 7 stop block: P vs t

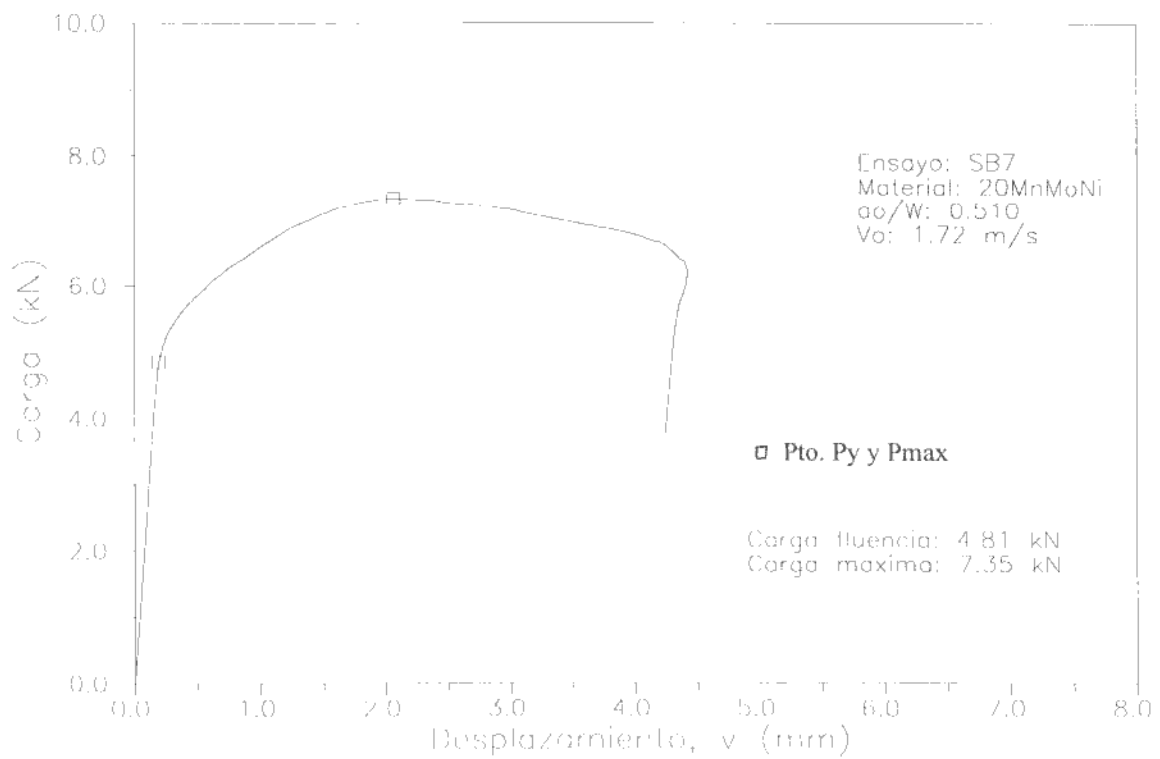


Figura 5-28: Ensayo 7 stop block: P vs v

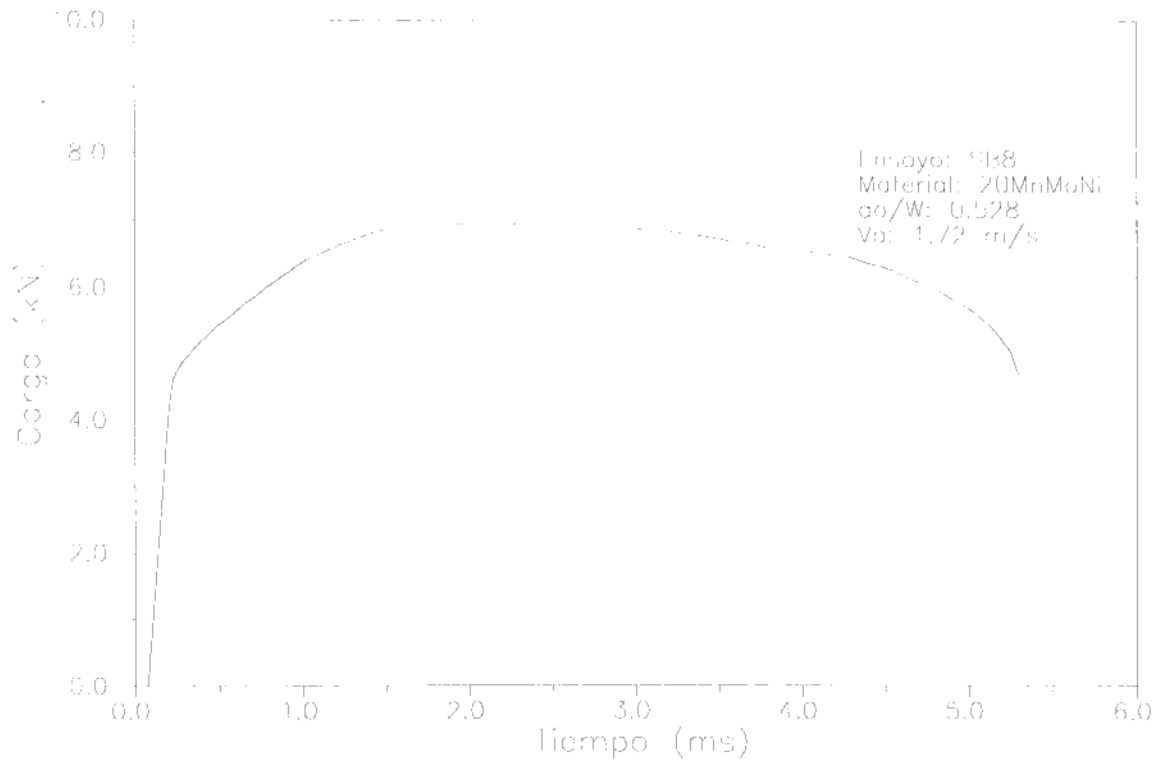


Figura 5-29: Ensayo 8 stop block: P vs t

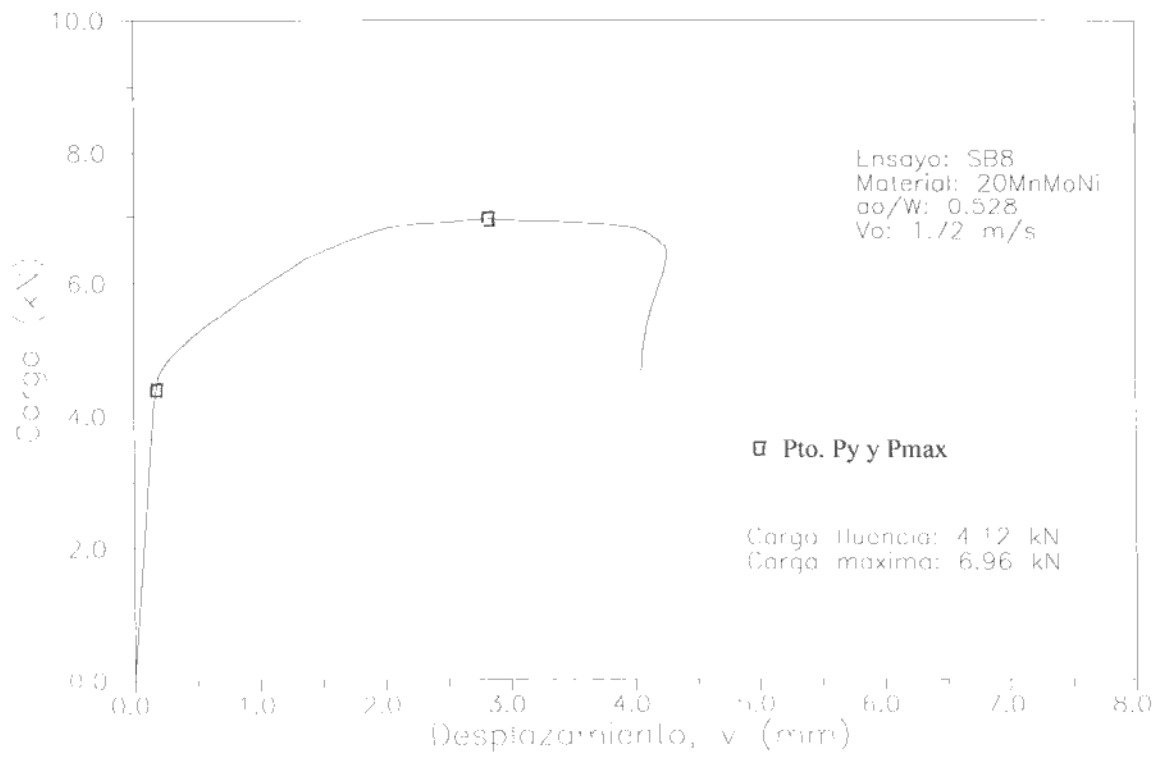


Figura 5-30: Ensayo 8 stop block: P vs v

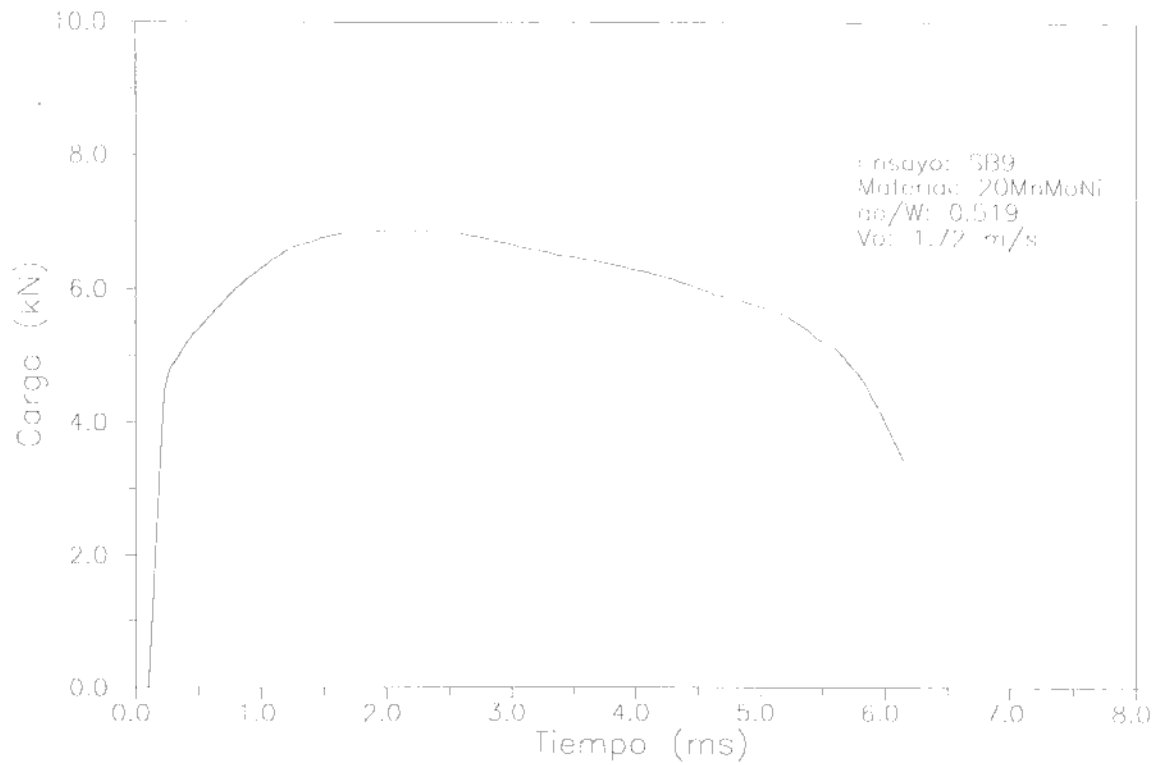


Figura 5-31: Ensayo 9 stop block: P vs t

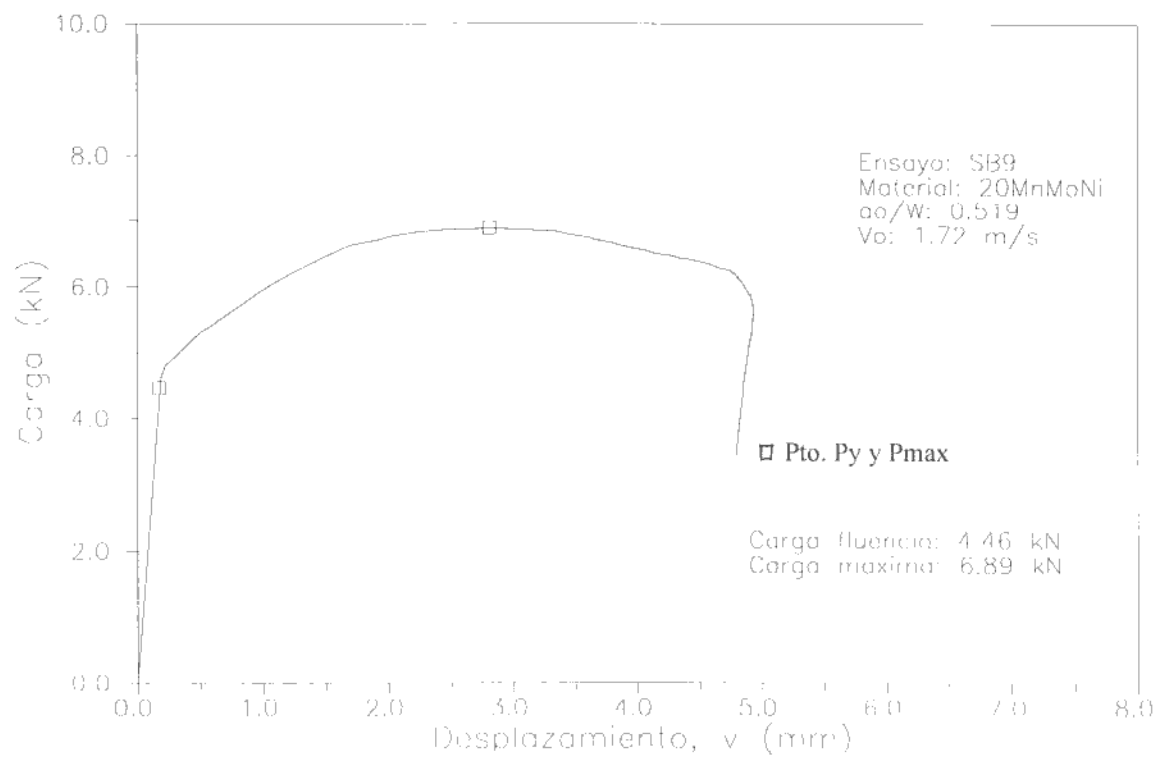


Figura 5-32: Ensayo 9 stop block: P vs v

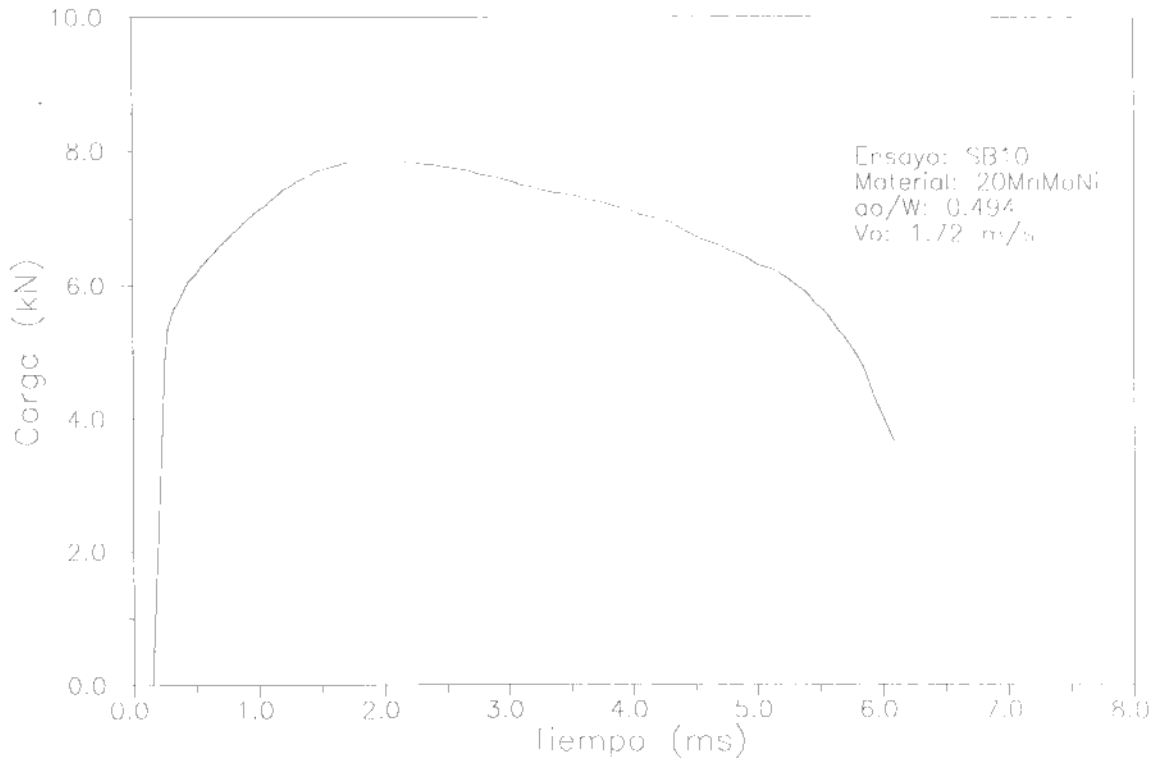


Figura 5-33: Ensayo 10 stop block: P vs t

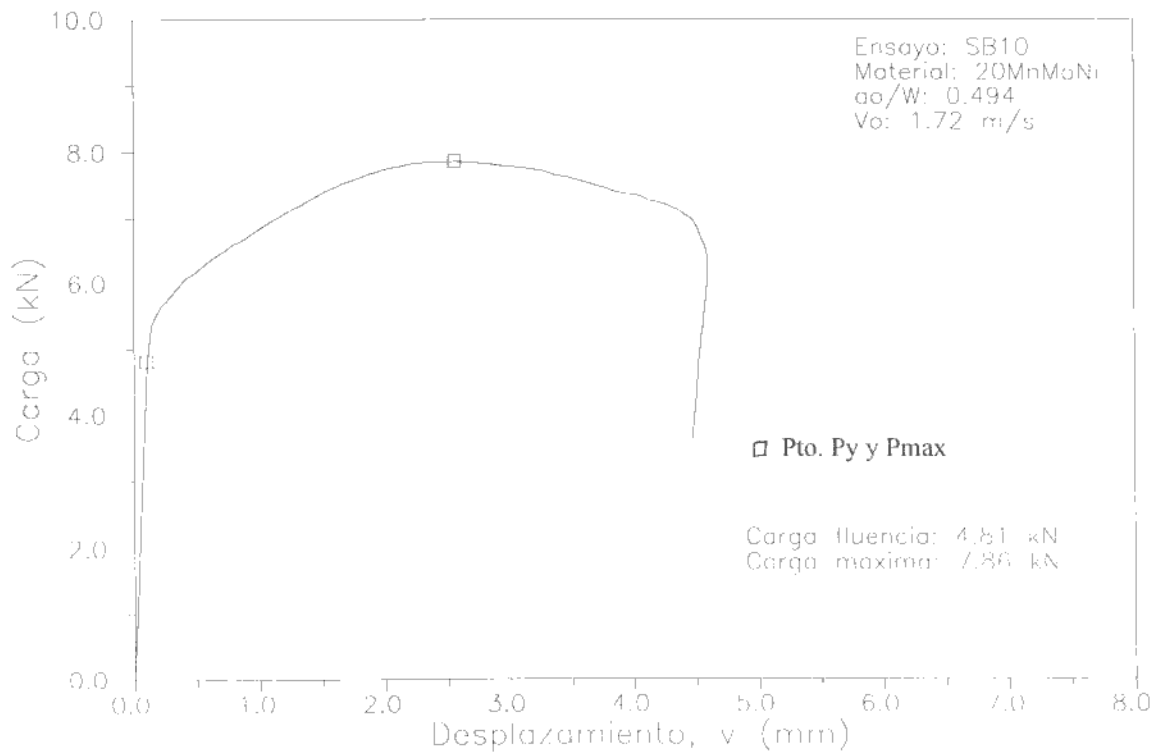


Figura 5-34: Ensayo 10 stop block: P vs v

Probeta	a_0 (mm)	a_f (mm)	vf (mm)	E (J)
1	5.29	5.57	2.45	14.23
2	5.24	5.58	2.46	15.47
3	5.05	5.72	3.26	22.55
4	5.20	5.79	3.32	22.40
5	5.23	5.92	3.90	24.04
6	5.21	6.11	3.89	26.81
7	5.10	6.17	4.45	29.33
8	5.28	6.16	4.27	26.77
9	5.19	6.29	5.19	30.81
10	4.94	6.05	4.65	32.78

Tabla 5-II: Ensayos Stop block

En primera instancia calculamos el valor de J utilizando la expresión de Rice:

$$J = \frac{2 \times E}{B(W - a_0)} \quad 5-2$$

La expresión 5-2 conduce a una sobreestimación de los valores de J, creciente con la magnitud del crecimiento estable producido, debido a que se considera que la longitud de fisura es estática e igual a a_0 . Si bien este factor no afecta la determinación del valor crítico J_{ID} , debe ser tenido en cuenta si se pretende utilizar los valores J- Δa obtenidos para cotejar los resultados del método uniprobeta propuesto. Por lo tanto, se propone utilizar la fórmula de Garwood para determinar el valor de J para cada probeta⁽²⁷⁾. Dado que es prácticamente imposible obtener una longitud de fisura inicial a_0 idéntica para todas las probetas, se aplicó una corrección a la citada fórmula a fin de considerar las diferencias en la fisura inicial:

$$J(i) = J(i-1) \frac{(W - a(i))}{(W - a(i-1))} + \frac{2}{B(W - a(i-1))} \times \left(E(i) - E(i-1) \times \frac{(W - a_0(i))^2}{(W - a_0(i-1))^2} \right) \quad 5-3$$

En este caso, el subíndice i corresponde a la probeta considerada.

