

# ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE LA PRUEBA DE IMPACTO TIPO CHARPY MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

## RESUMEN

En la actualidad en la industria de nuestro país son poco utilizadas las herramientas computacionales en el diseño mecánico, una de las razones para ello es la desconfianza que produce el implementar nuevas tecnologías basadas en cálculos meramente computacionales. Mediante esta experiencia académica se pretende mostrar hasta que punto es viable el utilizar este tipo de análisis, comparando los resultados teóricos y experimentales obtenidos de una prueba de impacto en la maquina de impacto o péndulo Charpy con los resultados obtenidos en la simulación mecánica del evento mediante el software ALGOR.

**PALABRAS CLAVES:** Maquina de impacto, simulación de eventos mecánicos, elementos Kinematicos, velocidad y tiempo del evento, péndulo Charpy.

## ABSTRACT

*In the actuality a the level of industry in the country, is less apply the computer's tools in the mechanical design, one of the reason is the untrust that give the implementation of new technologies based only computer's calculation. With this academic experience it is pretended shown until which point is possible to use this type of analysis, comparing the theoretical results and the experimental result obtained from an impact probe in the impact machine or pendulum Charpy with the results obtained in the mechanical simulation of the event throughout the Algor software.*

**KEYWORDS:** Machine of impact, Mechanical event simulation, Kinematics elements, velocity and time of event, Charpy pendulum

## HÉCTOR E. JARAMILLO S.

Ingeniero Mecánico  
Espec. En estructuras, U.V.  
Master(c) en Ingeniería Civil Prof.  
Corporación Universitaria  
Autónoma de Occidente  
[hejaramillo@cuao.edu.co](mailto:hejaramillo@cuao.edu.co)  
Grupo de Investigación Ciencia e  
Ingeniería de Materiales

## ALEJANDRO RUIZ CHACÓN

Estudiante ultimo semestre  
Ingeniería Mecánica  
Corporación Universitaria  
Autónoma de Occidente  
[cruiz40@hotmail.com](mailto:cruiz40@hotmail.com)

## Nomenclatura

$E_p$  energía potencial.  
 $E_c$  energía cinética.  
 $m$  Masa.  
 $g$  Gravedad.  
 $h$  Altura.  
 $v$  Velocidad.  
 $r$  Radio.  
 $\theta$  Desplazamiento angular.  
 $\omega$  Velocidad angular.  
 $\alpha$  Aceleración angular.  
 $T$  Tiempo.  
 $\%Er$  Porcentaje de error.

## INTRODUCCIÓN

Al momento de determinar las condiciones de seguridad para el diseño de una estructura o de una maquina, es vital el estudio de las cargas de tipo dinámico, ya que sabemos que cuando los materiales son sometidos a cargas de este tipo su comportamiento difiere notablemente de la aplicación de cargas estáticas.

Uno de los tipos de carga dinámica que mayor daño pueden causar a un diseño es la carga de impacto, ya que esta se presenta súbitamente, causando grandes esfuerzos

debido a la transformación, la absorción y disipación de la energía involucrada en el evento. Con las maquinas para ensayos de impacto se estudia el comportamiento de un material específico a estas condiciones de carga; como se hace en los laboratorios de Mecánica de Sólidos de Ingeniería Mecánica<sup>1</sup>, mediante el ensayo de impacto (péndulo Charpy). En el ensayo realizado en el laboratorio se dejo caer el brazo pendular desde una altura determinada  $h$  (Figura 1), midiendo el ángulo total barrido por el brazo pendular y el tiempo que se invierte en el evento mediante la filmación del mismo, se pueden determinar las energías involucradas.

## 1. FORMULACION DEL PROBLEMA

En la figura 1 se aprecia el modelo a analizar. Se desea comparar los datos obtenidos (velocidad, tiempo y ángulo de barrido) en el ensayo de impacto (péndulo Charpy) que se lleva a cabo en las instalaciones de la universidad, con los de una simulación realizada en el computador, utilizando la técnica de elementos finitos.