La Tabla 5-III resume los valores de Δa y de J calculados de acuerdo a las dos expresiones (5-2 y 5-3):

Ensayo	J^1 (kJ/m ²)	J^2 (kJ/m ²)	Δa (mm)
1	604.2	604.2	0.28
2	650.0	645.1	0.34
3	911.0	888.0	0.67
4	933.2	929.4	0.59
5	1008.0	991.8	0.69
6	1119.4	1071.5	0.90
7	1197.2	1120.5	1.07
8	1134.4	1100.2	0.88
9	1281.0	1219.7	1.10
10	1295.6	1227.7	1.11

Tabla X: J vs Δa Stop block test

J^1 : Calculado de acuerdo a expresión 5-2

J^2 : Calculado de acuerdo a expresión 5-3

En el gráfico de la figura 5-35a se grafican las curvas J-R obtenidas, junto con las rectas J- Δa correspondientes a las ecuación de la "blunting line" de acuerdo a Landes y Begley, Kodaira et al y

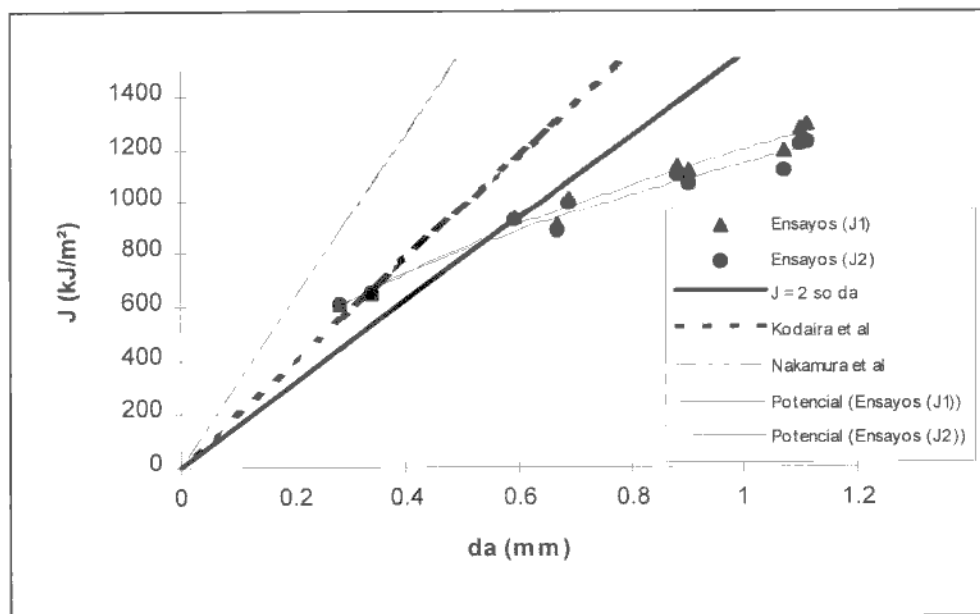
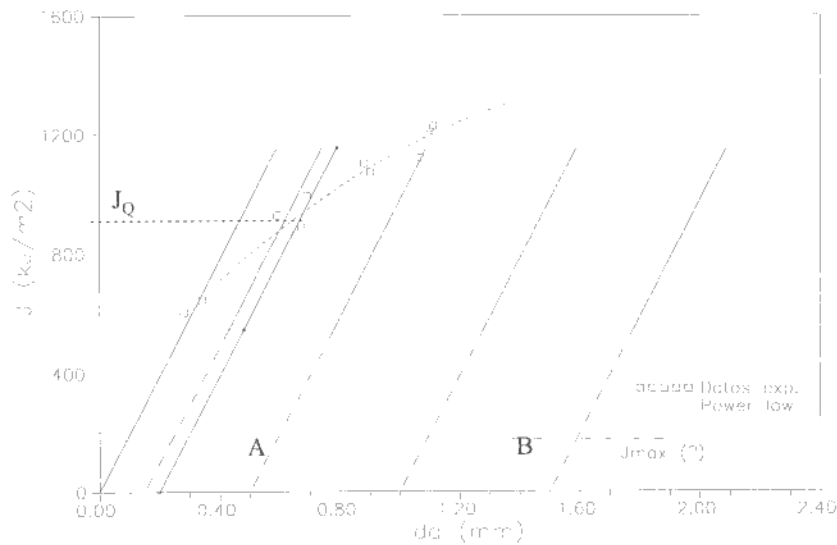


Figura 5-35a: Determinación de J_d

Se aprecia que el ajuste de la blunting line de Kodaira et al se ajusta mejor que el de Landes y Begley y el propuesto por Nakamura et al. Pese a que se visualiza la sobreestimación del valor de J al utilizar la expresión 5-2, ésta no es significativa. Donde se intersecta el ajuste de la blunting line con la regresión lineal sobre los puntos experimentales, determinamos el valor J_d el cual alcanza un valor de:

$$J_d \cong 650 \text{ kJ} / \text{m}^2$$

La figura 5-35b muestra la representación de los datos obtenidos, dentro del esquema definido por la norma ASTM E813-87⁽¹⁾ para determinar el valor de J_{IC} , donde se aprecian claramente las dificultades de los puntos experimentales obtenidos para cumplir con los requisitos de la citada norma.



No se dispone de puntos experimentales en la región B, y todos los puntos experimentales se ubican por encima de la línea de $J_{m\acute{a}x}$. El valor de J_Q obtenido por este método resulta aproximadamente 950 kJ/m^2 , con lo cual se tiene que para que sea válido se debe cumplir⁽¹⁾:

$$B, b \geq 25 J / \sigma_y \quad 5-4$$

$$B, b \geq 25 \times 950 / 529 = 44.9 \text{ mm}$$

El valor de B y b de la probeta ensayada resulta inferior al valor mínimo establecido por la expresión (5-4). Por tal motivo, el valor de J_d obtenido no puede considerarse una propiedad del material sino que está afectado por las dimensiones de la probeta.

Es importante resaltar la contribución del “redondeo” del vértice de la fisura (representado por la blunting line) en el crecimiento de fisura observado. Se desprende entonces que resulta de mucha importancia la modelización apropiada de esta etapa del crecimiento, pues afectará de manera significativa el valor que se considere para determinar el J_{ID} . El valor de iniciación puede alcanzar valores diferentes, dependiendo de la “blunting line” elegida.

5.4.- Resultados experimentales método uniprobeta

La metodología desarrollada para la generación de la curva J-R a partir del ensayo de sólo una probeta fue verificada en primer término utilizando los registros de ensayos de las probetas ensayadas para el método multiprobeta. Dado que en este caso se contaba con el valor final de longitud de fisura, fue posible corroborar la exactitud de la predicción del método uniprobeta con sus hipótesis asociadas.

En segundo término se ensayaron 6 probetas de manera “completa”, es decir produciendo la fractura completa con el impacto (sin utilizar el stop block). En todos estos ensayos se utilizó una prefisura por fatiga de una longitud tal de alcanzar una profundidad de $a/W \cong 0.5$. Las curvas J-R obtenidas fueron contrastadas con las correspondientes a las generadas a partir de los ensayos con el stop block, así como con la curva J-R obtenida a partir de la utilización del método multiprobeta.

5.4.1.- Aplicación de la metodología

El tratamiento de los datos de ensayo se realiza siguiendo los pasos indicados en el punto 3.6.2. Partiendo de la curva P vs t , se obtiene la correspondiente curva P vs V , para luego obtener la curva P vs V_{pl} (paso 2). El paso siguiente consiste en la “normalización” de los valores de P y v_{pl} , generando la correspondiente curva P_N vs v_{pl}/W (paso 3). Aplicando logaritmo a ambos términos (paso 4), se obtiene el correspondiente diagrama $\ln P_N$ vs $\ln V_{pl}/W$ (paso 5). La figura 5.36 muestra este diagrama para uno de los ensayos a rotura total realizado.

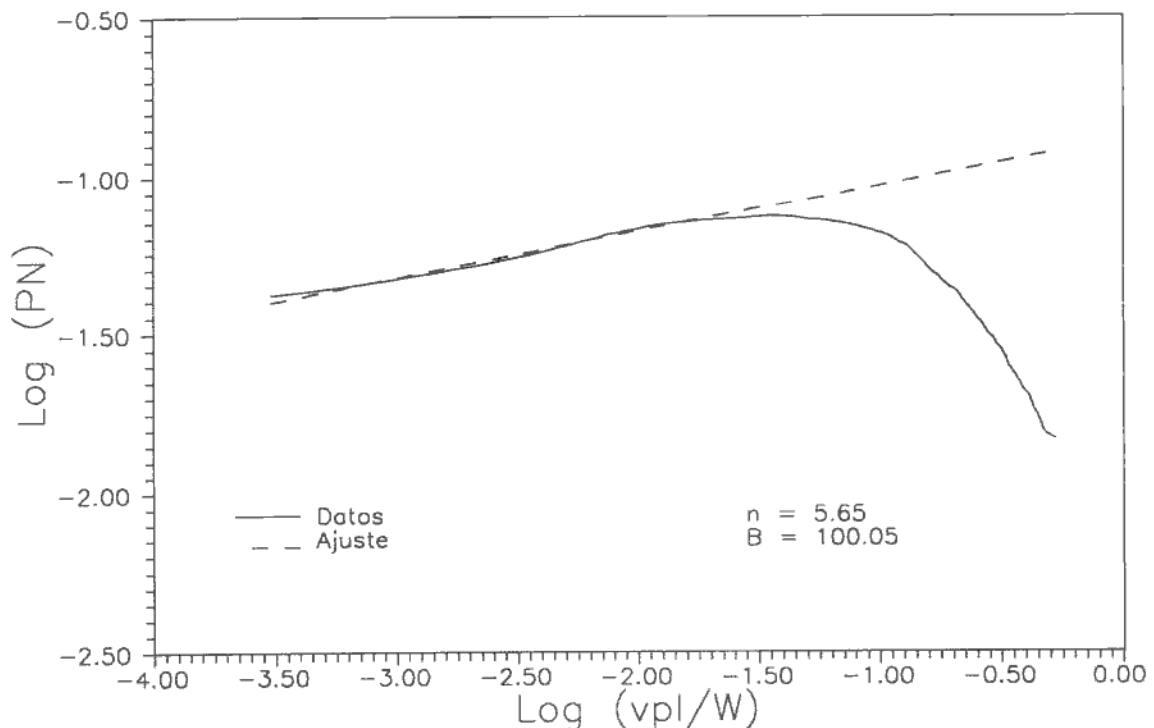


Figura 5-36: $\ln P_N$ vs $\ln V_{pl}/W$ ensayo a rotura total (ejemplo)

Sobre la parte lineal de la curva se realiza el ajuste por mínimos cuadrados (paso 7). Con la pendiente de la recta de ajuste se obtiene el valor del coeficiente de endurecimiento, mientras que con la intersección de esta recta con el eje de ordenadas, es posible obtener el valor de coeficiente β . El punto donde la curva $\text{Ln } P_N$ vs $\text{Ln } V_{pl}/W$ se “separa” del ajuste lineal (la curva pierde el comportamiento lineal) define el punto de iniciación de crecimiento estable de la fisura, luego del crecimiento por “redondeo” del vértice de la misma.

Con los valores de n y β así determinados, se está en condiciones de generar la “curva de calibración” correspondiente a la probeta. La figura 5-37 muestra la curva de calibración obtenida para la probeta ejemplo analizada (paso 8):

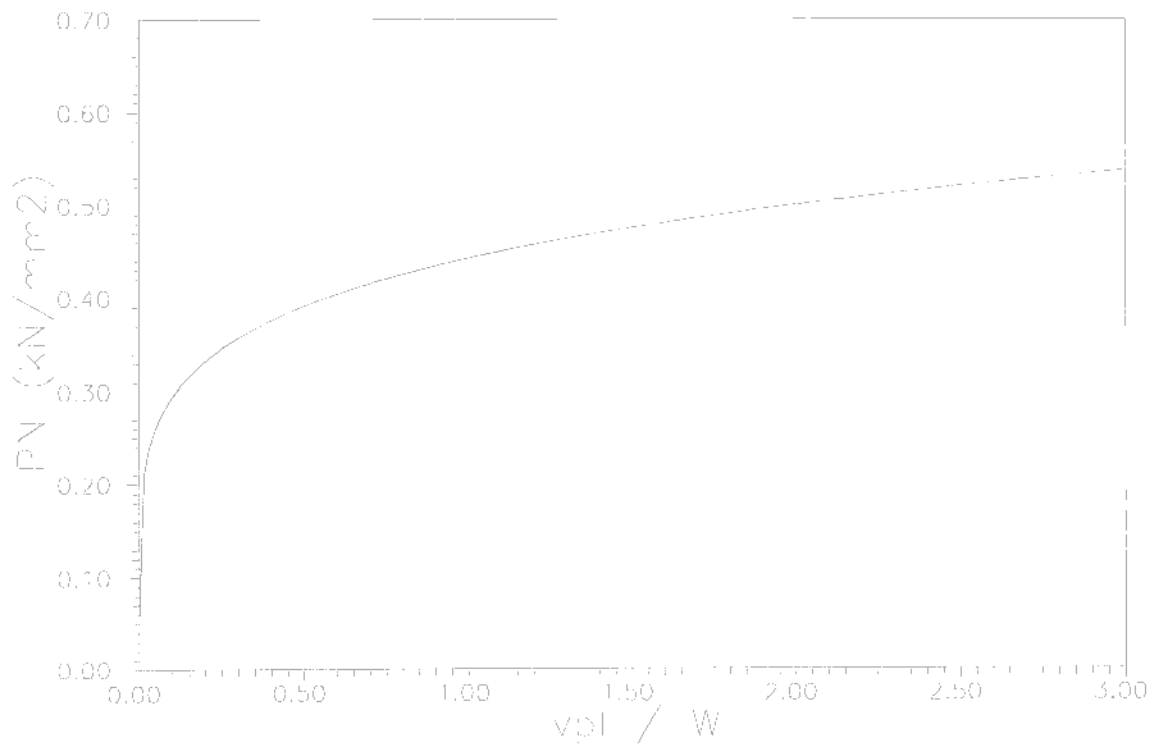


Figura 5-37: Curva de calibración

Con la “curva de calibración” determinada es posible ahora calcular el valor de longitud de fisura instantáneo, en forma iterativa, utilizando la expresión 3-45 y la información carga - desplazamiento (paso 9). Una vez obtenido el valor de $a(i)$ para cada punto, es posible entonces realizar el cálculo del valor de J correspondiente, a través del uso de la expresión 3-46. Se genera de esta manera la curva J-R para la probeta analizada (paso 10). La figura 5-38 muestra la curva obtenida para la probeta analizada:

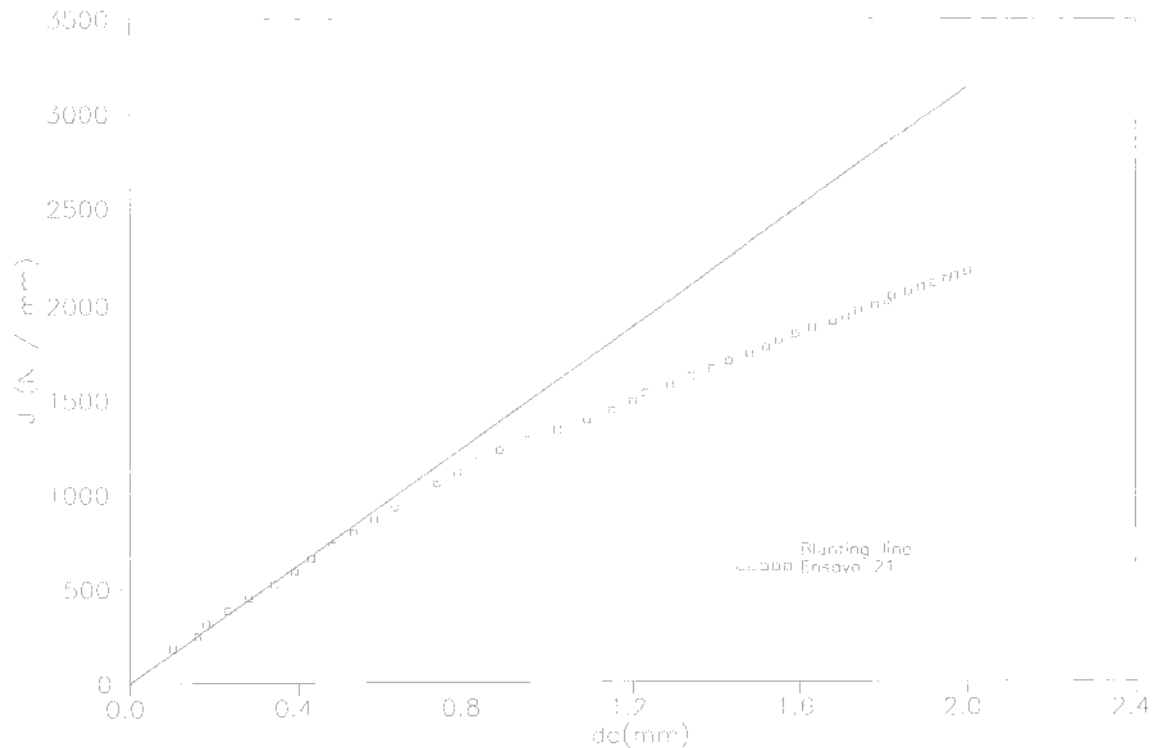


Figura 5-38: Curva J-R

En la figura se incluye la recta correspondiente a la “blunting line” propuesta como hipótesis para el cálculo.

5.4.2.- Obtención de la curva J-R a utilizando los ensayos con stop block

Como se mencionara anteriormente, la aplicación del tratamiento experimental propuesto a los registros de ensayos de obtenidos con el stop block tiene la ventaja de que permite contar con un punto experimental adicional. Es decir, el punto final del ensayo (donde se dispone de a_f , V_f y P_f) permite verificar que la curva de calibración estimada sea correcta o la más apropiada posible.

A partir de los registros Carga (P) vs Desplazamiento (V) obtenidos en el punto 5.3 para todas las probetas ensayadas con el stop block, se generaron las correspondientes curvas Carga (P) vs Desplazamiento plástico (V_{pl}), siguiendo la metodología descrita en el punto 4.4 (expresión 3-43).

Una vez obtenidos los registros P vs V_{pl} , se normalizan ambos miembros en primer término sin considerar el crecimiento de fisura por “blunting” (paso 3 punto 3.6.2). Las figuras 5-39, 5-40 y 5-41 muestran los diagramas $\ln P_N$ vs $\ln V_{pl}/W$ para tres de los ensayos realizados con el stop block: probetas SB1, SB6 y SB 10, respectivamente. Se seleccionaron estas probetas como ejemplo de crecimiento de fisura mínimo, medio y máximo.

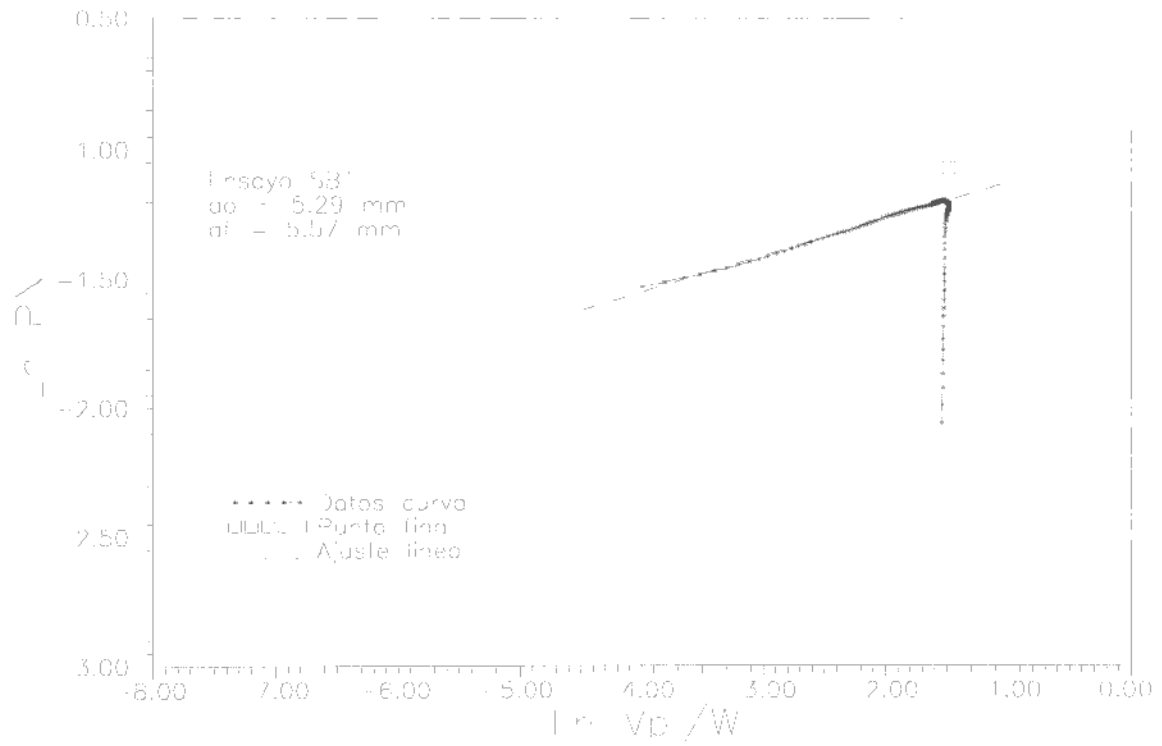


Figura 5-39: Curva $\ln P_N$ vs $\ln V_{pl}/W$ probeta SB1 (sin redondeo)

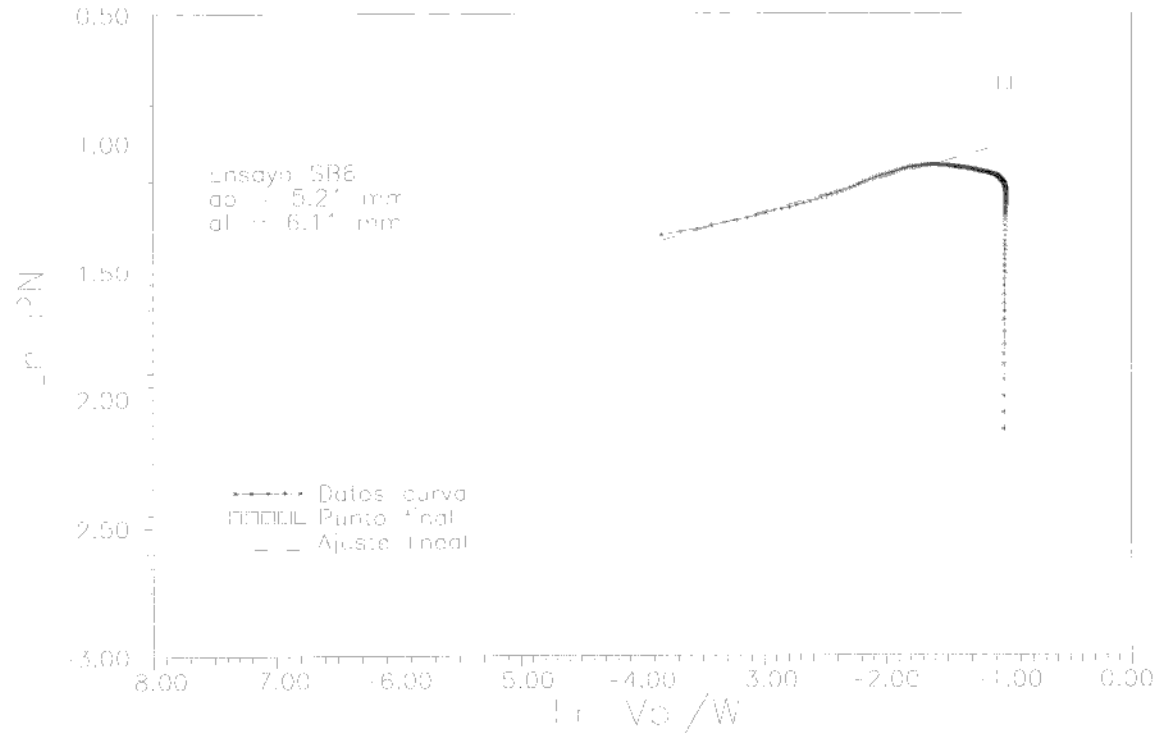


Figura 5-40: Curva $\ln P_N$ vs $\ln V_{pl}/W$ probeta SB6 (sin redondeo)

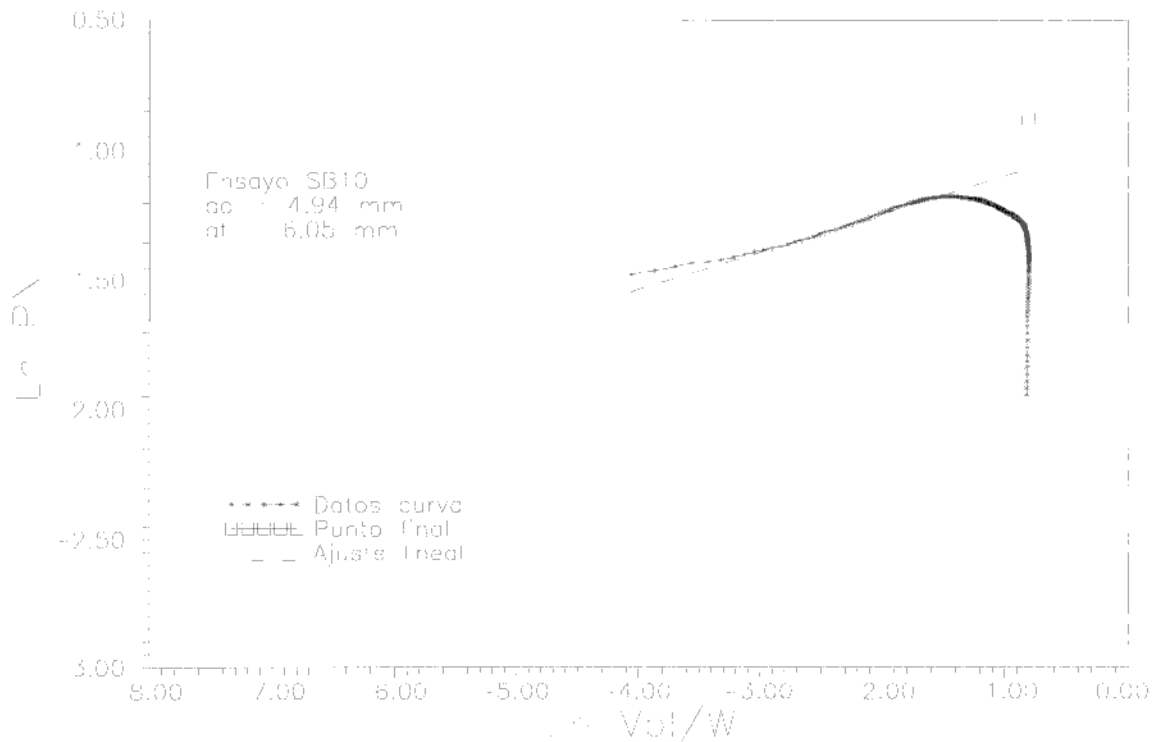


Figura 5-41: Curva $\ln P_N$ vs $\ln V_{pl}/W$ probeta SB10 (sin redondeo)

En los mismos gráficos se indica el punto experimental correspondiente al valor medido luego del ensayo. En los tres casos, es posible observar que el ajuste lineal pasa “por debajo” del punto experimental. Es decir, la aplicación directa de la metodología llevaría a una subestimación del crecimiento de fisura real (se predicen valores de P_N menores a los reales, lo cual implica $(W-a)$ mayores, es decir longitudes de fisura a menores). Para incrementar la exactitud de la predicción, y tomando en consideración que la porción de crecimiento de fisura por “blunting” es importante en este rango de tamaño de probeta y material, se incorporó al cálculo de la P_N este crecimiento. Es decir, no se normaliza considerando $a = a_0 = \text{cte}$, sino que se considera un crecimiento preestipulado el cual depende del modelo de crecimiento por blunting seleccionado. Si observamos el gráfico de la figura 5-35, se aprecia que la aproximación para la blunting line dada por Kodaira et al (3-31) resulta una de las más adecuadas:

$$J = 3.7 \sigma_{yd} \cdot \Delta a$$

es decir,

$$\Delta a(i) = a(i) - a_0 = \frac{2E(i)}{3.7 \times \sigma_{yd}} \frac{B(W - a_0)}{B(W - a_0)}$$

$$\Rightarrow a(i) = a_o + \frac{2E(i)}{3.7 \times \sigma_{yd}} \frac{B(W - a_o)}{B(W - a_o)} \quad 5-5$$

El valor de $a(i)$ obtenido punto a punto representará el crecimiento de fisura sólo por “blunting”. Por lo tanto, el valor de carga normalizada P_N se calcula de acuerdo a la expresión:

$$P_N = \frac{PW}{B(W - a(i))^2} \quad 5-6$$

Para cada modelo de crecimiento por “blunting” puede escribirse una expresión similar a la 5-5. El programa FRACDIN contempla la opción de calcular el crecimiento por blunting de acuerdo a 3-29 (Landes & Begley), 3-31 (Kodaira et al) y 3-32 (Nakamura et al).

Las figuras 5-42, 5-43 y 5-44 muestran los gráficos anteriores pero ahora considerando el crecimiento por blunting de acuerdo a 5-6:

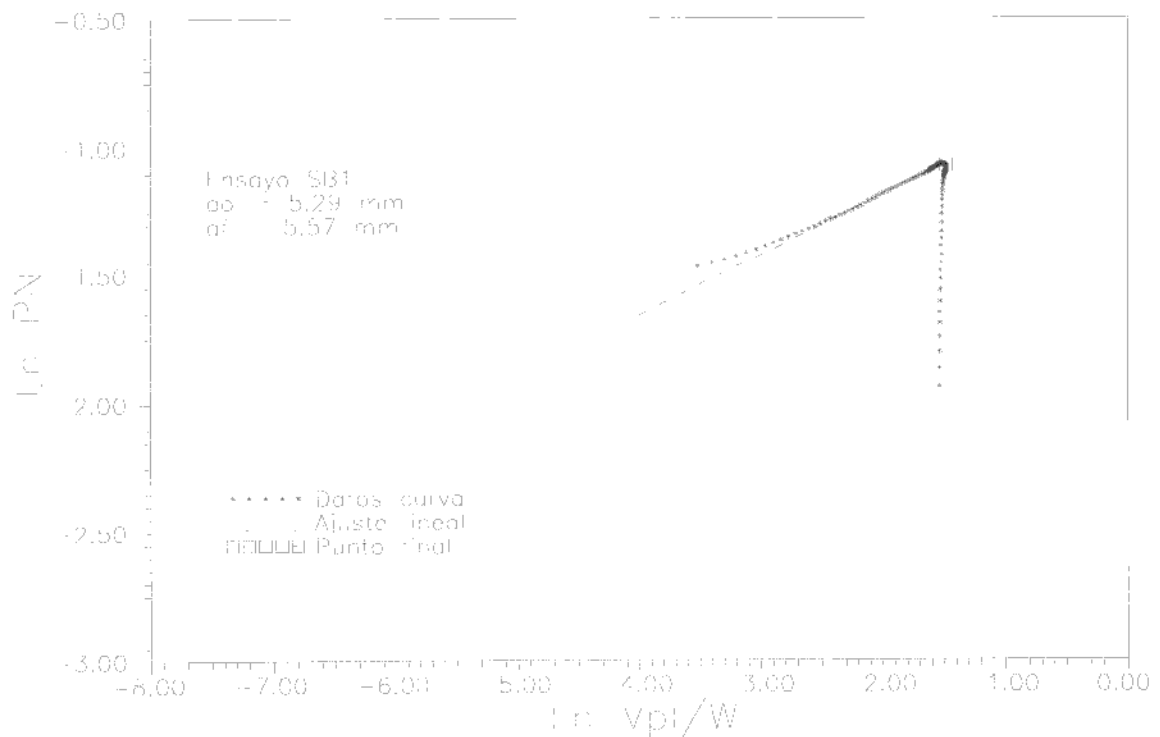


Figura 5-42: Curva $\ln P_N$ vs $\ln V_{pl}/W$ probeta SBI (blunting de acuerdo a Kodaira et al)

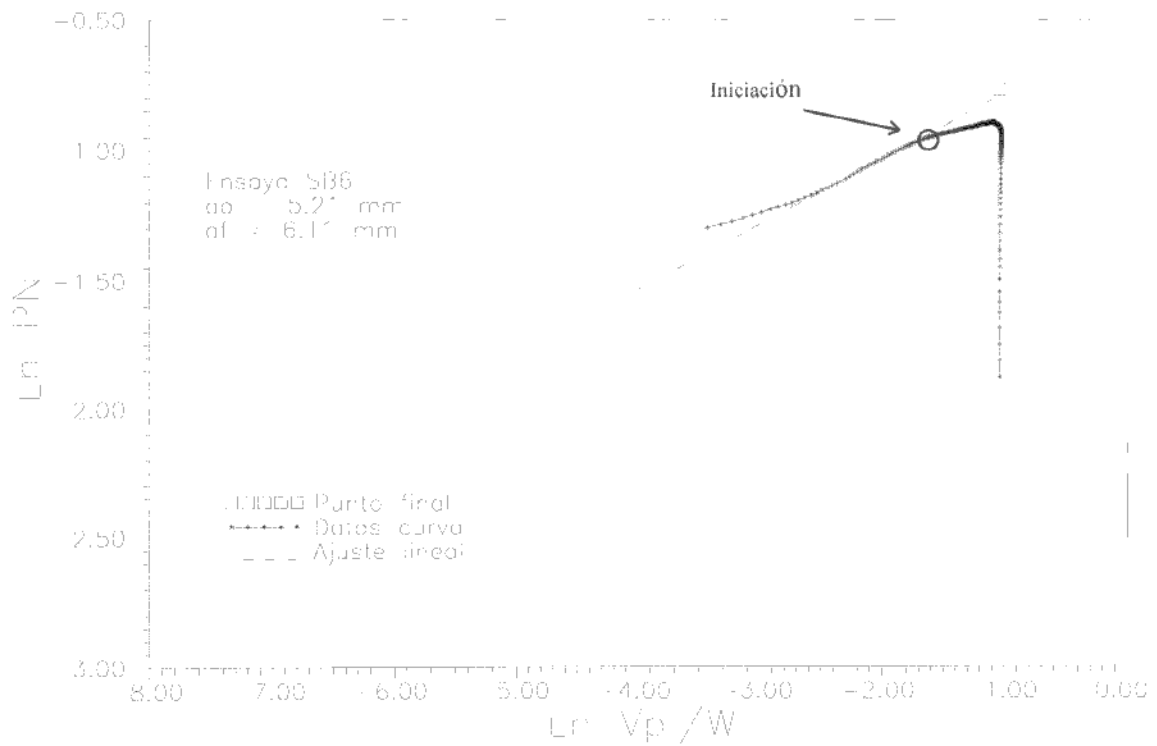


Figura 5-43: Curva $\ln P_N$ vs $\ln V_{pl}/W$ probeta SB6 (blunting de acuerdo a Kodaira et al)

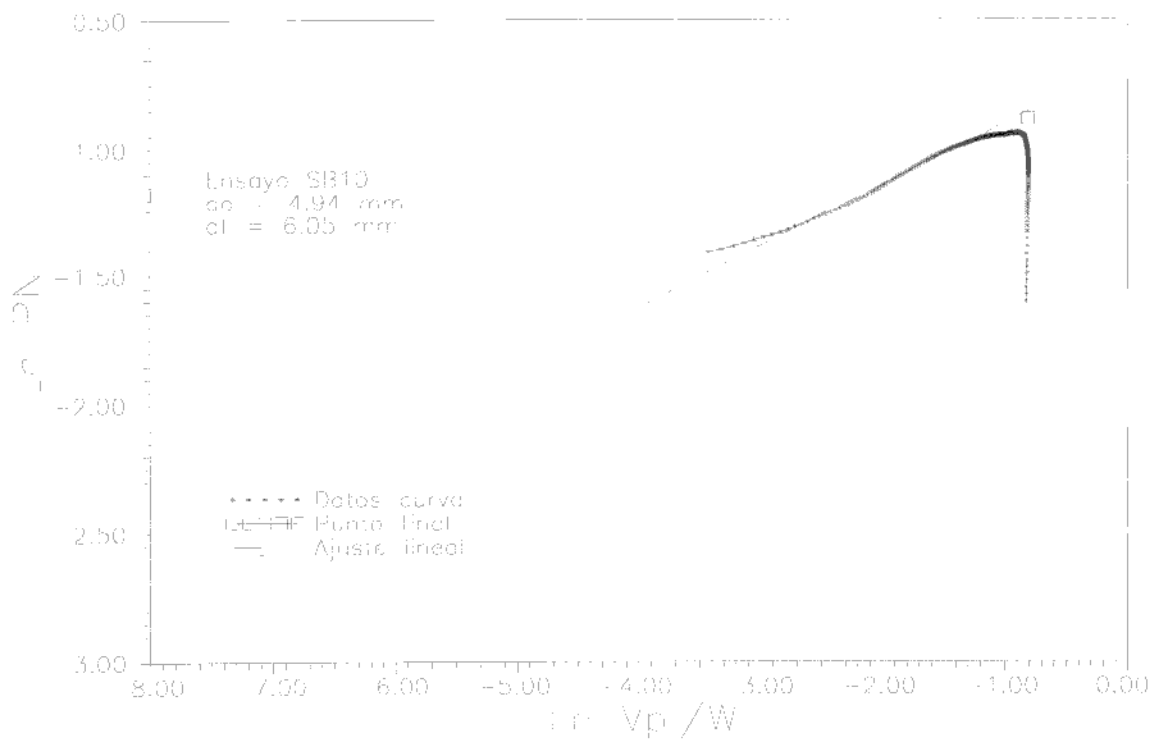


Figura 5-44: Curva $\ln P_N$ vs $\ln V_{pl}/W$ probeta SB10 (blunting de acuerdo a Kodaira et al)

Se observa claramente que utilizando el modelo de crecimiento por “blunting” de Kodaira et al el ajuste por mínimos cuadrados permite una predicción muho más precisa del crecimiento de la fisura.

A partir de los ajustes lineales realizados sobre las curvas $\ln P_N$ vs $\ln V_{pl}/W$, es posible obtener los coeficientes n y β para cada probeta. Los mismos permiten la determinación de la curva de calibración individual. La figura 5-45 muestra las curvas de calibración obtenidas para las tres probetas mostradas como ejemplo:

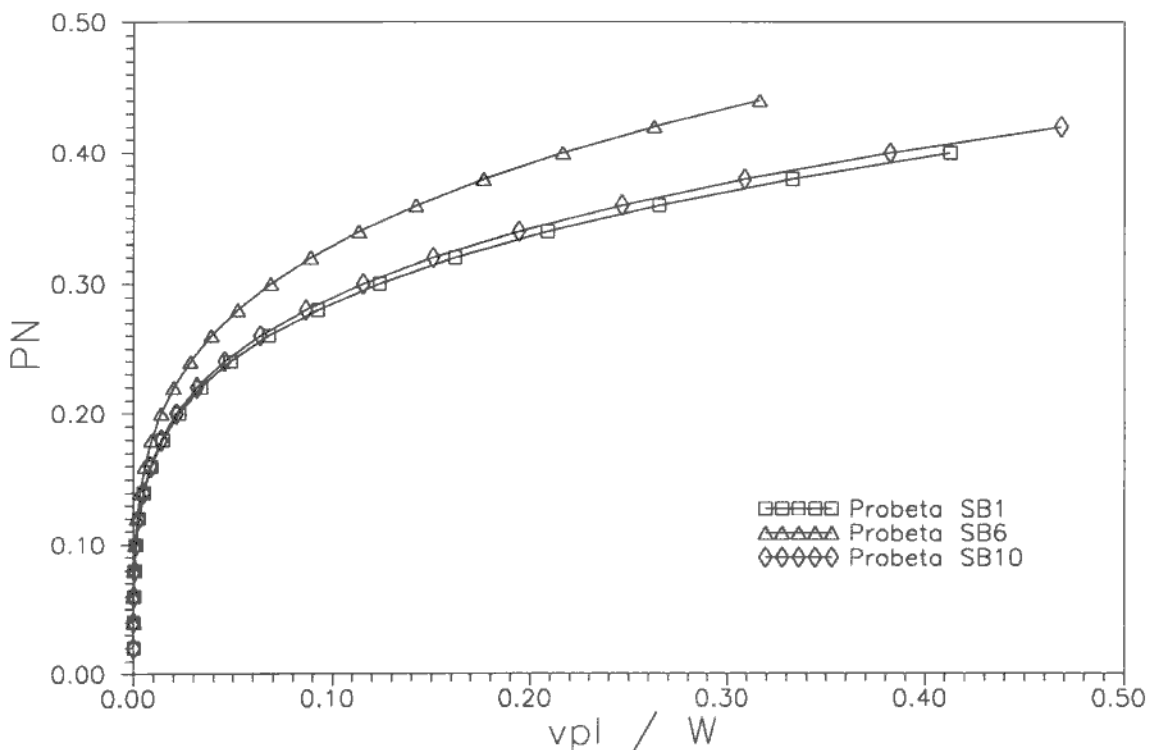


Figura 5-45: Curvas de calibración probetas SB1, SB6 y SB10

A partir de las “curvas de calibración”, y utilizando las expresiones 3-45 y 3-46, se está en condiciones de obtener la correspondiente curva $J-\Delta a$. La figura 5-46 muestra las tres curvas obtenidas, para las probetas consideradas como ejemplo (SB1, SB6 y SB10). Puede observarse que existe una apreciable similitud y coincidencia entre las tres curvas, lo cual es un indicador de la consistencia del método empleado. Se indica asimismo la recta correspondiente a la “blunting line” utilizada. Puede observarse que existe cierta indeterminación o error en los primeros puntos de la curva ($J < 250 \text{ kJ/m}^2$). Esto se debe a que en la primer etapa de la curva P_N vs V_{pl}/W se produce cierto desvío entre los datos experimentales y el ajuste lineal (figuras 5-42, 43 y 44).

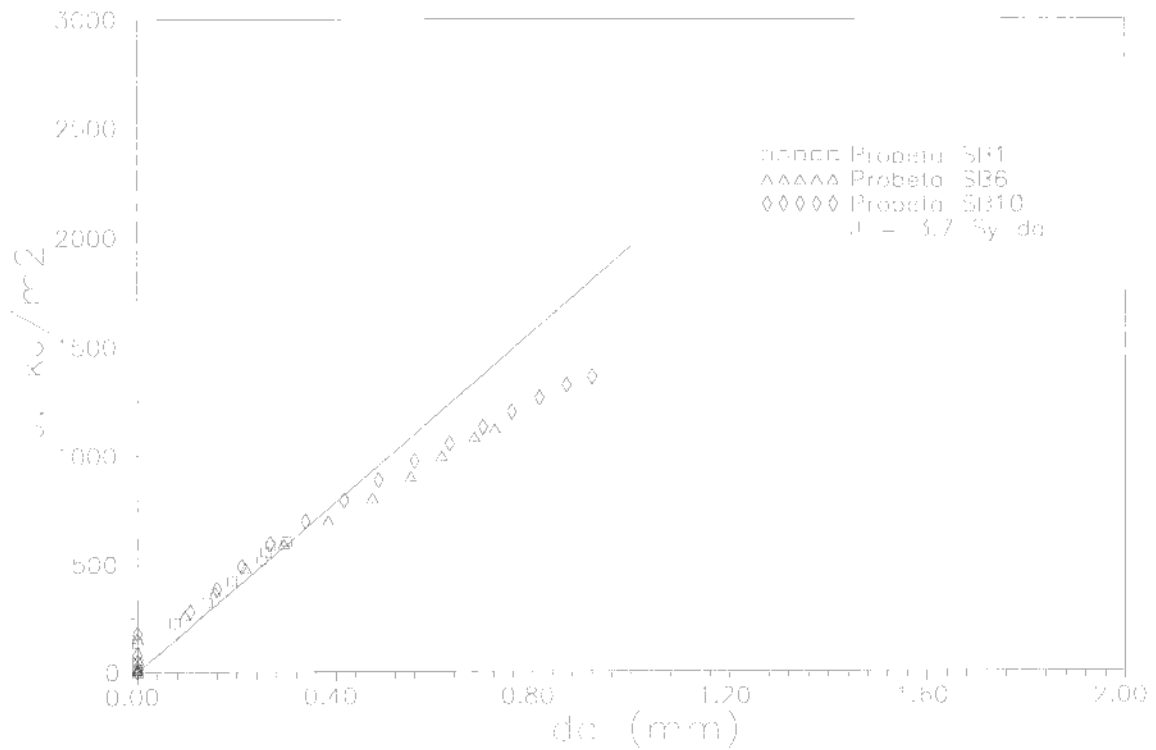


Figura 5-46: Curvas J-R probetas SB1,SB6 y SB10

El procedimiento citado se aplicó en las siete probetas restantes que se utilizaron con el stop block. La longitud de fisura final medida se comparó con la obtenida a partir de la curva J-R. La Tabla 5-IV muestra los valores de fisura final medidos y calculados, junto con la diferencia porcentual entre ellos, para las 10 probetas ensayadas.