*Fecha de Recibo: 21 abril de 2003*

*Fecha de Aceptación: 2 de junio de 2003*

<sup>1</sup> En la Corporación Universitaria Autónoma de Occidente

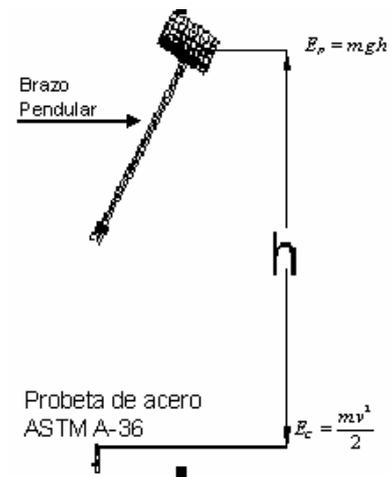


Figura 1. Vista lateral del momento inicial del evento

2. SOLUCIÓN TEÓRICA DEL PROBLEMA

2.1. Cálculo de la Velocidad del Momento del Impacto:

En la posición inicial el martillo de la maquina de impacto tienen una energía potencial  $E_p = m.g.h$  (donde h es la distancia de la probeta al centro de gravedad del martillo pendular) al caer, esta energía potencial se convierte en energía cinética  $E_c = \frac{m.v^2}{2}$ ; por la ley de la conservación de la energía, igualamos las dos expresiones y despejamos la velocidad así:

$$E_p = E_c \Rightarrow mgh = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{2gh}$$

$$v = \sqrt{2 \times 386,4 \frac{in}{s^2} \times 59,324in} \tag{1}$$

$$v = 214,11 \frac{in}{s} \quad (\text{Antes del impacto})$$

2.2. Cálculo del Tiempo que Invierte el Evento:

Asimilando el evento a uno de movimiento circular uniformemente acelerado podremos obtener el tiempo que dura el evento hasta que el brazo pendular hace contacto con la probeta de la siguiente manera:

- Calculo de la velocidad angular:

$$v = r\omega \Rightarrow \omega = \frac{v}{r} = \frac{214,11 \frac{in}{s}}{33,96in} \tag{2}$$

$$\omega = 6,3 \frac{rad}{s} = 60,16RPM \quad (\text{Antes del impacto})$$

- Calculo de la aceleración angular:

$$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha\theta \Rightarrow \alpha = \frac{\omega^2}{2\theta} \tag{3}$$

- $\theta$ , es el ángulo que barre el brazo pendular desde la posición inicial hasta el momento del impacto. (150°) en radianes:

$$150^\circ \times \frac{\pi rad}{180^\circ} = 2,62rad \tag{4}$$

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\theta} \Rightarrow \alpha = \frac{(6,30 \frac{rad}{s})^2}{2 \times 2,62rad} \tag{5}$$

$$\alpha = 7,57 \frac{rad}{s^2}$$

- Calculo del tiempo del evento:

$$T = \frac{\omega}{\alpha} = \frac{6,30 \frac{rad}{s}}{7,57 \frac{rad}{s^2}} \tag{6}$$

$$T = 0,83s \quad (\text{hasta la probeta})$$

2.3. Cálculo del Ángulo Barrido por el Brazo Pendular.

Para determinar el ángulo total barrido por el brazo pendular, es necesario determinar la energía que absorbe la probeta para restársela a la energía cinética con que llega este elemento al momento del impacto. Con este nuevo dato de energía se calculo la velocidad con que sale el brazo después del impacto y así por asimilación de movimiento circular determinar el ángulo de barrido.

2.3.1 Energía que adsorbe la probeta.

Integrando el área bajo la curva de una grafica de fuerza desplazamiento de un ensayo de tensión<sup>2</sup> para el material de la probeta, hasta la carga de ruptura se determina la energía adsorbida por la probeta.

$$E_{Ruptura} = 12190,6 \text{ lb x in.}$$

Sabemos por ley de la conservación de la energía que la energía potencial final mas la energía de ruptura es igual a la energía potencial inicial.

$$Ep_2 + E_R = Ep_1 \tag{7}$$

<sup>2</sup> Realizado en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la CUAO. Máquina universal de ensayos UTS 200.3

Con la energía potencial inicial menos la energía de ruptura, se puede determinar la altura final ( $h_2$ ).

$$\begin{aligned}
 Ep_1 &= mgh = (40,7)(386,4)(59,324) \\
 Ep_1 &= 932957,7 \text{ lb} \cdot \text{in} \\
 Ep_2 &= 932957,7 - 12190,6 \\
 Ep_2 &= 920767,1 \text{ lb} \cdot \text{in} = mgh_2 \\
 h_2 &= \frac{920767,1}{(40,7)(386,4)} \Rightarrow h_2 = 58,55 \text{ in}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Con esta altura y por semejanza de triángulos (figura 2), se determina el ángulo barrido por el brazo pendular.

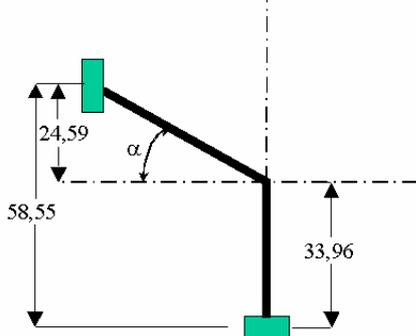


Figura 2. Esquema del recorrido del martillo

$$\begin{aligned}
 \text{Sen} \alpha &= \frac{24,59}{33,96} \\
 \alpha &= 46,39^\circ \\
 \theta &= \alpha + 150 + 90 \\
 \theta &= 286,39
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

### 3. MODELADO CAD

Los tres elementos que intervienen en la simulación fueron modelados mediante el software Solidworks<sup>3</sup>, se muestran en las figuras 3, 4 y 5.

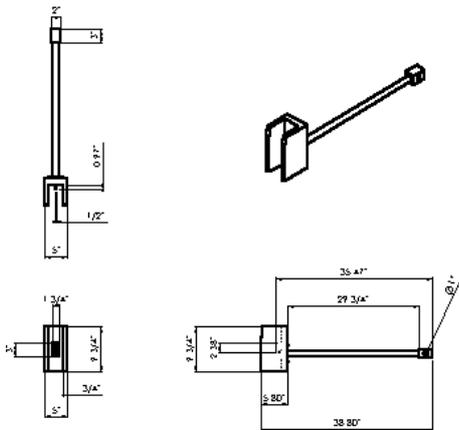


Figura 3. Planos del brazo pendular<sup>4</sup>

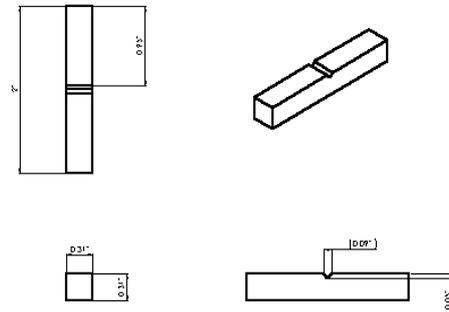


Figura 4. Planos de la probeta del material ASTM-A36<sup>5</sup>

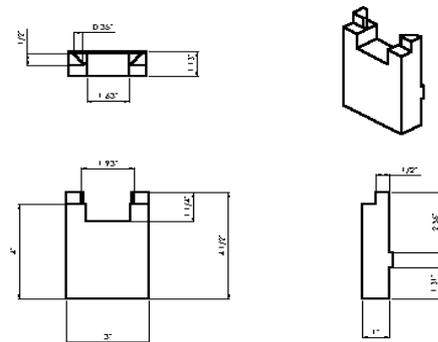


Figura 5. Planos del soporte de la probeta<sup>6</sup>

### 4. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS

El sistema está compuesto por 5 elementos, los 3 expuestos en los gráficos anteriores, más un elemento que permite el giro al cual hemos denominado EJE y un elemento específico del ALGOR llamado General Contact que permite simular el contacto que se presenta entre el brazo y la probeta. Al definirlos se tuvieron las siguientes consideraciones.