Probeta	Δa_f (medido,mm)	Δa_f (calculado,mm)	Diferencia* (%)
SB1	.28	.30	7.6
SB2	.34	.34	0.0
SB3	.67	.57	-14.9
SB4	.59	.57	-2.7
SB5	.69	.73	6.4
SB6	.90	.75	-16.3
SB7	1.076	.94	-12.5
SB8	.88	.75	-14.4
SB9	1.097	.94	-14.2
SB10	1.115	.99	-11.3

* (af calc. - af medido) / af medido

Tabla 5-IV: Crecimiento de fisura medido y calculado

Se aprecia que el error cometido en la predicción del crecimiento es menor al 15 %, con una leve tendencia a subestimar el crecimiento, sobre todo para crecimientos importantes. La figura 5-47 muestra gráficamente este comportamiento:

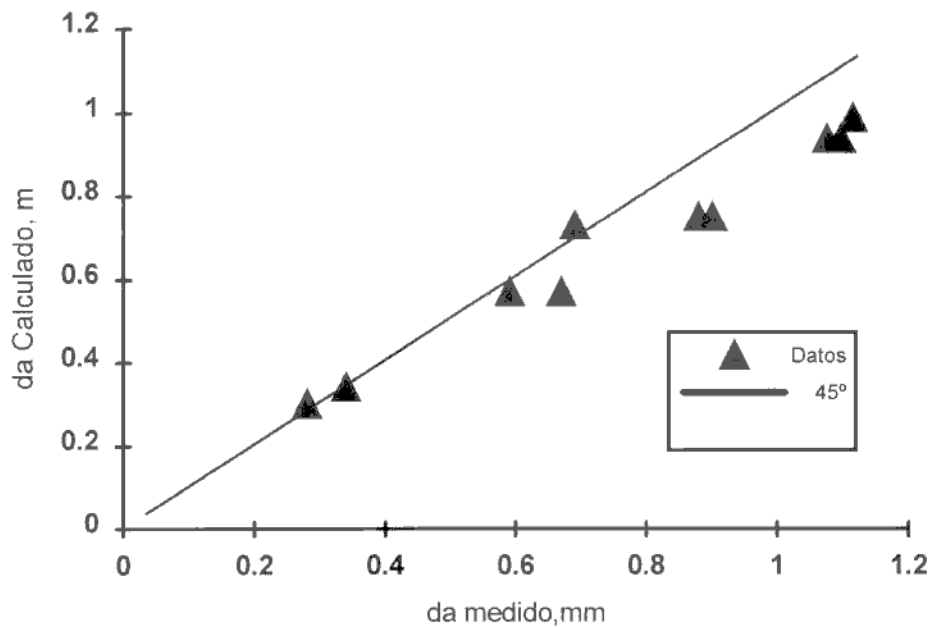


Figura 5-47: Δa medido vs calculado (ensayos con stop block)

5.4.3.- Obtención de la curva J-R a utilizando los ensayos totales (fractura total)

La siguiente serie de ensayos se realizó con probetas prefisuradas a una profundidad objetivo $a/W = 0.5$, sin la utilización del stop block. De esta manera, el ensayo consistió en la fractura total de la probeta sin detención del péndulo. Luego de obtenidos los registros P vs t y el posterior tratamiento de los datos, se obtuvieron las curvas de calibración correspondientes y las curvas J-R para cada probeta ensayada.

Las figuras 5-48, 5-50, 5-52, 5-54, 5-56 y 5-58 muestran las curvas de calibración obtenidas para las seis probetas ensayadas, mientras que las figuras 5-49, 5-51, 5-53, 5-55, 5-57 y 5-59 muestran las curvas J-R correspondientes a cada una de ellas. En los gráficos de las curvas de calibración se indican los valores del coeficiente de endurecimiento obtenido del ajuste, y el valor de longitud de fisura inicial medido.

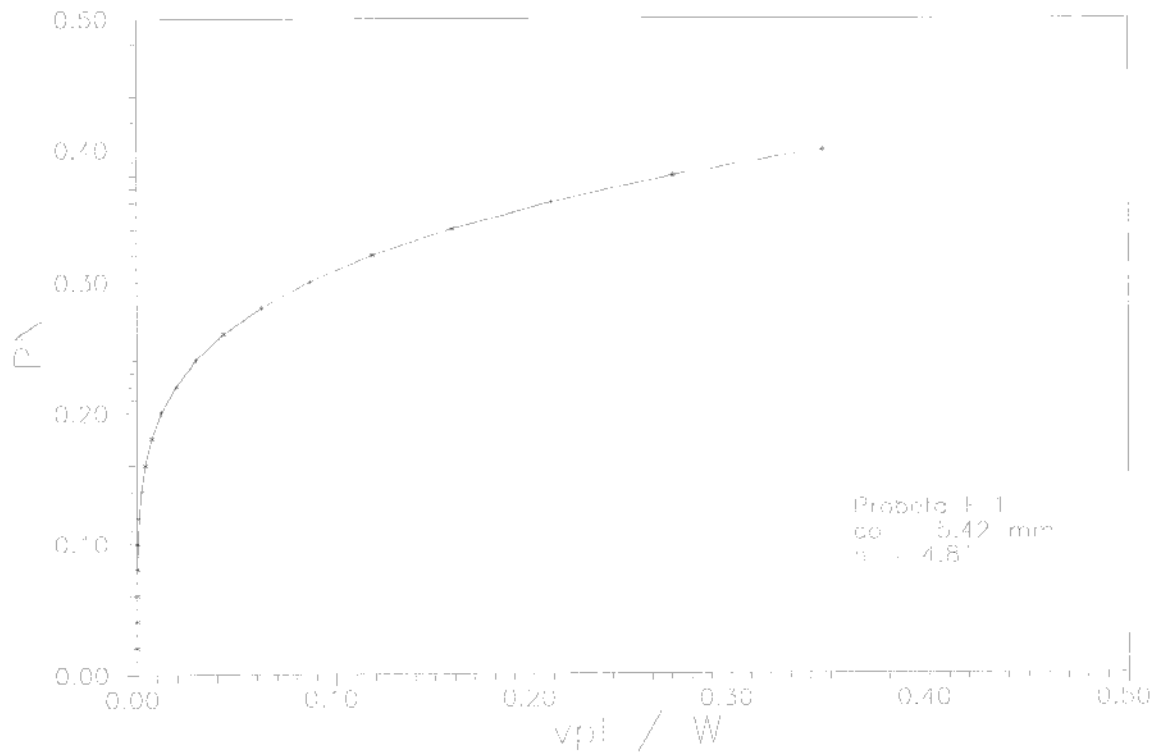


Figura 5-48: Curva de calibración ensayo total (próbeta ET1)

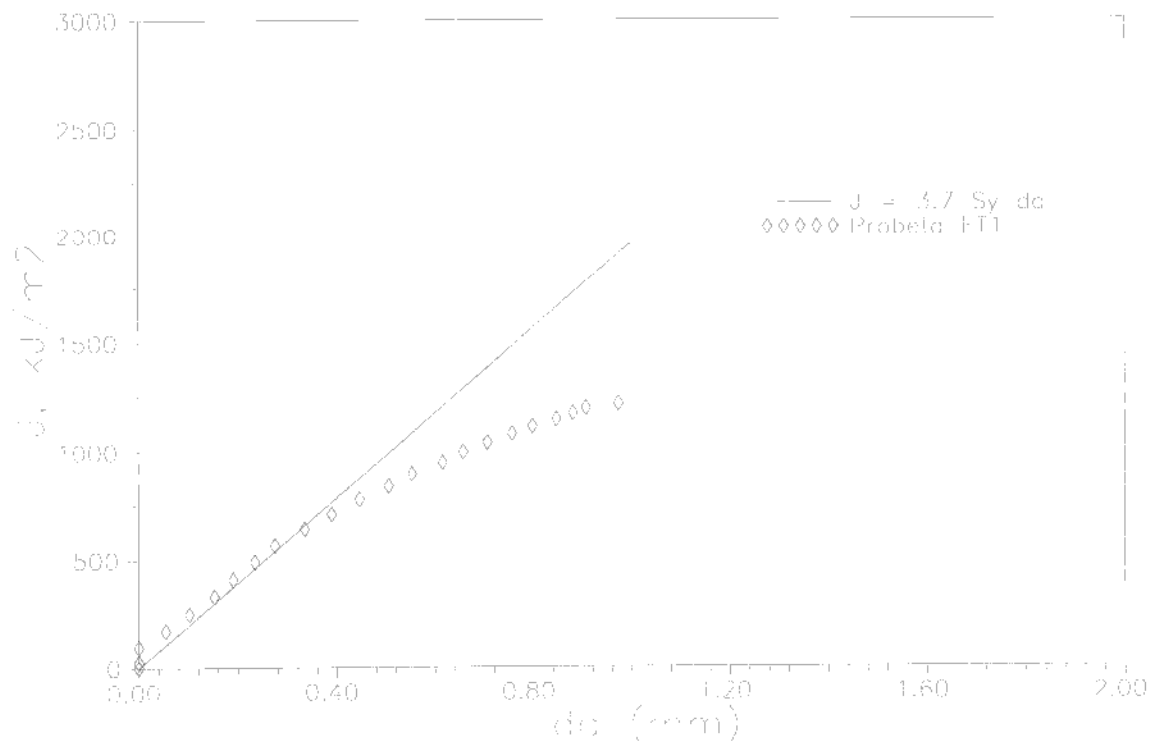


Figura 5-49: Curva J-R ensayo total (próbeta ET1)

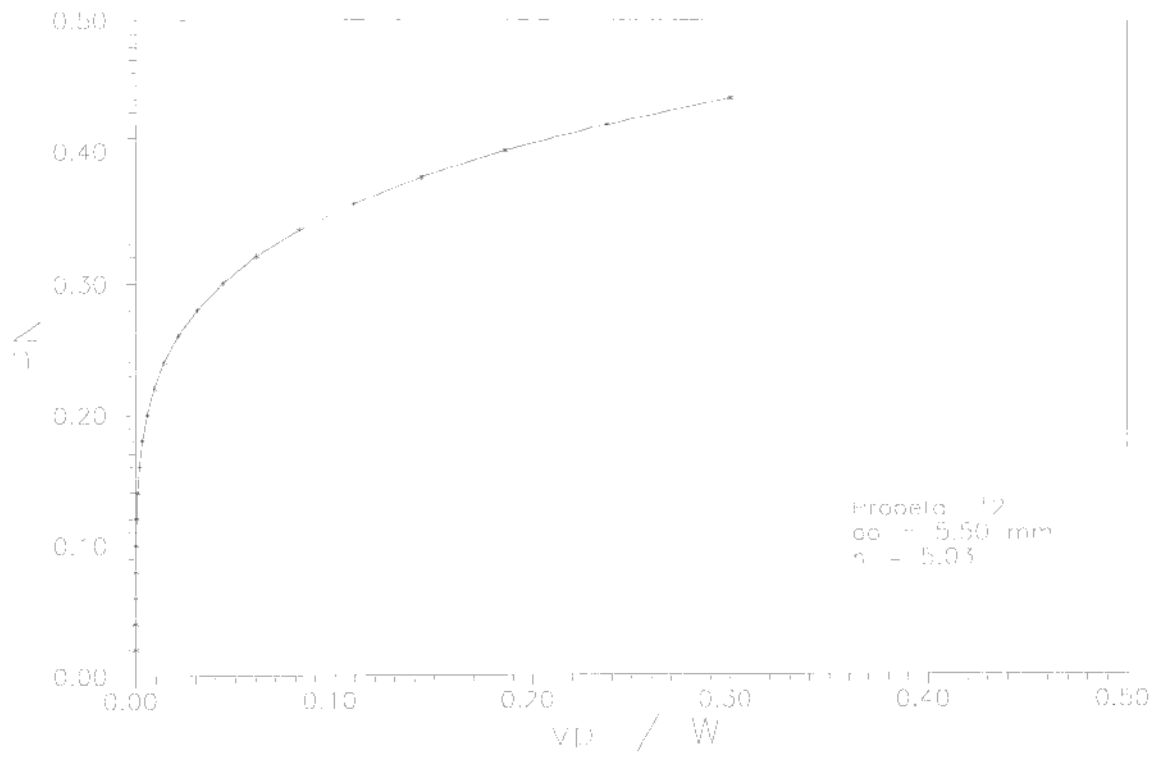


Figura 5-50: Curva de calibración ensayo total (probeta ET2)

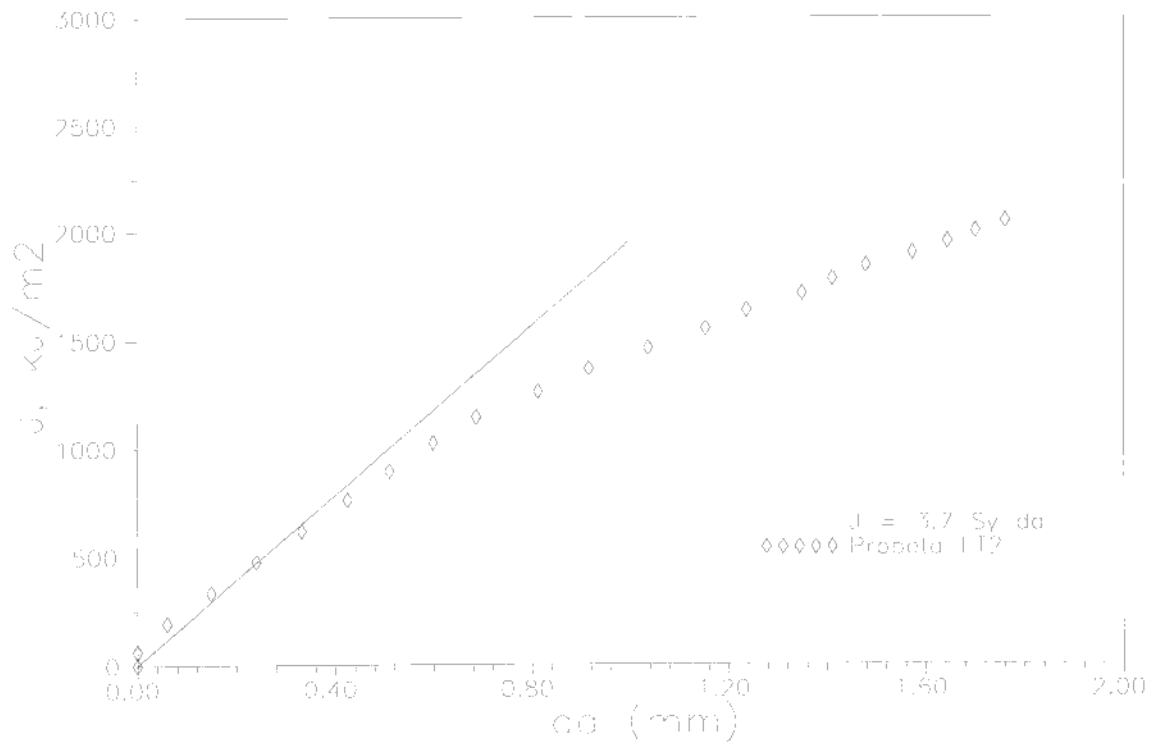


Figura 5-51: Curva J-R ensayo total (probeta ET2)

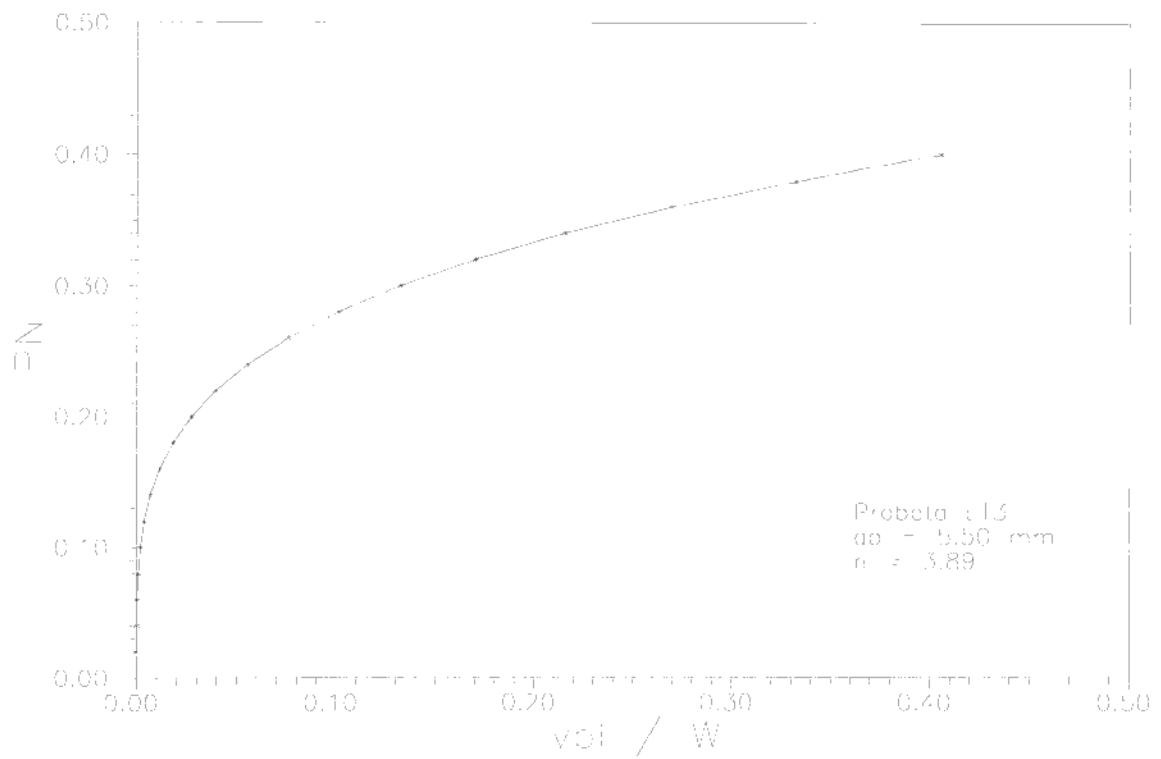


Figura 5-52: Curva de calibración ensayo total (probeta ET3)

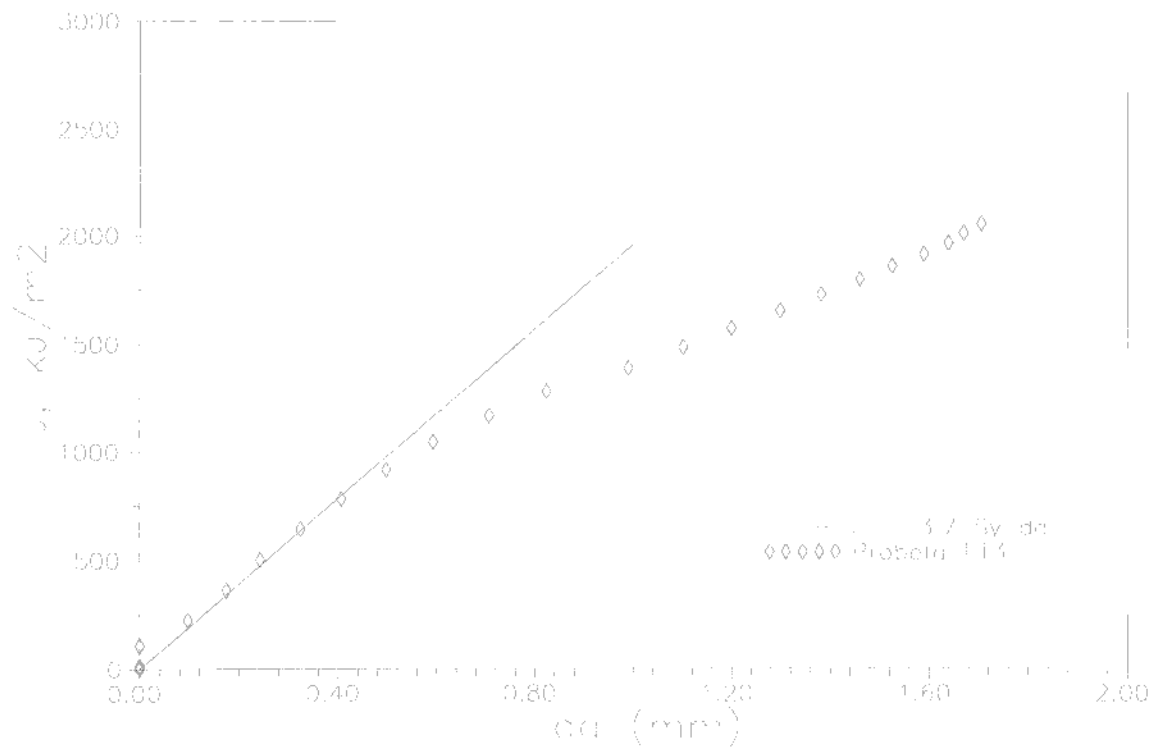


Figura 5-53: Curva J-R ensayo total (probeta ET3)

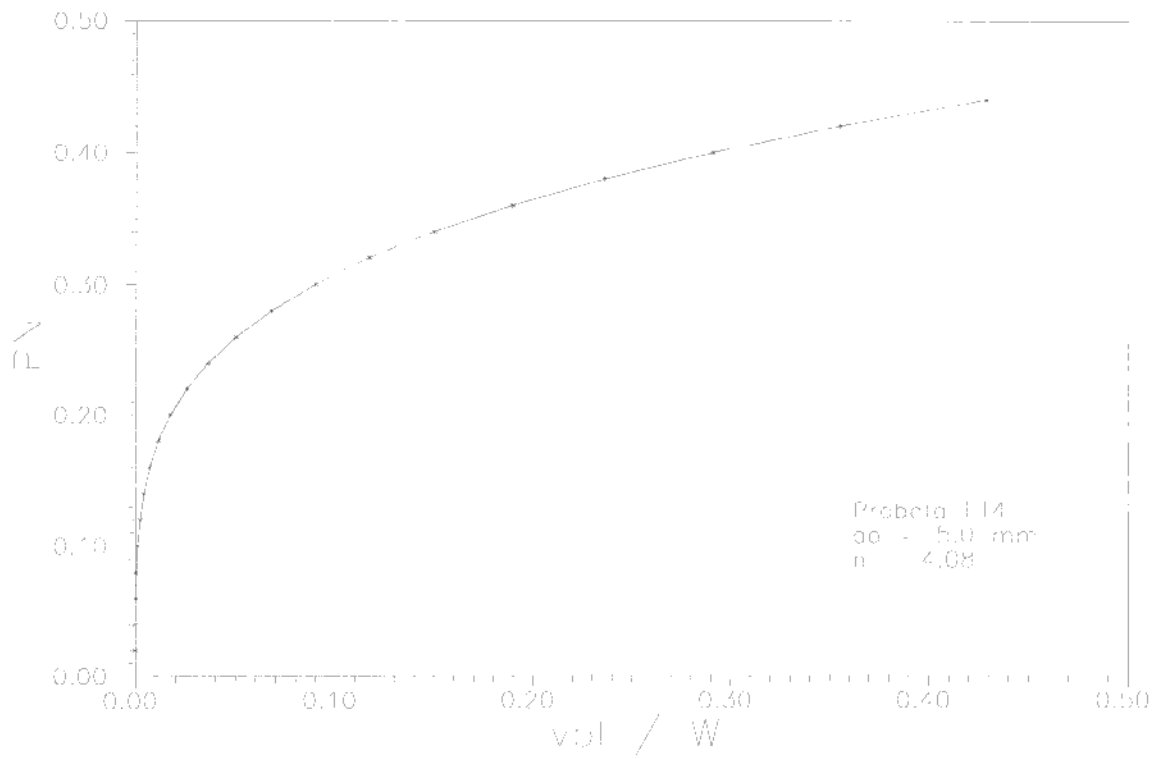


Figura 5-54: Curva de calibración ensayo total (probeta ET4)