#### 4.1. Datos.

Pieza	Tipo de elemento usado	Material
Brazo pendular	3-D Kinematic	ASTM-A-441
Soporte probeta	3-D Kinematic	ASTM-A-441
Probeta	Brick	ASTM-A-36
Eje	Brick	ASTM-A-441

<sup>4</sup> Todas las medidas están dadas en pulgadas

<sup>5</sup> Ibid.

<sup>6</sup> Ibid.

<sup>3</sup> SolidWorks, education Edition, 2002 plus

Tabla 1. Tipo de elemento y materiales usados en el análisis

Contacto	General	No aplicable
	Contact	

**4.2. Consideraciones de los Elementos Utilizados.**

Los esfuerzos que se presenta en el brazo pendular y el soporte de la probeta no son requeridos en el análisis a realizar, por lo cual se definen como elementos 3-D Kinematic, ya que estos elementos solo transmiten los efectos de carga.

Para el eje se escogió un elemento tipo Beam ya que se necesitaba que este elemento se comportara como una viga de sección circular que permitiera la rotación en el plano que se necesitaba. Para la probeta que es el elemento de análisis se escogió un elemento tipo Brick ya que es un elemento elástico tridimensional, resaltando que se escogió un modelo de material del tipo Von Mises Curve with Isotropic Hardening, porque en el material se tienen deformaciones plásticas y este modelo se acerca en buena medida a las condiciones reales ya que maneja dos módulos elásticos, uno para la zona elástica y otro para la zona plástica (Figura 6). El último elemento (General Contact), es exclusivo del ALGOR y nos permite estudiar lo que sucede al colisionar dos elementos en unos puntos específicos previamente establecidos.

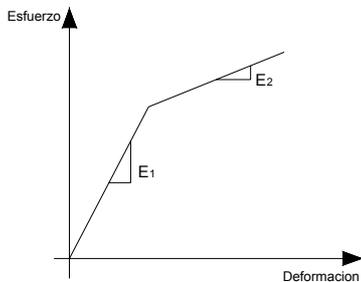


Figura 6. Diagrama esfuerzo deformación del modelo de material Von Mises Curve with Isotropic Hardening

**4.3. Resultados**

**4.3.1. Tiempo.**

En la figura 7 se puede apreciar el momento exacto cuando el martillo hace contacto con la probeta, el cual registra un tiempo de 0.82 segundos. La figura 8 muestra el instante depuse del contacto cuando la probeta se rompe por efecto del impacto.

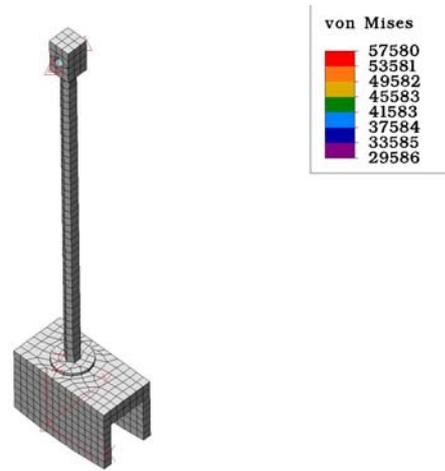


Figura 7. Momento del impacto.

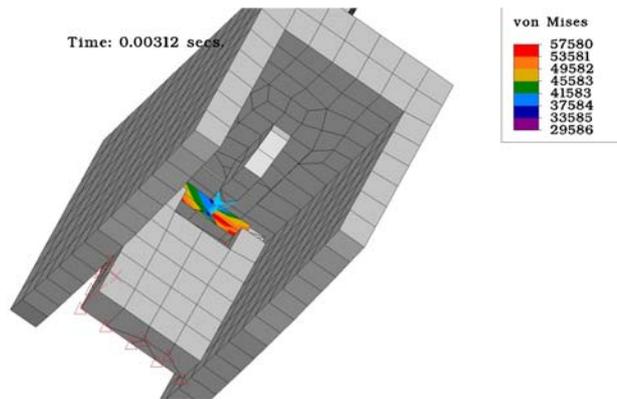


Figura 8. Acercamiento 0,00312 segundos después del impacto

**4.3.2. Velocidad**

Gracias al análisis que permite realizar el Monitor<sup>7</sup> (aplicación del Algor), se puede conocer la velocidad exacta en el tiempo de 0,82 segundos la cual es 226 in/s, justo antes del impacto.