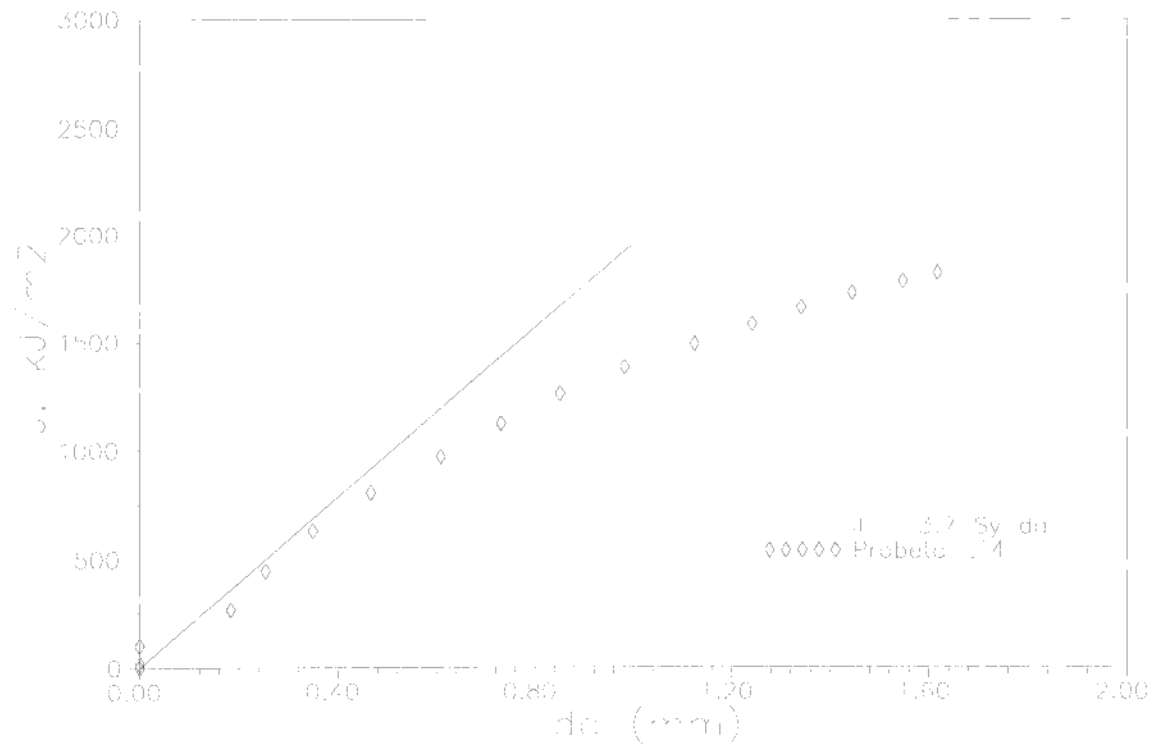


Figura 5-55: Curva J-R ensayo total (probeta ET4)

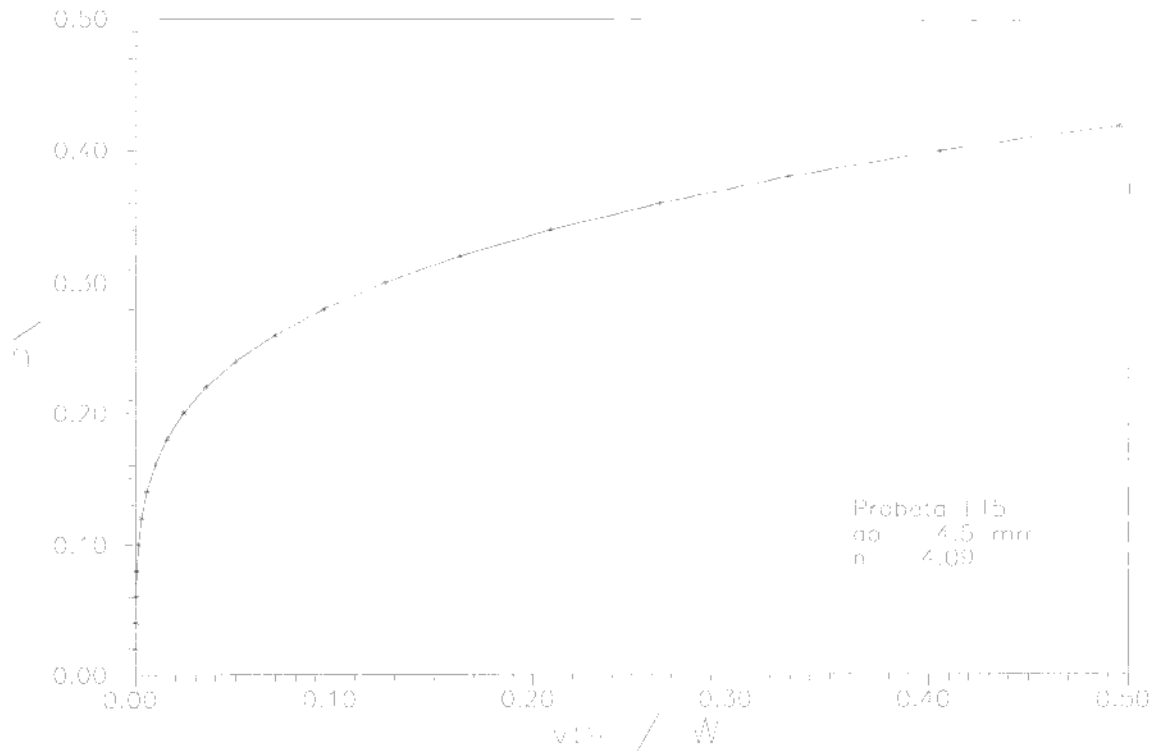


Figura 5-56: Curva de calibración ensayo total (probeta ET5)

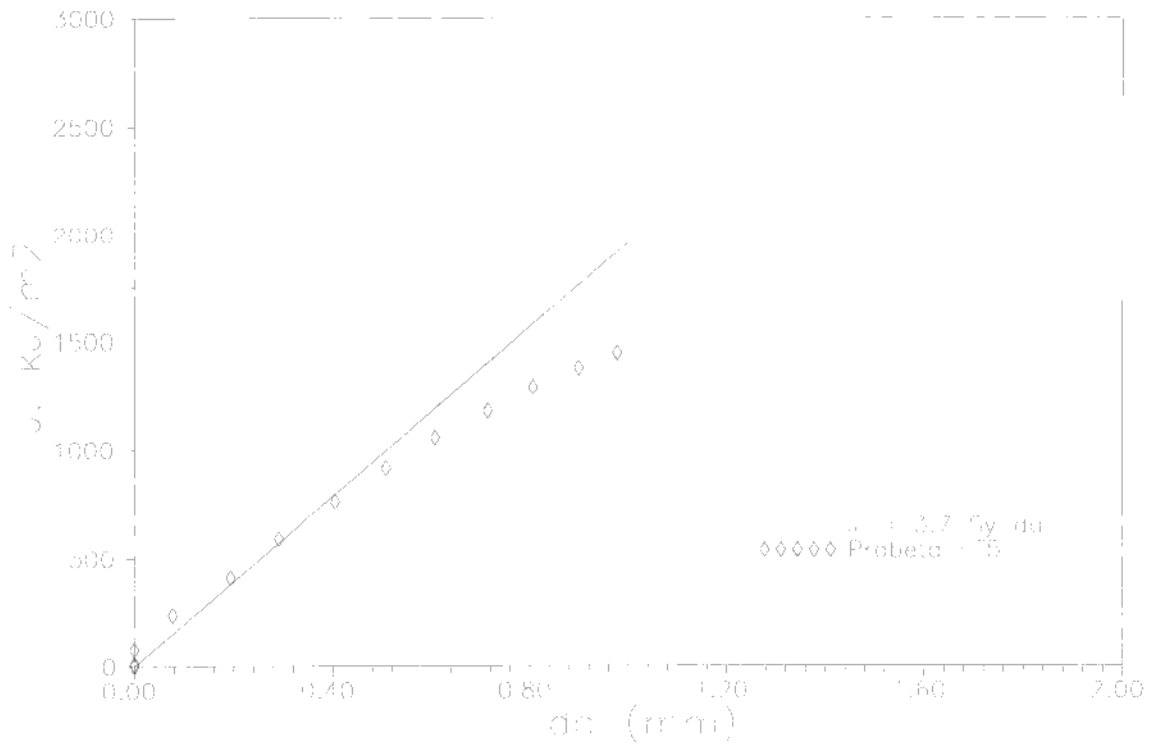


Figura 5-57: Curva J-R ensayo total (probeta ET5)

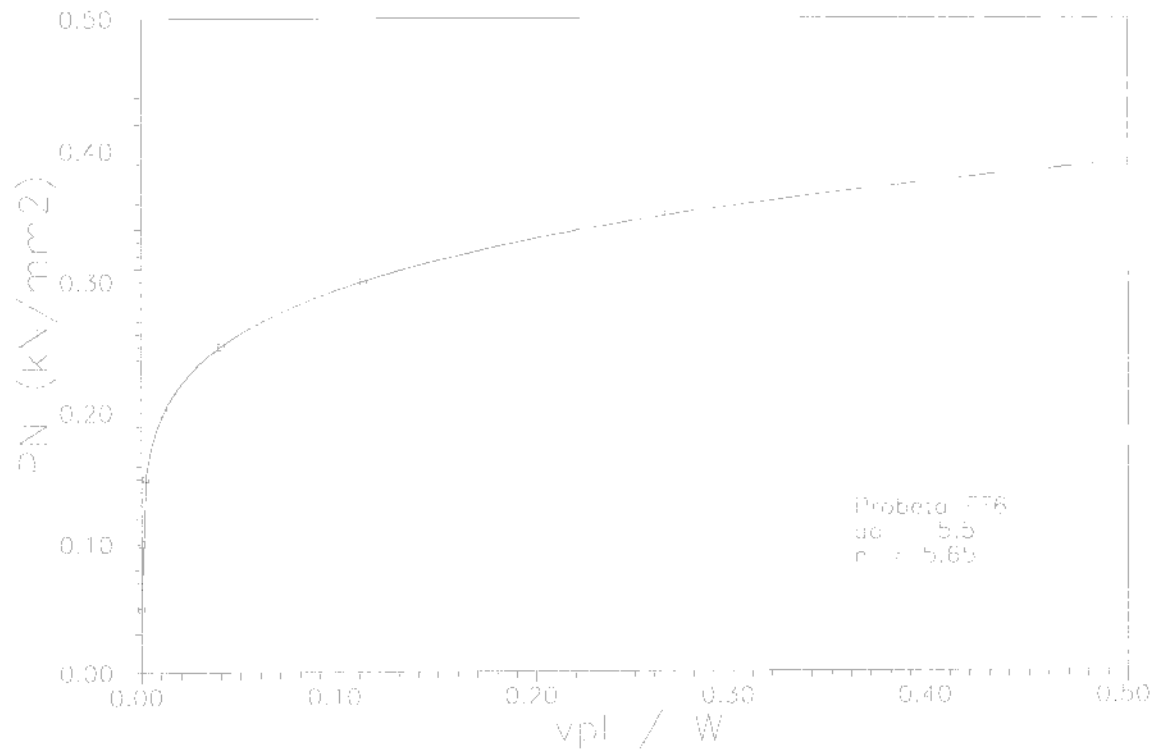


Figura 5-58: Curva de calibración ensayo total (probeta ET6)

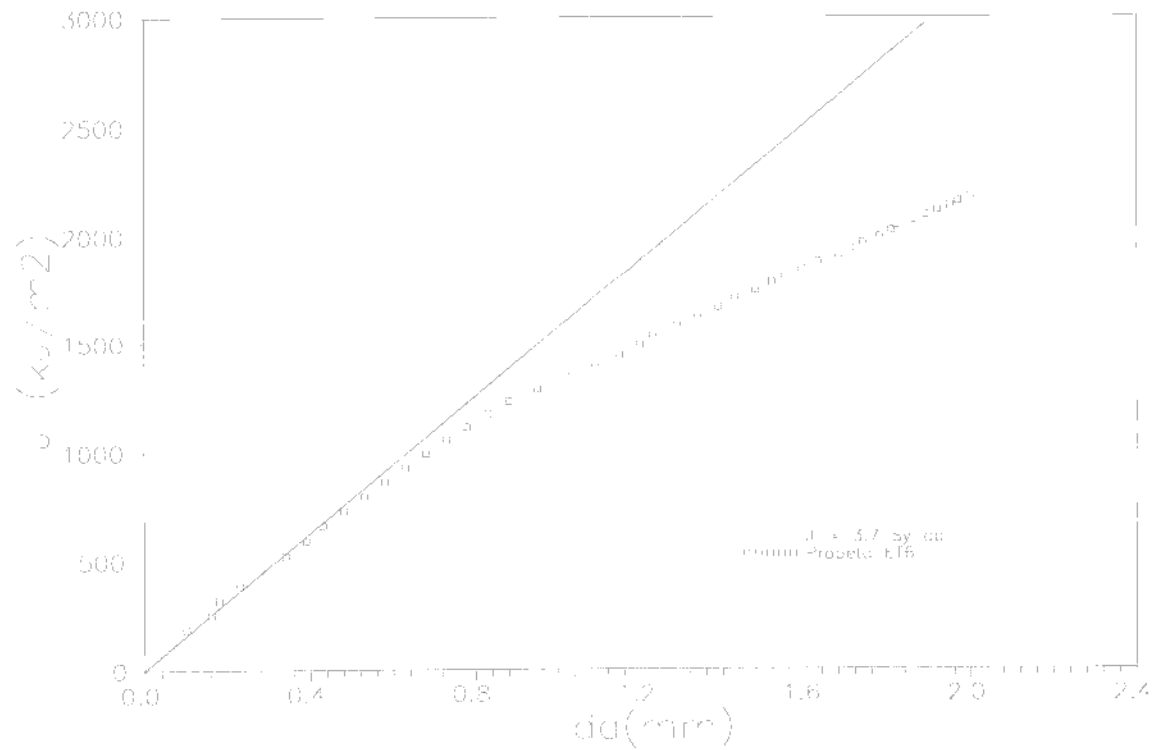


Figura 5-59: Curva J-R ensayo total (probeta ET6)

La Tabla 5-V resume los valores de coeficiente de endurecimiento, n , determinados para las seis probetas ensayadas, junto con el valor de longitud de fisura inicial, media y desvío estándar.

Probeta	ao (mm)	n
ET1	5.42	4.81
ET2	5.50	5.03
ET3	5.50	3.89
ET4	5.00	4.08
ET5	4.50	4.09
ET6	5.50	5.65
Media:		4.59
Std:		0.62

Tabla 5-V: Valores obtenidos de n ensayos totales

El promedio de n se ubica en 4.59, con una dispersión reducida. La figura 5-60 muestra de manera conjunta todas las curvas de calibración obtenidas para estas probetas:

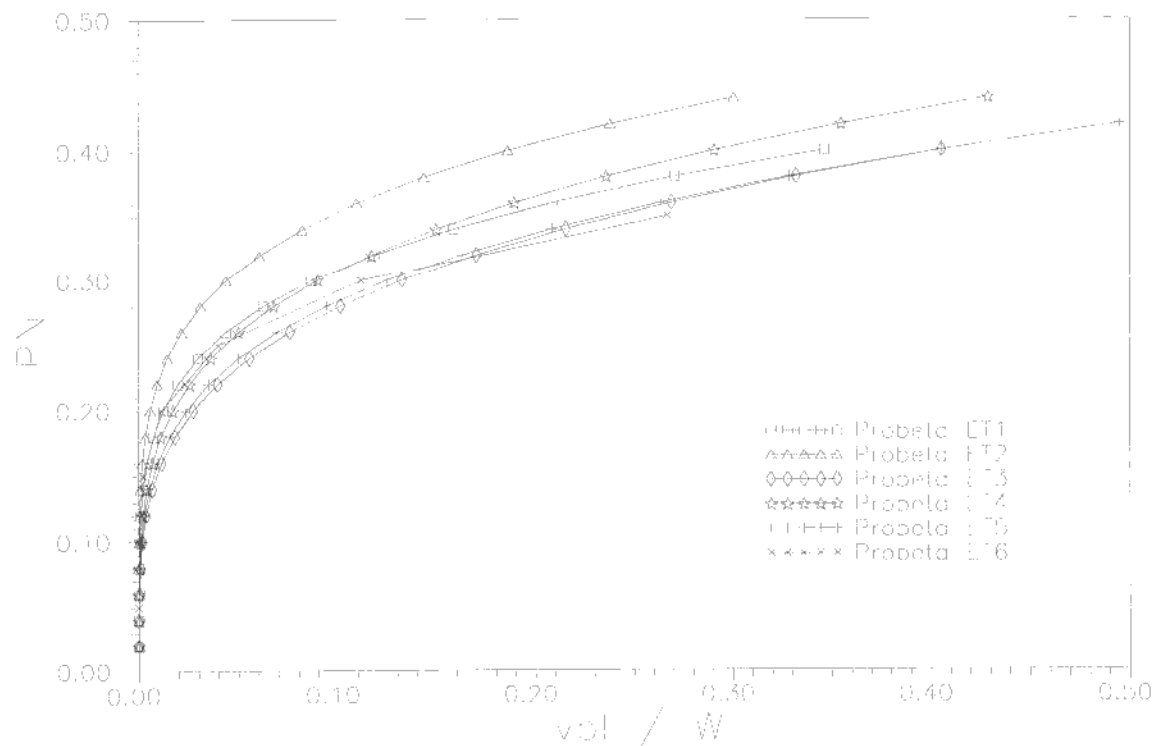


Figura 5-60: Curvas de calibración para ensayos totales

La figura 5-61 muestra en conjunto las curvas J-R obtenidas para todos los ensayos totales. Se muestran asimismo los puntos correspondientes a la estimación de la curva J-R por el método multiprobeta:

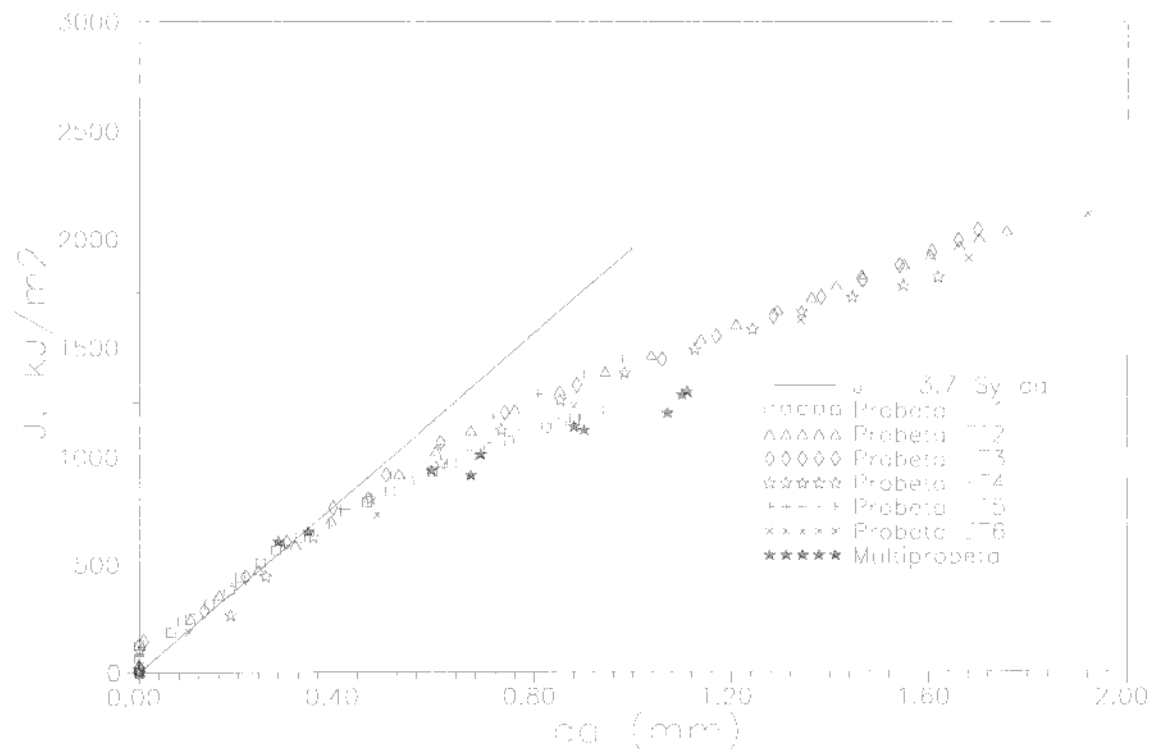


Figura 5-61: Curvas J-R ensayo total y método multiprobeta.

Puede apreciarse una muy buena correspondencia entre las distintas curvas J-R obtenidas. Las distintas curvas coinciden razonablemente con los puntos experimentales obtenidos a través del ensayo multiprobeta con stop block, aunque se observa una cierta tendencia a sobreestimar el valor de J . Esta apreciación coincide con la realizada previamente, respecto a que los valores de crecimiento de fisura calculados tienden a ser algo menores que los reales o medidos. Sin embargo, como se mencionó, la diferencia no supera al 15 % con lo que se considera que los resultados obtenidos son aceptables.

El valor de J_{ID} obtenido para las distintas probetas resulta aproximadamente 700 kJ/m^2 , con limitada dispersión. Nuevamente, este valor de J_{ID} (así como la curva J-R) no puede ser considerado válido para el material analizado, ya que no se verifica la condición 5-4. Es decir, el valor obtenido sólo puede ser considerado válido en el espesor considerado.

A fin de contrastar los resultados obtenidos con la información disponible en la bibliografía, representamos en el mismo gráfico las curvas J-R obtenidas en conjunto con los valores $J-\Delta a$ obtenidos por T. Kobayashi para un material similar (A533B)⁽³⁴⁾ utilizando el método multiprobeta y el de la “key curve” (figura 5-62). Aquí también se

advierte una tendencia a sobreestimar el valor de J cuando se utiliza el método uniprobeta, aunque mayor que la encontrada en este trabajo. Esto puede explicarse por el hecho de que Kobayashi no considera el crecimiento por blunting en la generación de la “key curve”.

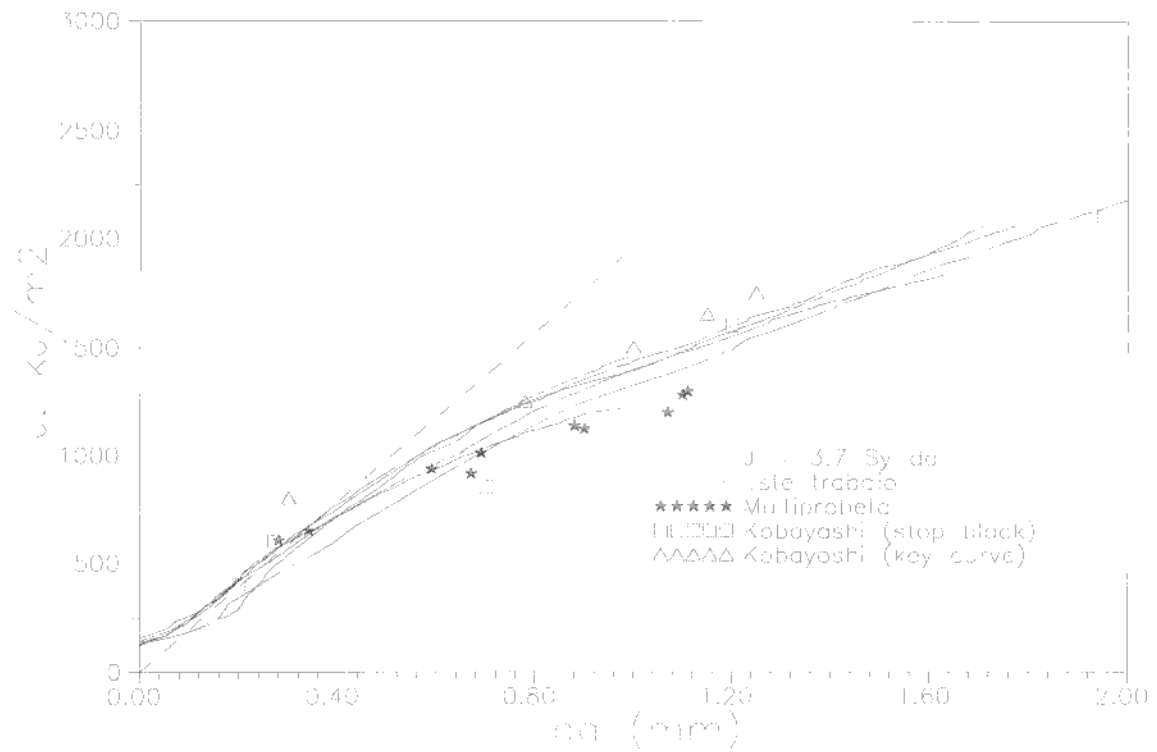


Figura 5-62: Curvas J-R: comparación con la bibliografía⁽³⁴⁾

6.- CONCLUSIONES

Equipamiento desarrollado y tratamiento de los datos de ensayo

- El tipo de ensayos a realizar planteó la necesidad de fabricar elementos adicionales que permitieran incrementar el rango de posibilidades experimentales. La construcción de un dispositivo especial permitió disponer de un rango amplio de velocidades y energías de impacto, y la fabricación del dispositivo denominado “stop block” resultó fundamental, ya que el mismo permitió contar con ensayos donde la profundidad de fisura final pudo ser medida y cotejada con la estimada a partir de la metodología uniprobeta propuesta. De esta manera, los ensayos con stop block constituyeron (ya sea a través del método multiprobeta o el uniprobeta) el punto de referencia contra el cual se cotejaron los resultados obtenidos.
- En el tipo de péndulo utilizado en este trabajo, sólo se disponía de la información carga - tiempo, presentada de manera analógica en la pantalla de un osciloscopio. A fin de convertir esta información en la necesaria para que el ensayo permita la evaluación de propiedades fractomecánicas, fué necesario convertir los registros carga -tiempo en registros carga - desplazamiento. La metodología utilizada se detalló en el punto 4.4, y todo el proceso se automatizó por medio del programa IMPACTO (Anexo I) que realiza el tratamiento experimental que permite la generación de la curva Carga - Desplazamiento. Se corroboró experimentalmente la aptitud del procedimiento desarrollado.
- Para el caso de los ensayos con el stop block, se requirió de hipótesis adicionales que permitieran interpretar este tipo de ensayos (sin antecedentes en la bibliografía). La verificación experimental realizada con los ensayos donde se utilizó el stop block permitió corroborar la aptitud de las hipótesis asumidas (ver figuras 5-15 a 5-34).
- También en forma experimental se determinó la “compliance” del péndulo y la función de compliance de la probeta Charpy standard en función de la longitud de prefisura. La compliance del péndulo se determinó promediando el valor obtenido de distintas aproximaciones, siguiendo el procedimiento propuesto por T. Kobayashi. La función de compliance obtenida para la probeta se cotejó con las existentes en la bibliografía, verificándose que los resultados eran comparables.

Aptitud de la integral J como parámetro de evaluación de la fractoténacidad bajo impacto y determinación del factor η_{pl} .

- Se verificó a través de información de la bibliografía que el rango de velocidades empleado en el ensayo de impacto Charpy no afecta la validez y aplicabilidad de la integral J en su formulación original. Los términos de energía cinética resultan despreciables frente a los términos de deformación elástica y plástica, con lo cual las hipótesis de partida de la formulación de la integral J no se ven afectadas y mantienen su validez.

- Utilizando la metodología propuesta por Sharobean y Landes, se realizó una verificación experimental del factor η_{pl} , a través de la utilización de 12 probetas del tipo “blunt notch”. Los ensayos realizados permitieron verificar la separabilidad de variables en un rango de longitud de fisura entre $a/W = 0.45$ y $a/W = 0.75$, para dimensiones de probeta Charpy standard, y que el valor del η_{pl} se mantiene en el valor teórico $\eta_{pl} = 2$. La consistencia experimental fué muy buena, lo cual corrobora las hipótesis adoptadas en el tratamiento de la información.

Ensayos con “stop block” y método multiprobeta

- Se realizaron un total de 10 ensayos utilizando el dispositivo “ad hoc” desarrollado especialmente. Los ensayos permitieron lograr diferentes crecimientos controlados de fisura, lo que posibilitó que se pudiera aplicar el método “multiprobeta” para la determinación del J_{ID} y curva J-R del material. Por otra parte, los mismos ensayos se utilizaron para aplicar el método uniprobeta para la determinación de la curva J-R, con lo cual pudo verificarse la calidad de la predicción de longitud de fisura final ya que se contaba con un valor de fisura final medido experimentalmente.

Método uniprobeta para la determinación de la curva J-R

- Se propuso y verificó un método experimental para obtener la curva J-R del material a partir de la información Carga - tiempo emergente del ensayo de impacto. El método se basa en el método de la “key curve” propuesto por H. Ernst et al y el método de normalización, que propusieron R. Herrera y J. Landes. El desvío brusco del comportamiento lineal que se produce en la curva $\ln P_N$ vs $\ln V_{pl}/W$ permitió estimar el punto donde se produce la iniciación del crecimiento estable de la fisura (donde se determina el valor del J_{ID}), y define el límite hasta el cual se considera el ajuste lineal por mínimos cuadrados que permite extraer el coeficiente y exponente de la “power law” con que se modela el comportamiento del material sin fisurar (curva de calibración). El método del “cambio de compliancia” para detectar la iniciación que proponen otros investigadores, si bien se basa en el mismo principio que el utilizado aquí, presenta una sensibilidad mucho menor, que dificulta su aplicación práctica. Por otra parte, en la zona previa a la iniciación del crecimiento estable se consideró el crecimiento de fisura por “blunting” en la determinación de la curva de calibración. De esta manera, se elimina una fuente de error en las aproximaciones por el método de la key curve o similares, sobre todo para probetas de las dimensiones de las ensayadas.
- El tratamiento de la información desde el diagrama Carga - Desplazamiento (P vs V) hasta la curva J-R de la probeta se realizó a través del programa FRACDIN, desarrollado especialmente para esta aplicación.
- Los resultados obtenidos sobre el acero 20 MnMoNi con el cual se puso a punto el método permitieron corroborar la aptitud del mismo para generar la curva J-R del material. Además de lograr dispersión mínima entre las distintas curvas J-R

obtenidas para cada probeta, los resultados se verificaron con el método multiprobeta y con datos de ensayos similares realizados sobre el mismo tipo de acero. En el caso particular del acero utilizado, los valores de tenacidad dinámica J_{ID} y curva J-R obtenidos no pueden considerarse parámetros del material pues la probeta no satisface los requisitos dimensionales para que puedan ser considerados válidos. Es decir, los resultados obtenidos sólo son válidos para elementos de espesores similares a los considerados. Para obtener parámetros representativos de este material, se deberán utilizar probetas de espesor mayor y/o entallado lateral.

Conclusión final

Se planteó un método de ensayo que permite obtener, a partir de la instrumentación mínima de un ensayo Charpy con probeta prefisurada, toda la información que permite la caracterización fractomecánica de un material de comportamiento elasto-plástico, en este caso bajo condición de impacto. La metodología propuesta permite obtener toda la información a partir del ensayo de una sola probeta, manteniendo las ventajas que hacen del ensayo Charpy uno de los ensayos de materiales más exitosos y difundido: sencillez de operación, rapidez, economía. Con la incorporación de simples programas de cálculo como los utilizados en este trabajo, es posible la automatización total del tratamiento de la información, requiriéndose de pocos minutos para la obtención de la información del ensayo. La amplia difusión de hoy en día de adquirentes de datos de alta velocidad, y las facilidades de cálculo tornan a esta técnica muy atractiva para ser aplicada en forma modular, con bajo costo y mínima capacitación del operador, en cualquier péndulo con instrumentación del mercado o especialmente fabricado.

8.- Referencias

1. "Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness", E-813, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, ASTM, Philadelphia, 1987, p. 519-554.
2. "Standard Test Method for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials", ASTM E-23, Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01 ASTM, Philadelphia, 1984, pp 210-233.
3. "Dynamic Fracture Toughness", Metals Handbook, 9th Ed.
4. J. M. Barsom and S. T. Rolfe, "Correlations Between K_{IC} and Charpy V-Notch Test Results in the Transition Temperature Range", in Impact Testing of Materials, STP 466, ASTM, Philadelphia, 1979, p. 281-302.
5. R. H. Sailors and H. T. Corten, "Relationship Between Material Fracture Toughness Using Fracture Mechanics and Transition Temperature Tests", in Fracture Toughness, Proceedings of the 1971 National Symposium on Fracture Mechanics, STP 514, part. II, ASTM, Philadelphia, 1972, p. 164-191.
6. D. R. Ireland, W. L. Server, and R. A. Wullaert, "Procedures for Testing and Data Analysis", ETI Report TR 75-43, Effects Technology Inc., Santa Bárbara, CA, Oct. 1975.
7. Saxton, H. J., Ireland, D. R. and Server, W.L. "Analysis and Control of Inertial Effects During Instrumented Impact", Instrumented Impact Testing, ASTM STP 563, 1974.
8. Ireland, D. R., "Procedures and Problems Associated with the Reliable Control of the Instrumented Impact Test", Instrumented Impact Testing, ASTM STP 563, 1974.
9. "Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materilas", E-399, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, ASTM, 1990, Philadelphia,
10. T. Kobayashi, K Matsunuma and H. Ikawa, "Evaluation of Static and Dynamic Fracture Toughness in Ceramics", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 31, N° 5, pp. 873-885, 1988.
11. T. Kobayashi, M. Niimoni and Y. Yamamoto, "What does it Tell us? - Computer Aided Instrumented Charpy Impact Testing System", Proc. Oji Int. Seminar on Dynamic Fracture, Aug. 1989, Toyohashi, Japan.

12. Tregoning, R. L., Shapiro, J.M., and Sharpe, W. N., Jr., "*Dynamic Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Measurements with Application to Fracture Toughness Testing*", Rapid Load Fracture Testing, ASTM STP 1130, Ravinder Chona and William R. Corwin, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992., pp. 118-133.
13. Varga, T. and Schneeweiss, G. "*A New Method to Crack-Arrest Toughness by using Three Point Bend Specimens*", Rapid Load Fracture Testing, ASTM STP 1130, Ravinder Chona and William R. Corwin, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992., pp. 134-146.
14. Rice, J. R., "*A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks*", Journal of Applied Mechanics, Vol. 35, 1968, pp. 379-386.
15. Rice, J. R. "*Mathematical Analysis in the Mechanics of Fracture*", Fracture and Advanced Treatise, Vol. 2, H. Liebowitz, Ed., Academic Press, New York, 1968.
16. Nakamura, T., Shih, C. F., and Freund, L. B., "*Three Dimensional Transient Analysis of a Dynamically Loaded Three Point Bend Ductile Fracture Specimen*", Nonlinear Fracture Mechanics, Volume 1: Time-Dependent Fracture, ASTM STP 995, A. Saxena, J. D. Landes, and J. L. Bassani, Eds., American Society for testing and Materials, Philadelphia, 1989, pp. 217-241.
17. Begley, J. A. and Landes, J. D., "*The J Integral as a Fracture Criterion*", Fracture Toughness, ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1972, pp. 1-23.
18. Landes, J. D. and Begley, J. A., "*The Effect of Specimen Geometry on J_{IC}* ", Fracture Toughness, ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1972, pp. 24-39.
19. Rice, J. R., Paris, P.C. and Merkle, J. G., "*Some Further Results of J-Integral Analysis and Estimates*", Progress in Flaw Growth and Fracture Toughness Testing, ASTM STP 536, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1973, pp. 231-245.
20. Ernst, H. A., Paris, P.C., Rossour, M. and Hutchinson, J. W., "*Analysis of Load Displacement Relationship to Determine J-R Curve and Tearing Instability Material Properties*", Fracture Mechanics, ASTM STP 677, American Society for Testing and Materials, pp. 581-599 (1979).
21. Joyce, J. A., Ernst, H.A. and Paris, P.C., "*Direct Evaluation of J-Resistance Curves from Load-Displacement Records*", Fracture Mechanics, (Twelfth Conference), ASTM STP 700, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1980, pp. 222-236.

22. Landes, J. D., and Herrera, R. "*A New Look at J-R Curve Analysis*", International Journal of Fracture, Vol. 36, 1988, pp. R9-R14.
23. Herrera, R. And Landes, J.D., "*A Direct J-R Curve Analysis of Fracture Toughness Tests*", Journal of Testing and Evaluation, Vol. 16, No. 5, 1988, pp. 427-449.
24. Herrera, R. and Landes, J. D. "*Direct J-R Curve Analysis: A Guide to the Methodology*", Fracture Mechanics, Twenty-First Symposium, ASTM STP 1074, J. P. Gudas, J. A. Joyce and E. Hackett eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990, pp. 114-132.
25. Yin, X.C., "*A Simple Iterative Key Curve Method for determining J-R Curves*", Int. J. pres. Ves. & Piping, Vol 53 (1993), pp. 143-157.
26. Sharobeam, M.H. and Landes, J. D., "*The Separation Criterion and Methodology in Ductile Fracture Mechanics*", International Journal of Fracture, Vol. 47, 1991, pp. 81-104.
27. "*Standard Test Method for Determining J-R Curves*", E-1152-87 Annual Book of ASTM Standards, ASTM, Philadelphia, 1987, p. 1129-1145.
28. Nguyen-Duy, P. and Flamand, J. "*Use of Precracked Charpy-V-Notch and Side Grooved Precracked Charpy-V-Notch Specimens for Fracture Toughness (J-Integral) Evaluation by Impact Testing*", Institut de Recherche d' Hydro-Québec (IREQ), The American Society of Mechanical Engineers, ASME 83-WA/PVP-9.
29. Nguyen-Duy, P., Phelippeau, G., Simoneau, R. and Begin, G., "*The Determination of the J-Integral on Precracked Charpy Specimens by Instrumented Impact Testing and Slow-Bend testing*", Journal of Engineering Materials and Technology, July 1978, Vol. 100, pp. 253-257.
30. Nguyen-Duy, P, "*Effects of Loading Rate and Temperature on Fracture Toughness of 4130 Quenched and Tempered Steel Using Precracked Charpy V-Notch Specimens*", Fracture Mechanics: Fourteenth Symposium-Volume II: Testing and Applications, ASTM STP 791, J. C. Lewis and G. Sines Eds., American Society for Testing and Materials, 1983, pp. 341-352.
31. Murty, K. N., Rao, N. K. and Krishnan, "*Application of Instrumented Impact Testing for Studing Dynamic Fracture Behaviour of Rotor Steels*", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 18, N° 6, pp. 1173-1184, 1983.
32. Martin, E., Macke, T. and Quenisset, J. M. "*Fracture Parameters Determination at Yield Point and Fracture Initiation in Instrumented Impact Testing*", Engineering Fracture Mechanics, Vol 24, N° 6, pp. 821-836, 1986.

33. Kobayashi, T. "*Measurement of Dynamic Fracture Toughness J_{ID} by Instrumented Charpy Tests*", International Journal of Fracture, Vol 23, pp. R105-R109, 1983.
34. Kobayashi, T. "*Analysis of Impact Properties of A533 Steel for Nuclear Reactor Pressure Vessel by Instrumented Charpy Test*", Engineering fracture Mechanics, Vol 19, n° 1, pp. 49-65, 1984.
35. Kobayashi, T. "*On the Information About Fracture Characteristics Obtained from Instrumented Impact Test of A533 Steel for Reactor Pressure Vessel*", Engineering Fracture Mechanics, Vol 19, N° 1, pp- 67-79, 1984.
36. Kobayashi, T., Yamamoto, Y. , and Niimoni, M. "*Evaluation of Dynamic Fracture Toughness Parameters by Instrumented Charpy Impact Test*", Engineering Fracture Mechanics, Vol 24, N° 5, pp. 773-782, 1986.
37. Kobayashi, T., Yamamoto, Y. , and Niimoni, M. "*On the Accuracy of Measurement of Dynamic Elastic-Plastic Fracture Toughness Parameters by the Instrumented Charpy Test*", Engineering Fracture Mechanics, Vol 26, N°1, pp. 83-94, 1987.
38. Kobayashi, T., Niimoni, M., Yamamoto, I. and Kamimura, M. "*Evaluation System of Dynamic Elastic-Plastic Fracture Toughness Parameters by Instrumented Charpy Test*", Impact Loading and Dynamic Behaviour of Materials, Ed. by C.Y. Chiem, H.D. Kunze, L.W. Meyer (DGM InformationsgesellschaftmbH, 1988) Vol. 1.
39. Kobayashi, T., Yamamoto, Y. , and Niimoni, M. "*Introduction of a New Dynamic Fracture Toughness Evaluation System*", Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 21, N° 3, May 1993, pp. 145-153.
40. McConnell, P. "*Dynamic Fracture Toughness of Ductile Iron*", Rapid Load Fracture Testing, ASTM STP 1130, Ravinder Chona and Willam R. Corwin Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1991, pp. 104-117.
41. Joyce, J. A. and Schneider, C. S., "*Application fo Alternating Current Potential Difference to Crack lenght Measurement During Rapid Loading*", Prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-4699, 1986.
42. Joyce, J. A. and Hackett, E. M., "*Transition Range Drop Tower J-R Curve Testing of A106 Steel*", Prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-4818, 1987.
43. Joyce, J. A. and Hackett, E. M., "*Application of the Key Curve and Multi-Specimen Techniques to Dynamic J-R Curve Testing of Alloy Steel*", Prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-4579, 1986.

44. Marur P. R., Simha, K. R. Y., and Nair, P. S., *A Compact Testing System for Dynamic Fracture Studies*", Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 23 N° 4, July 1995, pp. 267-274.
45. Sharpe, W.N and Bohme, W., "*Dynamic Fracture Toughness Measurements on Small Charpy Specimens - A Preliminary Study*", Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 22, N° 1, January 1994, pp. 14-19.
46. Viehrig, H. W., Popp, K. "*Measurement of Dynamic Elastic-Plastic Fracture Toughness Parameters Using Various Methods*", Int. J. Pres. Ves. & Piping, 55, (1993), pp. 233-241.
47. Shanmugam, P. , Biswanath, J. and Pathak, S.D., "*Dynamic Fracture Toughness (DFT) of Banded HSLA Steels*", Journal of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 23, N° 1, January 1995, pp. 11-18.
48. Yin, X. C. , "*A Simple Iterative Key Curve Method for determining J-R Curves*", Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol 53 (1993) pp. 143-157.
49. Chen, B. Y. and Shi, Y. W., "*A Comparison of Various Dynamic Elastoplastic Fracture Toughness Evaluating Procedure by Instrumented Impact Test*", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 36, N° 1, pp. 17-26, 1990.
50. Kumar, V., German, M.D. and Shih, C.F., "*An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis*", Electric Power Research Institute, NP 1931, Topical Report, July 1981.
51. "*Dynatup Model 500 Instruction Manual*", Effects Technology, Inc. , Santa Bárbara, California.
52. Server, W.L., "*General Yielding of Charpy V-Notch and precracked Charpy Specimens*", J. Engng. Mat.Tech. Trans. ASME 100, 183-188 (1978).