**4.3.3. Angulo barrido.**

En la figura 9 se muestra la posición hasta donde sube el martillo después del impacto. Se mide el ángulo formado entre este elemento y una línea imaginaria que pasa por el punto de impacto y se le suma el ángulo formado por estos dos elementos en el instante inicial.

<sup>7</sup> Visualizador grafico del software Algor

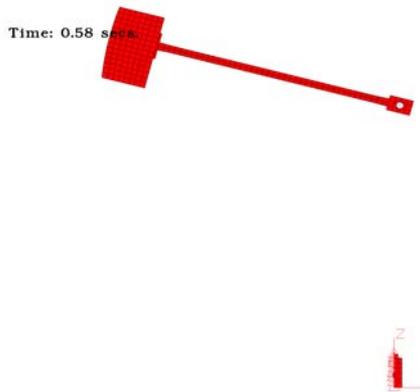


Figura 9. Posición de máxima altura del martillo después del impacto.

Angulo medido = 115°  
 Angulo inicial = 150°  
 Angulo total barrido = 265°

**5. DATOS EXPERIMENTALES.**

En el laboratorio se tomo el dato del ángulo total barrido (ángulo inicial mas ángulo barrido después del impacto), y gracias a una filmación del ensayo se determino el tiempo que se invierte en el evento, con este ultimo dato y el ángulo inicial se calcula la velocidad angular del brazo pendular en el momento del impacto.

**5.1. Ángulo Total Barrido.**  
 $\theta = 282^\circ$

**5.2. Tiempo del Evento.**

$T = 0.84 \text{ s}$  (antes del impacto)

**5.3. Velocidad.**

$$\alpha = \frac{\omega^2}{2\theta} \Rightarrow \omega = \sqrt{\alpha \times 2\theta}$$

$$\alpha = \frac{a}{r} = \frac{386,4 \text{ in/s}^2}{339,6 \text{ in}} = 11,37 \text{ rad/s}^2$$

$$\theta = 150^\circ \times \frac{\pi \text{ rad}}{180^\circ} = 2,62 \text{ rad}$$

$$\omega = \sqrt{11,37 \times 2 \times 2,62} \Rightarrow \omega = 7,72 \text{ rad/s}$$

$$v = \omega \times r = 7,72 \text{ rad/s} \times 339,6 \text{ in}$$

$$v = 2621,3 \text{ in/s}$$

(10)

**6. CÁLCULO DE LOS PORCENTAJES DE ERROR.**

Se realizara el calculo de los porcentajes de error comparando los datos del modelo analizado por elementos finitos con los teóricos y experimentales

**6.1. Teóricos.**

6.1.1. Velocidad.

Comparando la velocidad calculada en el numeral 2.1 con la obtenida en la simulación mecánica del evento, tendríamos.

$$\%Er = \left| \frac{V_{teorica} - V_{experimental}}{V_{teorica}} \right| \times 100$$

$$\Rightarrow \%Er = \left| \frac{214,11 - 226}{214,11} \right| \times 100$$

$$\%Er = 5,6\%$$

(11)

6.1.2. Tiempo

Comparando el tiempo calculado en el numeral 2.2 con el obtenido en la simulación mecánica del evento se obtuvo.

$$\%Er = \left| \frac{T_{teorico} - T_{experimental}}{T_{teorico}} \right| \times 100$$

$$\%Er = \left| \frac{0,83 - 0,82}{0,83} \right| \times 100$$

$$\%Er = 1,2\%$$

(12)

6.1.3. Ángulo barrido.