Anexo I

```

0@rw10 CLS:SCREEN 2:KEY OFF:BA3 = 1: PRINT " "
20 PRINT " "
30 PRINT " "
40 PRINT "                I M P A C T O "
50 PRINT " "
60 PRINT " "
70 PRINT "                Este programa permite, a partir del registro carga-tiempo"
80 PRINT "                obtenido en un ensayo de impacto tipo Charpy, determinar los
90 PRINT "                valores correspondientes de velocidad, desplazamiento total,
100 PRINT "                desplazamiento de la probeta y energia."
110 PRINT "                Permite ademas la obtencion de graficos con estas
120 PRINT "                variables y formar un archivo de datos con estas, y contempla la
130 PRINT "                posibilidad de realizar ajustes por cuadrados minimos y filtrado
140 PRINT "                digital."
150 PRINT " "
160 PRINT " "
170 PRINT "                Autor: Ing. Gabriel E. Carcagno"
180 LINE (1,8)-(580,150), ,B
190 LINE (4,10)-(577,148), ,B
200 LOCATE 23,1:PRINT "Pulse cualquier tecla para continuar"
210 A$ = INKEY$ : IF A$ = "" THEN 210
220 CLS: PRINT ""
230 PRINT ""
240 PRINT ""
250 PRINT "                IMPORTANTE:"
260 PRINT "                Para obtener salidas impresas de los graficos se deb
270 PRINT "                cargar el comando GRAPHICS desde el sistema previamente
280 PRINT "                cargar el presente programa. "
290 PRINT "                Para imprimir los graficos , se debera oprimir la te
300 PRINT "                cla Print Screen en el momento que se desee."
310 LINE (1,8)-(580,100), ,B
320 LINE (4,10)-(577,98), ,B
330 LOCATE 23,1: PRINT " Pulse cualquier tecla para continuar"
340 A$ = INKEY$ : IF A$ = "" THEN 340
350 CLS : SCREEN 2
360 PRINT "Utiliza archivo de datos ? (S/N)"
370 BO$ = INPUT$(1) : IF BO$ = "n" THEN 390
380 IF BO$ = "s" THEN 600 ELSE 360
390 CLS:INPUT "Introduzca numero de puntos de la curva: ",X : N = 2*X - 1
400 DIM P(N),T(N),V(N),D(N),DS(N),E(N),X(N),XA(N),Y(N),YA(N),YR(N),SX(N),SY(N)
410 DIM K(N),Q(N)
420 IF BO$ = "s" GOTO 690 'Utiliza archivo de datos
430 CLS: PRINT " Introduzca los siguientes valores:"
440 PRINT ""
450 INPUT "Masa del pendulo (en kg): ",M
460 PRINT ""
470 INPUT "Velocidad inicial vo (m/s):",V(0)
480 PRINT ""
490 INPUT "Complianza de la maquina (en mm/kg):",CM
500 PRINT ""
510 INPUT "Tiempo inicial (ms): ",T(0)
520 PRINT ""
530 INPUT "Relacion a/W : ",A0W
540 PRINT ""
550 INPUT "Energia Disponible (J):",EDIS
560 PRINT ""
570 INPUT "Energia Residual (J):",ERES
580 P(0)=0: D(0)=0: DS(0)=0: E(0)=0
590 XA(0)=83: GOTO 770
600 CLS: PRINT "Introduzca el disco en el Drive A y pulse"
610 PRINT "cualquier tecla para continuar"
620 B5$ = INKEY$ : IF B5$ = "" THEN 620
630 PRINT ""
640 INPUT "Numero de probeta"; P

```

```

650 A$ = "a:\probetas\PR" + STR$(P)
660 W$ = "a:\probetas\C" + STR$(P)
670 N = 500
680 GOTO 400
690 OPEN W$ FOR INPUT AS #2
700 INPUT #2, N,M,V(0),CM,T(0),P(0),D(0),DS(0),E(0),XA(0),AOW,EDIS,ERES
710 CLOSE
720 OPEN A$ FOR INPUT AS # 1
730 FOR I = 1 TO N
740 INPUT # 1 , P(I),T(I)
750 NEXT I
751 CLOSE
752 D$ = "a:\probetas\dp" + STR$(P)
754 OPEN D$ FOR INPUT AS #3
756 FOR I = 1 TO N
758 INPUT # 3, DS(I),E(I),V(I)
759 NEXT I
760 CLOSE: GOTO 1450
770 CLS:PRINT "Entre los valores de P[kg] y T[ms]"
780 PRINT ""
790 FOR I=1 TO N STEP 2
800 PRINT I:INPUT " ",P(I),T(I):NEXT I
810 FOR I = 2 TO N - 1 STEP 2
820 P(I) = (P(I - 1) + P(I + 1))/2
830 T(I) = (T(I - 1) + T(I + 1))/2
840 NEXT I
850 CLS:PRINT ""
860 PRINT" N          P[kg]          T [ms]"
870 PRINT ""
880 FOR I=1 TO N : PRINT I,P(I), T(I)
890 NEXT I
900 PRINT ""
910 PRINT "Desea corregir algun valor ? (S/N) "
920 B9$ = INPUT$(1): IF B9$ = "s" THEN 940
930 IF B9$ = "n" THEN 970 ELSE 910
940 INPUT "Introduzca punto a corregir (n):",I
950 INPUT "introduzca nuevo valor p,t";P(I),T(I)
960 GOTO 850
970 FOR I = 1 TO N
980 P(I) = 9.810001*P(I)/1000:NEXT I
990 X = 2: Y = 1:U$ = "T [ms]":V$ = "P [N]":YMIN = 0
1000 IF T(N) < 1 THEN XMAX = 1
1010 IF (T(N) > 1) AND (T(N) < 5) THEN XMAX = 5
1020 IF (T(N) > 5) AND (T(N) < 10) THEN XMAX = 10
1030 IF T(N) > 10 THEN XMAX = 20
1040 IF T(N) = 1 THEN XMAX = 1
1050 IF T(N) = 5 THEN XMAX = 5
1060 IF T(N) = 10 THEN XMAX = 10
1070 YMAX = 9
1080 CLS: GOTO 2130
1090 CLS:PRINT "Inserte el diskette en la unidad A"
1100 PRINT "y pulse cualquier tecla para continuar"
1110 PRINT ""
1120 B10$ = INKEY$ :IF B10$ = "" THEN 1120
1130 INPUT "Numero de probeta"; B
1140 B$ = "a:\probetas\PR" + STR$(B)
1150 Z$ = "a:\probetas\C" + STR$(B)
1160 OPEN Z$ FOR OUTPUT AS #2
1170 PRINT #2, N;M;V(0);CM;T(0);P(0);D(0);DS(0);E(0);XA(0);AOW;EDIS;ERES
1180 CLOSE
1190 OPEN B$ FOR OUTPUT AS # 1
1200 FOR I = 1 TO N
1210 PRINT # 1, P(I);T(I)
1220 NEXT I

```

```

1230 CLOSE
1240 CLS:DATA "Ensayo total","Stop Block":SEL = 2:K15 = 0
1250 GOSUB 5000
1260 IF SB$ = "Ensayo total" GOTO 1330
1270 CLS:PRINT "Introduzca N1 y N2"
1280 LOCATE 20,1:PRINT "N1 : Comienzo del contacto con el Stop Block"
1290 LOCATE 22,1:PRINT "N2 : Fin del contacto con el Stop Block"
1300 LOCATE 5,1:INPUT "N1,N2: ",N1,N2
1310 N1 = N1*2 - 1:N2 = N2*2 - 1
1320 IF SB$ = "Stop Block" THEN NX = (N1 + N2)/2 ELSE NX = N
1330 FOR I=1 TO NX
1340 V(I) = V(I-1)-((P(I-1)+P(I))*(T(I)-T(I-1))*1000/(204.081* 9.810001*M))
1350 D(I)=D(I-1)+(V(I)+V(I-1))*(T(I)-T(I-1))/2 'd en mm
1360 DS(I)=D(I)-P(I)*CM*1000/9.810001 'cm = 9.01 * 10^-5
1370 E(I)=((V(0)^2 - V(I)^2)* M/2)-((P(I)*1000)^2)* CM /(9.810001*2000)
1380 NEXT I:IF SB$ = "Ensayo total" GOTO 1450
1390 PSBMX = V((N1 + N2)/2)*3.14159*M/(T(N2) - T(N1))
1400 FOR I = N1 + 1 TO N2
1410 V(I) = V(I-1) - (T(I) - T(I-1))*(P(I) + PSBMX*SIN(3.14159*(T(I)-T(N1)))/(T(
1420 D(I) = D(I-1) + (V(I-1) + V(I))*(T(I) - T(I-1))/2
1430 DS(I) = D(I) - (P(I) + PSBMX*SIN(3.14159*(T(I)-T(N1)))/(T(N2)-T(N1))))*CM*1
1440 E(I) = E(I - 1) + (P(I)+P(I - 1))*(DS(I) - DS(I - 1))/2:NEXT I
1450 I = 0
1460 CLS: PRINT " N          P [kN]          Ds [mm]          V [m/s]          E [J]"
1470 PRINT ""
1480 IF (I + 8) > N THEN 1490 ELSE 1500
1490 CLS:LOCATE 3,1:FOR I = I TO N:PRINT I:PRINT USING "          ####.####";P(I),
1500 LOCATE 3,1:FOR I = I TO I + 8: PRINT I:PRINT USING "          ####.####";P(I)
1510 PRINT ""
1520 PRINT "Pulse cualquier tecla para continuar"
1530 B11$ = INKEY$: IF B11$ = "" THEN 1530
1540 IF I = N + 1 THEN 1550 ELSE 1460
1550 CLS:PRINT "Desea grabar los valores de Desplazamiento, Energia y Velocida
1560 B2$ = INPUT$(1) : IF B2$ = "s" THEN 1580
1570 IF B2$ = "n" THEN 1680 ELSE 1550
1580 CLS:PRINT "Introduzca el disco en el Drive A y pulse"
1590 PRINT "cualquier tecla para continuar"
1600 B3$ = INKEY$: IF B3$ = "" THEN 1600
1610 PRINT "":INPUT "Numero de Probeta"; PR
1620 C$ = "a:\probetas\dp" + STR$(PR)
1630 OPEN C$ FOR OUTPUT AS #3
1640 FOR I = 1 TO N
1650 PRINT #3, DS(I),E(I),V(I),P(I)
1660 NEXT I
1670 CLOSE
1680 CLS :BA2 = 1
1690 PRINT "Desea imprimir los valores obtenidos ? (S/N)"
1700 B4$ = INPUT$(1) : IF B4$ = "s" THEN 1720
1710 IF B4$ = "n" THEN 1780
1720 LPRINT "          P [kN]          T [ms]          V [M/S]          D [mm]          DS [mm]          E [J]          E [ftl
1730 LPRINT " "
1740 LPRINT " "
1750 FOR I=1 TO N
1760 LPRINT USING "          ####.####";P(I),T(I),V(I),D(I),DS(I),E(I),E(I)*.737
1770 NEXT I
1780 C1 = 0:CLS : PRINT "Seleccione la opcion a graficar de acuerdo alCodigo"
1790 PRINT " "
1800 PRINT " P [kN]          = 1"
1810 PRINT " "
1820 PRINT " T [ms]          = 2"
1830 PRINT " "
1840 PRINT " v [m/s]         = 3"
1850 PRINT " "
1860 PRINT " Dt [mm]        = 4"

```



```

1870 PRINT " "
1880 PRINT " V [mm]      = 5"
1890 PRINT " "
1900 PRINT " E [J]       = 6"
1910 PRINT " "
1920 INPUT "Variable eje x "; X
1930 PRINT ""
1940 INPUT "Variable eje y"; Y
1950 PRINT ""
1960 INPUT "Maximo valor eje x"; XMAX
1970 PRINT ""
1980 INPUT "Maximo y minimo valor eje y"; YMAX,YMIN
1990 PRINT ""
2000 INPUT "Unidad eje x";U$
2010 PRINT ""
2020 INPUT "Unidad eje y";V$
2030 PRINT ""
2040 PRINT "Desea graficar otra variable en el mismo grafico?(S/N)"
2050 B4$ = INPUT$(1)
2060 IF B4$ = "n" THEN 2130
2070 PRINT ""
2080 INPUT "Variable nro.:";Y2
2090 PRINT ""
2100 INPUT "Maximo y minimo valor eje y";YMAX2,YMIN2
2110 PRINT ""
2120 INPUT "Nombre eje y";V2$
2130 CLS: SCREEN 2 :KEY OFF
2140 FOR I = 1 TO N
2150 IF X=2 THEN X(I) = T(I)
2160 IF X=4 THEN X(I) = D(I)
2170 IF X=5 THEN X(I) = DS(I)
2180 IF Y=1 THEN Y(I) = P(I)
2190 IF Y=4 THEN Y(I) = D(I)
2200 IF Y=6 THEN Y(I) = E(I)
2210 IF Y=3 THEN Y(I) = V(I)
2220 IF Y=5 THEN Y(I) = DS(I)
2230 IF Y = 3 THEN YA(0) = 179 - (V(0) - YMIN)*160/(YMAX - YMIN)
2240 IF Y = 0 THEN YA(0) = YA(0) ELSE YA(0) = 179
2250 IF BA1 = 1 THEN YA(0) = 171
2260 IF (BA1 = 1) AND (Y = 3) THEN YA(0) = 171 - (V(0) - YMIN)*160/(YMAX - YMI
2270 XA(I) = X(I)*480 / XMAX + 83
2280 IF BA1 = 0 THEN Y0 = 179 ELSE Y0 = 171 ' no grafica segunda variable
2290 YA(I) = Y0 - (Y(I) - YMIN)*160/(YMAX - YMIN)
2300 LINE (XA(I - 1),YA(I - 1))-(XA(I),YA(I))
2310 NEXT I
2320 IF BA1 = 1 THEN 2720 'Grafico segunda variable
2330 IF F = 0 GOTO 2370 ' Viene de cuadrados minimos
2340 FOR I = 1 TO (Z - 1)
2350 LINE (XA(N1-1 + I),YR(I))-(XA(N1 + I),YR(1 + I))
2360 NEXT I:F = 0
2370 IF H$ = "s" GOTO 2380 ELSE GOTO 2420 'indica representacion de py y pmx
2380 CIRCLE (XA(IMX),YA(IMX)),5
2390 CIRCLE (XA(IY),YA(IY)),4
2400 LOCATE 4,42:PRINT USING " Carga de fluencia:  ### kN";PY
2410 LOCATE 5,42:PRINT USING " Carga maxima:      ### kN";PMX
2420 IF C1 = 0 GOTO 2520 'viene de ajuste
2430 IF Y = 1 THEN 2440 ELSE 2520
2440 IF X = 4 THEN 2450 ELSE 2480
2450 CT = -XMAX/(B*3*(YMAX - YMIN))
2460 LOCATE 4,42:PRINT USING "Ct =          ###^^^^ [mm/kg] ";CT
2470 LOCATE 6,42:PRINT USING "a/w =  ###"; AOW
2480 IF X = 5 THEN 2490 ELSE 2520
2490 CS = -XMAX/(B*3*(YMAX - YMIN))
2500 LOCATE 4,42: PRINT USING " Cs =          ###^^^^ [mm/kg] ";CS

```

```

2510 LOCATE 6,42:PRINT USING "a/w = #.###"; AOW
2520 LOCATE 5,2: PRINT USING "\      \"; V$
2530 LOCATE 25,70: PRINT USING "\      \"; U$
2540 FOR I = 2 TO 22 STEP 4
2550 LOCATE I,10 : PRINT " -"
2560 YMA = YMAX + (YMAX - YMIN)*(2 - I)/20
2570 LOCATE I,4: PRINT USING "####.##";YMA
2580 NEXT I
2590 FOR J = 16 TO 70 STEP 6
2600 LOCATE 22,J: PRINT " |"
2610 XMA = ((J - 10)/60)* XMAX
2620 LOCATE 23,10: PRINT 0
2630 LOCATE 23,(J - 1): PRINT USING "##.##"; XMA
2640 NEXT J
2650 LINE (83,8) - (580,171), , B
2660 LINE (84,8) - (84,171)
2670 IF BA1 = 1 GOTO 2780 'grafic. segunda variable
2680 IF B4$ = "n" THEN 2780 'grafic segunda variable
2690 IF B0$ = "n" THEN 2790
2700 Y = Y2:YMAX = YMAX2:YMIN = YMIN2:V$ = V2$:BA1 = 1 'grafic.seg. variable
2710 GOTO 2140
2720 LOCATE 4,74: PRINT USING "\      \";V$
2730 FOR I = 2 TO 22 STEP 4
2740 LOCATE I,72:PRINT " -"
2750 YMA = YMAX + (YMAX - YMIN)*(2 - I)/20
2760 LOCATE I,75:PRINT USING "####.##";YMA
2770 NEXT I :BA1 = 0'libera var. bal
2780 LINE (83,8)-(580,171), , B
2790 IF ABA3 = 0 GOTO 2810 'linea 1800 fracdin grafico J -da
2800 CHAIN "a:fracdin",1890,ALL
2810 IF ABA4 = 0 GOTO 2830 'linea 1960 fracdin grafico Pn-Vpl/w
2820 CHAIN "a:fracdin",1980,ALL
2830 IF BA3 = 1 GOTO 2970 ' linea 1 impact:indica que no interviene frac
2840 IF H$ = "n" GOTO 2890 'indica no grafico Py y Pmx
2850 INPUT "Vuelve a Fracdin";H1
2860 IF H1 = 0 GOTO 3090
2870 CHAIN "a:fracdin",750,ALL
2880 IF ABA = 0 GOTO 2940 'linea 930 fracdin. para volver linea 940
2890 IF ABA2 = 1 GOTO 2940 ELSE 2900 'linea 1530 fracdin
2900 IF BA2 = 1 GOTO 2970 'linea 670 impact
2910 INPUT "Vuelve a Fracdin";ABA1
2920 IF ABA1 = 0 GOTO 2970
2930 CHAIN "a:fracdin",940,ALL
2940 INPUT "Vuelve a Fracdin";ABA3
2950 IF ABA3 = 0 GOTO 2970
2960 CHAIN "a:fracdin",1550,ALL
2970 PRINT "Aplica filtrado digital ? (S/N)"
2980 B5$ = INPUT$(1): IF B5$ = "s" THEN 3140
2990 IF B5$ = "n" THEN 3000 ELSE 2970
3000 PRINT "Graba los valores de P y T ? (S/N)"
3010 B6$ = INPUT$(1): IF B6$ = "s" THEN 1090
3020 IF B6$ = "n" THEN 3030 ELSE 3000
3030 PRINT "Desea realizar algun ajuste por minimos cuadrados ? (S/N) "
3040 B7$ = INPUT$(1): IF B7$ = "s" THEN 3100
3050 IF B7$ = "n" THEN 3060 ELSE 3030
3060 PRINT "Desea realizar otro grafico ? (S/N) "
3070 B8$ = INPUT$(1): IF B8$ = "s" THEN 1780
3080 IF B8$ = "n" THEN 3090 ELSE 3060
3090 END
3100 F = 1:INPUT "Punto inicial, punto final del intervalo";N1,N2
3110 Z = N2 - N1 + 1
3120 CHAIN "a:ajuste",100,ALL
3130 GOTO 3090
3140 CLS: INPUT "Valor de m"; EME

```

```

3150 INPUT "Hasta punto numero";U
3160 FOR I = 1 TO U
3170 FOR J = 1 TO (EME - 1)
3180 P(I) = P(I) + P(I + J )
3190 IF J = (EME - 1) THEN GOTO 3200 ELSE GOTO 3210
3200 P(I) = P(I)/EME
3210 NEXT J
3220 NEXT I
3230 GOTO 2130
5000 '          SUBROUTINA SELECCION DE OPCIONES
5010 '
5020 SCREEN 0:CLS:FOR I = 1 TO SEL
5030 READ L$(I):NEXT I
5040 COLOR 0,7:LOCATE 6,30,0
5050 PRINT L$(1)
5060 COLOR 7,0:LOCATE 6,29:PRINT CHR$(26)
5070 FOR I = 2 TO SEL
5080 LOCATE 2*I + 4,30:PRINT L$(I):NEXT I
5090 LOCATE 22,1:PRINT "Seleccione la opcion y pulse Enter"
5100 I = 1:SB$ = L$(1)
5110 ON KEY (14) GOSUB 5220
5120 KEY (14) ON
5130 KEY 15,CHR$(&H0) + CHR$(28)
5140 ON KEY (15) GOSUB 5380
5150 IF K15 = 0 GOTO 5180
5160 KEY (14) OFF:KEY (15) OFF:KEY (11) OFF
5170 COLOR 7,0:RETURN
5180 KEY (15) ON
5190 ON KEY (11) GOSUB 5300
5200 KEY (11) ON
5210 GOTO 5110
5220 COLOR 7,0:LOCATE 2*I + 4,30
5230 PRINT L$(I)
5240 LOCATE 2*I + 4,29:PRINT " "
5250 IF I + 1 > SEL THEN I = 0
5260 COLOR 0,7: LOCATE 2*I + 6,30
5270 PRINT L$(I + 1):SB$ = L$(I + 1) :I = I + 1
5280 COLOR 7,0:LOCATE 2*I + 4,29:PRINT CHR$(26)
5290 GOTO 5110
5300 COLOR 7,0:LOCATE 2*I + 4,30
5310 PRINT L$(I)
5320 LOCATE 2*I + 4,29:PRINT " "
5330 IF I - 1 < 1 THEN I = SEL + 1
5340 COLOR 0,7:LOCATE 2*I + 2,30
5350 PRINT L$(I - 1):SB$ = L$(I - 1):I = I - 1
5360 COLOR 7,0:LOCATE 2*I + 4,29:PRINT CHR$(26)
5370 GOTO 5110
5380 K15 = 1:RETURN

```

C:\WINDOWS>cd..

C:\>a:

A:\>dir *.bas

El volumen de la unidad A no tiene etiqueta
Directorio de A:\

FRACDINC	BAS	19,120	02/01/80	3:10a
FRACDIN	BAS	15,053	02/01/80	1:27a
PNVPL	BAS	279	02/01/80	1:23a
IMPACT	BAS	11,455	02/01/80	12:44a
IMPAC	BAS	13,967	11/04/91	2:07p

Anexo II

APENDICE B

```
10 CLS:SCREEN 2:KEY OFF:PRINT "
20 PRINT "
30 PRINT "
40 PRINT "
50 PRINT "
60 PRINT "
70 PRINT "
80 PRINT "
90 PRINT " Este Programa Permite:
100 PRINT "
110 PRINT " 1.- Obtener Carga de Fluencia y Carga Maxima
120 PRINT " 2.- Obtener el Diagrama P(i) vs. Vpl(i)
130 PRINT " 3.- Obtener el Diagrama Log Pn(i) vs.
Log Vpl(i)/W.
140 PRINT " 4.- Obtener los coeficientes de la curva
normalizada.
150 PRINT " 5.- Obtener la Curva J(i) vs. dA(i).
160 PRINT " 6.- Obtener los valores de Jid y Tmat para
170 PRINT " el caso dinamico
180 PRINT "
190 PRINT "
200 PRINT " Autor: Ing. Gabriel E. Carcagno
210 PRINT "
220 LINE (1,8)-(580,180), ,B
230 LINE (4,10)-(576,178), ,B
240 LOCATE 24,1:PRINT "Pulse cualquier tecla para continuar"
250 ABA5$ = INKEY$ : IF ABA5$ = "" THEN 250
260 CLS:PRINT "
270 PRINT " "
280 PRINT " Este programa interactua en forma continua con el programa
290 PRINT " de graficacion IMPACTO , por lo cual este debe estar grabado conjun-
300 PRINT " tamente con este programa en el diskette colocado en el Drive A."
310 PRINT " "
320 PRINT " "
330 PRINT " Para realizar impresion de graficos, debera cargarse pre-
340 PRINT " viamente desde el sistema el comando GRAPHICS, y utilizar la tecla "
350 PRINT " Print Screen en el momento en que se desea obtenerlos."
360 LINE (1,8)-(580,100), ,B
370 LINE (3,9)-(578,99), ,B
380 LOCATE 23,1:PRINT "Pulse cualquier tecla para continuar"
390 ABA6$ = INKEY$ : IF ABA6$ = "" THEN 390
400 CLS: INPUT "Fecha del ensayo (dd,mm,aa)";DD,MM,AA
410 CLS: INPUT "Numero de Probera";B,PF
```

```

420 CLS:INPUT "Material";M$
430 INPUT "Espacio entre apoyos (s) en mm";ESE
440 INPUT "Espesor de la probeta (B) en mm";BE
450 INPUT "Ancho de la probeta (W) en mm.";W
460 INPUT "Longitud de fisura inicial (ao) en mm.";AO
470 CLS:PRINT "Inserte el diskette con los datos en el drive A"
480 PRINT "y pulse cualquier tecla para continuar"
490 ABA7$ = INKEY$: IF ABA7$ = "" THEN 490
500 A$ = "pr" + STR$(PE)
510 W$ = "c" + STR$(PE)
520 X$ = "dp" + STR$(PE)
530 N = 1500
540 DIM P(N),T(N),V(N),D(N),DS(N),E(N),SX(N),SY(N),K(N),Q(N),CS(N),XA(N),YA(N)
550 DIM BPL(N),PPL(N),X(N),Y(N),ENE(N),ENE(N),PN(N),PPLN(N),YR(N),DS2(N)
560 DIM A(N),DA(N),JEL(N),JPL(N),J(N)
570 OPEN W$ FOR INPUT AS #2
580 INPUT #2,N,M,V(O),CM,T(O),P(O),D(O),DS(O),E(O),XA(O),AOW,EDIS,ERES
590 CLOSE
600 OPEN A$ FOR INPUT AS #1
610 FOR I = 1 TO N
620 INPUT #1,P(I),T(I)
630 NEXT I
640 CLOSE
650 OPEN X$ FOR INPUT AS #3
660 FOR I = 1 TO N
670 INPUT #3,DS(I),E(I)
680 NEXT I
690 CLOSE
700 I = 0
710 I = I + 1
720 IF T(I) > (T(O) + .08) THEN K = I ELSE GOTO 710
730 J = 0
740 J = J + 1
750 N1 = K: N2 = K + 3
760 ' Metodo de minimos cuadrados
770 Z = N2 - N1 + 1
780 SX(1) = DS(N1)
790 SY(1) = P(N1)
800 FOR I = 2 TO Z
810 SX(I) = SX(I - 1) + DS(N1 - 1 + I)
820 SY(I) = SY(I - 1) + P(N1 - 1 + I) : NEXT I
830 XM = SX(Z)/Z
840 YM = SY(Z)/Z
850 K(1) = (DS(N1) - XM)*(P(N1) - YM)
860 Q(1) = (DS(N1) - XM)^2
870 FOR I = 2 TO Z
880 K(I) = K(I - 1) + (DS(N1 - 1 + I) - XM)*(P(N1 - 1 + I) - YM)
890 Q(I) = Q(I - 1) + (DS(N1 - 1 + I) - XM)^2 : NEXT I
900 KT = K(Z)
910 QT = Q(Z)
920 CS(J) = KT/QT
930 IF K2 = 0 GOTO 940 ELSE GOTO 1020
940 CS(O) = CS(1)
950 IF (CS(J) / CS(J - 1)) < .7 GOTO 990 ELSE GOTO 960
960 J = J + 1
970 N1 = N2: N2 = N2 + 3
980 GOTO 770
990 J = J - 1: K2 = 1
1000 N1 = N1 - 3: N2 = N1 + K2
1010 GOTO 770
1020 IF (CS(J) / CS(J - 1)) < .7 GOTO 1030 ELSE GOTO 1040
1030 PY = P(N1): IY = N1: GOTO 1060
1040 N1 = N2: N2 = N2 + K2: J = J + 1
1050 GOTO 770

```

```

1060 CLS:PRINT USING "Carga de fluencia    #.## kN";PY
1070 PMX = 0
1080 FOR I = 1 TO N
1090 IF P(I) > PMX GOTO 1100 ELSE GOTO 1110
1100 PMX = P(I): IMX = I
1110 NEXT I
1120 PRINT USING "Carga maxima          #.## kN";PMX
1130 PRINT "Desea indicar Py y Pmax en la grafica (S/N)"
1140 H$= INPUT$(1): IF H$ = "n" THEN 1170
1150 IF H$ = "s" THEN 1160 ELSE 1130
1160 GOTO 3710
1170 CLS: EEF = (P(IY)*1000/(9.810001*DS(IY)*BE))*(32.35 - 159.24*(A0/W) + 479.05*(A0/W)^2)
1180 PRINT USING "Modulo de Elasticidad Efectivo    Eef = ##### kg/mm2";EEF
1190 KEY OFF:LOCATE 22,1 : PRINT "Pulse cualquier tecla para continuar"
1200 ABA4$ = INKEY$ : IF ABA4$ = "" THEN 1200
1210 CLS:PRINT "Espere"
1220 FOR J = IY TO N
1230 DPL(J - IY)=DS(J) - P(J)*1000*(32.35 - 159.24*(A0/W) + 479.05*(A0/W)^2)/(EEF*BE*9.810001)
1240 PPL(J - IY) = P(J)
1250 NEXT J
1260 FOR I = 1 TO (N - IY)
1270 X(I) = DPL(I)
1280 Y(I) = PPL(I)
1290 NEXT I
1300 Y(0) = PY:YA(0) = 179 - PY * 160/9: V$ ="P [kN]":U$ ="VPL [mm]"
1310 XMAX = IS: YMAX = 9: YMIN = 0: H$ = "n" :Y = 0
1320 N = N - IY:ABA = 1:B4$ = "n"
1330 GOTO 4060
1340 CLS:PRINT "Calculando log Pn vs log Vpl/w. Espere"
1350 XMAX = 2: YMAX =-.5: YMIN =-3: XMIN = -8:N2 = 0
1360 VE = 0 - A0
1370 FOR I = 1 TO N - IY - 1
1380 PN(I) = PPL(I) * W / (BE * VE^2)
1390 X(I) = LOG (DPL(I)/W)
1400 Y(I) = LOG (PN(I))
1410 XA(I) = (X(I) - XMIN)*480/(XMAX - XMIN) + 83
1420 YA(I) = 179 - (Y(I) - YMIN)*160/(YMAX - YMIN)
1430 NEXT I:CLS
1440 FOR I = 1 TO N - IY - 1
1450 PSET (XA(I),YA(I))
1460 NEXT I
1470 IF N2 = 0 GOTO 1510
1480 FOR I = 1 TO (Z - 1)
1490 LINE (XA(N1 - 1 + I),YR(I))-(XA(N1 + I),YR(I + 1))
1500 NEXT I
1510 LOCATE 5,2: PRINT "Log Pn"
1520 LOCATE 25,70: PRINT "Log Vpl/W"
1530 FOR I = 2 TO 22 STEP 4
1540 LOCATE I,10: PRINT " -"
1550 YMA = YMAX + (YMAX - YMIN)*(2 - I)/20
1560 LOCATE I,4: PRINT USING "##.##";YMA
1570 NEXT I
1580 FOR J = 16 TO 70 STEP 6
1590 LOCATE 22,J: PRINT " I"
1600 XMG = ((J - 10)/60)*(XMAX - XMIN) + XMIN
1610 LOCATE 23,10: PRINT XMIN
1620 LOCATE 23,(J - 1):PRINT USING "##.##";XMA
1630 NEXT J
1640 LINE (80,8)-(580,171), ,B
1650 LINE (84,8)-(84,171)
1660 IF ILIN = 0 GOTO 1670 ELSE GOTO 1780
1670 I = 0
1680 I = I + 1
1690 IF 2*I + IY < .5* E(IMX) GOTO 1680 ELSE GOTO 1700
1700 ILIN = 1

```

```

1710 J = 0
1720 J = J + 1
1730 IF E(J + 1Y) < (6 * E(IY)) GOTO 1720 ELSE GOTO 1740
1740 ILIMO = J
1750 N1 = ILIMO: N2 = ILIM
1760 Z = N2 - N1 + 1
1770 GOTO 4900
1780 ENE = - (XMAX - XMIN)/(3 * B * (YMAX - YMIN))
1790 BETA = EXP(-ENE * ((179 - YM - B*(-XMIN*480/(XMAX-XMIN) + B3 - XM))*(YMAX
-YMIN)/160 + YMIN))
1800 LOCATE 4,42: PRINT USING " Exp. N :      ###.###";ENE
1810 LOCATE 5,42: PRINT USING " Coef. B :      #.###^####";BETA
1820 LOCATE 25,1:PRINT "Desea visualizar grafico real y ajuste? (S/N)"
1830 ABB# = INPUT$(1):IF ABB# = "n" GOTO 2000
1840 IF ABB# = "s" GOTO 1850 ELSE GOTO 1820
1850 CLS:FOR I = 1 TO N - 1Y
1860 PPLN(I) = (BE*(VE^2)/W)* (DPL(I)/(W * BETA))^(1/ENE)
1870 Y(I) = PPLN(I)
1880 X(I) = DPL(I)
1890 XA(I) = X(I) * 480/10 + B3
1900 YA(I) = 179 - Y(I)* 160/9
1910 PSET (XA(I),YA(I))
1920 NEXT I
1930 FOR I = 1 TO N - 1Y
1940 Y(I) = PPL(I)
1950 YA(I) = 179 - Y(I)*160/9
1960 LINE (XA(I - 1),YA(I - 1))-(XA(I),YA(I))
1970 NEXT I
1980 XMAX = 10: YMAX = 9: YMIN = 0:R# = "n":ABA2 = 1:B4# = "n"
1990 GOTO 4450
2000 CLS:PRINT "Calculando da"
2010 A0 = W - VE :A = A0:A(IY) = A0
2020 LOCATE 25,1:PRINT " i", " P(i)", " J(i)", " a(i)":LOCATE 1,1
2030 FOR I = 1Y + 1 TO N + 1Y: P = 0
2040 A = A - .001:GOTO 2080
2050 A = A0 - .001 + .001*P:GOTO 2090
2060 IF P < 150 GOTO 2080 ELSE GOTO 2070
2070 A(I) = A(I-1):GOTO 2120
2080 IF I > 1.2*IMX THEN A = A + .001 ELSE GOTO 2050
2090 DS2(I) = P(I)*1000 * (32.35 - 159.24*(A/W) + 479.05*(A/W)^2)/(9.810001*EEF*
BE) + W*BETA*(P(I)*W/(BE*(W - A)^2))^ENE :P = P + 1
2100 IF ABS(DS2(I) - DS(I)) > .08 GOTO 2060 ELSE GOTO 2110
2110 A(I) = A
2120 DA(I) = A(I) - A0
2130 JEL(I) = (((P(I)*1000*4*W/(BE*9.810001*(W)^(3/2)))*(2.9*(A(I)/W)^(1/2) - 4.6*
*(A(I)/W)^(3/2)+21.8*(A(I)/W)^(5/2) - 37.6*(A(I)/W)^(7/2) + 38.7*(A(I)/W)^(9/2))
)^2)/EEF
2140 DPL(I - 1Y) = DS(I) - P(I)*1000*(32.35 - 159.24*(A(I)/W) + 479.05*(A(I)/W)^
2)/(EEF*9.810001*BE)
2150 JPL(IY - 1) = 0
2160 JPL(I) = (2/(BE*(W - A(I))))*P(I)*((1000/9.810001)*(DPL(I - 1Y) - DPL(I - 1Y
-1)) + JPL(I - 1))
2170 J(I) = (JEL(I) + JPL(I))*9.810001
2180 PRINT I,P(I),J(I),DA(I)
2190 NEXT I
2200 FOR I = 1 TO 1Y
2210 JEL(I) = (((P(I)*1000*4*W/(BE*9.810001*(W)^(3/2)))*(2.9*(A0/W)^(1/2) - 4.6*(
A0/W)^(3/2)+21.8*(A0/W)^(5/2) - 37.6*(A0/W)^(7/2) + 38.7*(A0/W)^(9/2))^(2)/
EEF
2220 DA(I) = 0
2230 NEXT I
2240 BEEP:CLS
2250 PRINT "E1111: escala curva (R ? (S))"
2260 ESC# = INPUT$(1):IF ESC# = "s" THEN 2280
2270 IF ESC# = "n" THEN 2300 ELSE GOTO 2150
2280 INPUT "Entre dmax (mm) , Imax (F/cm2)", XMAX, YMAX
2290 GOTO 2370
2300 BEEP:IF DA(N) = 1 THEN XMAX = 1
2310 IF (DA(N) > 1) AND (DA(N) < 2) THEN XMAX = 2
2320 IF (DA(N) > 2) AND (DA(N) < 5) THEN XMAX = 2.5

```



```

2330 IF J(N) < 200 THEN YMAX = 200
2340 IF (J(N) > 200) AND (J(N) < 500) THEN YMAX = 500
2350 IF (J(N) > 500) AND (J(N) < 1500) THEN YMAX = 1500
2360 IF (J(N) > 1500) AND (J(N) < 2500) THEN YMAX = 2500
2370 YMIN = 0 : V$ = "J [KJ/m2]";U$ = "dA [mm]";ABA3 = 1;B4$ = "n"
2380 CLS : FOR I = 1 TO N
2390 X(I) = DA(I)
2400 Y(I) = J(I)
2410 XA(I) = X(I)*480/YMAX + 83
2420 YA(I) = 179 - Y(I) * 160/YMAX
2430 PSET (XA(I),YA(I))
2440 NEXT I
2450 GOTO 4450
2460 ABA3 = 0:PRINT "Desea graficar Pn vs. Vp1/w ?(S/N)"
2470 ABAB$ = INPUT$(1): IF ABAB$ = "s" THEN 2490
2480 IF ABAB$ = "n" THEN 2560 ELSE 2460
2490 CLS
2500 FOR I = 1 TO N
2510 PN(I) = PPL(I)*W/(BE*(W - A(I + IY)))^2)
2520 PSET (83 + (DPL(I)/W)*480,179 - PN(I)*160/.5)
2530 NEXT I
2540 XMAX = 1:YMAX = .5:YMIN = 0;V$ = "Pn,MPa";U$ = "VPL/W";ABA4 = 1: B4$ = "n"
2550 GOTO 4450
2560 PRINT "Graba los valores de Pn y Vp1/w ?(S/N)"
2570 ABA9$ = INPUT$(1): IF ABA9$ = "s" THEN 2590
2580 IF ABA9$ = "n" THEN 2630 ELSE 2560
2590 CLS:PRINT "Inserte el diskette en el drive A"
2600 PRINT "y pulse cualquier tecla para continuar"
2610 ABB1$ = INKEY$:IF ABB1$ = "" THEN 2610
2620 CHAIN "a:normal",20,ALL
2630 'Calculo de JId
2640 I = 0
2650 I = I + 1
2660 IF DA(I) > .003 GOTO 2670 ELSE GOTO 2650
2670 II = I: JID = J(II)' fin calculo JId
2680 SY = (2.85*W/(BE*(W - A0)^2))*1000*PY
2690 SMX = (2.85*W/(BE*(W - A(IMX))^2))*1000*PMX
2700 SO = (SY + SMX)/2
2710 CVJ = 25*JID/SO
2720 IF BE < CVJ THEN 2760
2730 IF W < CVJ THEN 2760
2740 IF A0 < CVJ THEN 2760
2750 IF (W - A0) < CVJ THEN 2760 ELSE GOTO 2770
2760 CVJ$ = "No verifica criterio":GOTO 2780
2770 CVJ$ = "Verifica criterio"
2780 CLS:PRINT "Desea agregar alguna observación en la planilla de resultados?(S/N)"
2790 ABB2$ = INPUT$(1):IF ABB2$ = "s" THEN 2810
2800 IF ABB2$ = "n" THEN 2820 ELSE GOTO 2780
2810 INPUT "Introduzca el texto (no mas de tres lineas):",Y$
2820 CLS:KEY OFF:PRINT "                                RESULTADOS FINALES"
2830 PRINT ""
2840 PRINT "                                ENSAYO CHARPY V-NOTCH INSTRUMENTADO"
2850 PRINT ""
2860 PRINT "PENDULO: Marca TINIUS OLSEN capacidad 360 J"
2870 PRINT ""
2880 PRINT "INSTRUMENTACION: Equipo DYNATUR MODEL 500"
2890 PRINT ""
2900 PRINT "-----"
2910 PRINT USING "MATERIAL: \          \          Probeta N : ##          Fecha e
nsayo:  ##/##/## :M$,PE,DE,MM,AA
2920 PRINT "-----"
2930 PRINT "DIMENSIONES:                                DATOS ENSAYO:"
2940 PRINT ""
2950 PRINT USING "Espacio entre apoyos:          ## mm          Velocidad impacto:
#.## m/s";ESE,V(C)
2960 PRINT ""
2970 PRINT USING "Espesor (B):          ## mm          Energia Disponible
: ##.# # 3";BE,EDIS

```



```

2980 PRINT ""
2990 PRINT USING "Ancho (W):          ## mm          Energia remanente:
      ##.# J";W,ERES
3000 PRINT ""
3010 PRINT USING "Fisura inicial (A0):    ##.## mm";A0
3020 PRINT ""
3030 PRINT "*****
*****"
3040 PRINT "Pulse cualquier tecla para continuar"
3050 ABB3$ = INKEY$:IF ABB3$ = "" THEN 3050
3060 CLS:PRINT USING "Carga de Fluencia (Py):    ##.# kN          Tension de Flu
encia (xy):  ##.# MPa";PY,SY
3070 PRINT ""
3080 PRINT USING "Carga Maxima (Pmx):      ##.# kN          Tension Maxima (cm
x):  ###.# MPa";PMX,SMX
3090 PRINT ""
3100 PRINT USING "Tension de Flujo (σ0):    ##.# MPa";S0
3110 PRINT ""
3120 PRINT USING "Energia Abs. a Py:      ##.## J          Energia Abs. a Pmx
:  ##.## J";E(IY),E(IMX)
3130 PRINT ""
3140 PRINT USING "Energia de iniciacion:    ##.## J";E(II)
3150 PRINT ""
3160 PRINT USING "Exponente n:          #.###          Coeficiente β:
      #.###";ENE,BETA
3170 PRINT "-----"
3180 PRINT USING "          FRACTOTENACIDAD DINAMICA          JId = ##.# KJ/m
2";JID
3190 PRINT "-----"
3200 PRINT USING "Criterio validez JId :      B,W,A0,(w - a) > ##.#";CVJ
3210 PRINT ""
3220 PRINT USING "          \          \";CVJ$
3230 PRINT ""
3240 PRINT USING "OBSERVACIONES: \
      \";Y$
3250 PRINT ""
3260 PRINT "Desea imprimir estos resultados?(S/N)"
3270 ABB4$ = INPUT$(1):IF ABB4$ = "s" THEN 3290
3280 IF ABB4$ = "n" THEN 3700 ELSE 3260
3290 LPRINT "          RESULTADOS FINALES"
3300 LPRINT ""
3310 LPRINT "          ENSAYO CHARPY V-NOTCH INSTRUMENTADO"
3320 LPRINT ""
3330 LPRINT "PENDULO: Marca TINIUS OLSEN capacidad 360 J"
3340 LPRINT ""
3350 LPRINT "INSTRUMENTACION: Equipo DYNATUP MODEL 500"
3360 LPRINT ""
3370 LPRINT "-----"
3380 LPRINT USING "MATERIAL: \          \          Probeta N : ##          Fecha
ensayo:  ##/##/##";M$,PE,DD,MM,AA
3390 LPRINT "-----"
3400 LPRINT "DIMENSIONES:          DATOS ENSAYO:"
3410 LPRINT ""
3420 LPRINT USING "Espacio entre apoyos:    ## mm          Velocidad i
mpacto:  #.## m/s";ESE,V(0)
3430 LPRINT ""
3440 LPRINT USING "Espesor (B):          ## mm          Energia Dis
ponible:  ##.# J";BE,EDIS
3450 LPRINT ""
3460 LPRINT USING "Ancho (W):          ## mm          Energia rem
anente:  ##.# J";W,ERES
3470 LPRINT ""
3480 LPRINT USING "Fisura inicial (A0):    ##.## mm";A0
3490 LPRINT ""
3500 LPRINT "*****
*****"

```

```

3510 LPRINT USING "Carga de Fluencia (Py):      ### kN          Tension de Fluenc
ia (σy): ### MPa";PY,SY
3520 LPRINT ""
3530 LPRINT USING "Carga Maxima (Pmx):         ### kN          Tension Maxima (σ
mx):      ### MPa";PMX,SMX
3540 LPRINT ""
3550 LPRINT USING "Tension de Flujo (σo):      ### MPa";SO
3560 LPRINT ""
3570 LPRINT USING "Energia Abs. a Py:          ###.## J          Energia Abs. a Pm
x:          ##.## J";E(IY),E(IMX)
3580 LPRINT ""
3590 LPRINT USING "Energia de iniciacion:      ##.## J";E(II)
3600 LPRINT ""
3610 LPRINT USING "Exponente n:              ###          Coeficiente β:
      ###";ENE,BETA
3620 LPRINT "-----"
3630 LPRINT USING "          FRACOTENACIDAD DINAMICA          JId = ###.# KJ/
m²";JID
3640 LPRINT "-----"
3650 LPRINT USING "Criterio validez JId :      B,W,Ao,(W - a) > ##.##";CVJ
3660 LPRINT ""
3670 LPRINT USING "          \          \";CVJ$
3680 LPRINT ""
3690 LPRINT USING "OBSERVACIONES: \
          \";Y$
3700 CLS:LOCATE 12,25:PRINT "          FIN DEL PROGRAMA":LOCATE 22,1

```