Comparando el ángulo calculado en el numeral 2.3 con el obtenido en la simulación mecánica del evento se obtuvo:

$$\%Er = \left| \frac{\theta_{teorico} - \theta_{experimental}}{\theta_{teorico}} \right| \times 100$$

$$\%Er = \left| \frac{286 - 265}{286} \right| \times 100$$

$$\%Er = 7,4\%$$

(13)

**6.2. Experimentales.**

6.2.1. Velocidad.

Este porcentaje se calcula con la velocidad determinada en el numeral 5.3 y la obtenida de la simulación mecánica.

$$\%Er = \left| \frac{V_{teorica} - V_{experimental}}{V_{teorica}} \right| \times 100$$

$$\Rightarrow \%Er = \left| \frac{262,13 - 226}{262,13} \right| \times 100$$

$$\%Er = 13,7\%$$

(14)

6.2.2. Tiempo.

Este porcentaje se calcula con el tiempo medido en el ensayo y el obtenido de la simulación mecánica.

$$\%Er = \left| \frac{T_{teorico} - T_{experimental}}{T_{teorico}} \right| \times 100$$

$$\%Er = \left| \frac{0,82 - 0,84}{0,82} \right| \times 100 \quad (15)$$

$$\%Er = 2,4\%$$

**6.2.3. Angulo barrido.**

Este porcentaje se calcula con el ángulo medido en el ensayo y el obtenido de la simulación mecánica.

$$\%Er = \left| \frac{\theta_{teorico} - \theta_{experimental}}{\theta_{teorico}} \right| \times 100$$

$$\%Er = \left| \frac{282 - 265}{282} \right| \times 100 \quad (16)$$

$$\%Er = 6\%$$

En la siguiente tabla quedan consignados los resultados obtenidos.

	Algor (A)	Teórico (t)	Experimental (E)	%E A/t	%Ed A/E
V	226in/s	214in/s	262,13in/s	5,6%	13,7%
T	0,82s	0,83s	0,84s	1,2%	2,4%
θ	265°	286°	282°	7,4%	6%

**Tabla 2.** Resultados obtenidos

**7. CONCLUSIONES**

Comparando los datos obtenidos del análisis por elementos finitos con los valores teóricos, se encuentra que los porcentajes de error son relativamente pequeños, lo que indica la consistencia del método. Los porcentajes de error son debidos a que para el análisis por elementos finitos el modelo de material usado, (Von Mises Curve with Isotropic Hardening) linealiza la zona plástica del material, lo que induce la diferencia entre este análisis y el experimental, ya que el comportamiento en la zona plástica no es de ninguna manera lineal.

Al obtener unos porcentajes de error relativamente pequeños en la simulación de la prueba, vislumbra otra ventaja del método, y es el hecho de que en un momento dado se pueda remplazar la prueba real por la simulación, reduciendo costos en uso de equipos y materiales en el laboratorio.

Este tipo de análisis permite también mostrar las bondades del análisis por elementos finitos a la hora de trabajar en la simulación de eventos mecánicos y como esta técnica trabajada correctamente se convierte en una gran herramienta para la labor del Ingeniero actual, dándole ventajas competitivas frente a aquellos que

siguen diseñando con las herramientas de diseño Mecánico tradicional.

**8. BIBLIOGRAFÍA**

- [1] SHIGLEY J.E., Mitchell L.D., 1986, “Diseño en ingeniería mecánica”, cuarta edición, Editorial Mc Graw Hill, México.
- [2] BEER F.P Johnston E.R, 1993, “mecánica Vectorial para Ingenieros Dinámica” , Quinta edición, Editorial Mc Graw Hill, México.
- [3] SERWAY A. Raymond , 1992, “Física” , tercera Edición, , Editorial Mc Graw Hill, México.
- [4] Manual SolidWorks 2002. Concord, Massachussets, USA.
- [5] Manual Novedades SolidWorks 2002. Concord, Massachussets, USA.