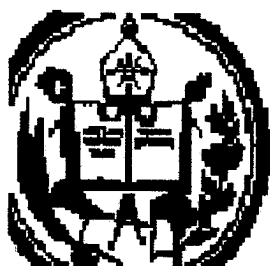


TAG45
G6

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS
POSTGRADO EN INGENIERIA ESTRUCTURAL**



**MODELO SIMPLIFICADO DE DAÑO PARA MIEMBROS
ESTRUCTURALES DE ACERO SOMETIDOS A
SOLICITACIONES MONOTÓNICAS**

Por:

Gloria Cecilia Gómez Devia

Noviembre de 1996

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

**MODELO SIMPLIFICADO DE DAÑO PARA MIEMBROS
ESTRUCTURALES DE ACERO SOMETIDOS A
SOLICITACIONES MONOTÓNICAS**

Por:

Gloria Cecilia Gómez Devia

Tesis presentada como requisito parcial para la obtención del grado de
Magister Scientiae en Ingeniería Estructural

Facultad de Ingeniería
Universidad de Los Andes

Noviembre de 1996

Aprobada

Prof. Julio Flórez L.

Prof. Pether Inglessis

Prof. Gustavo Maldonado

Prof. Nicolas Bellorin

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto de investigación :“Modelo simplificado de daño”, desarrollado por la Universidad de Los Andes bajo la dirección del Profesor Julio Flórez López y representa parte del plan de formación de Doctorado del Profesor Pether Inglesis. El trabajo de laboratorio aquí descrito, se realizo en el Laboratorio de Materiales y Ensayos de la Facultad de Ingeniería, fueron de gran ayuda las contribuciones de los técnicos del laboratorio en el desarrollo de los ensayos.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

RESUMEN

En este trabajo se propone un modelo simplificado que permite simular por medio de un reducido número de parámetros, el comportamiento inelástico de elementos estructurales de acero bajo cargas monotónicas. El mismo forma parte de la extensión del modelo simplificado de daño, propuesto en la Universidad de Los Andes en 1991 para desarrollar análisis no lineal en pórticos de concreto armado. Dicho modelo combina los conceptos de plasticidad concentrada y los conceptos de la mecánica de la degradación clásica y a través de ellos permite predecir el grado de deterioro de un sistema estructural solicitado.

El modelo en este trabajo propuesto, permite mediante un conjunto de variables internas medir el estado de deterioro de las rótulas de un miembro de acero. Se sugiere un procedimiento analítico y experimental para determinar la ley de comportamiento del elemento. La precisión del modelo analítico fue evaluada por medio de la comparación con varios resultados experimentales.

INDICE

	página
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE GRÁFICOS.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
1.1 Mecánica de la degradación clásica.....	4
1.2 Modelo simplificado de daño.....	10
2. ANALISIS EXPERIMENTAL DE MIEMBROS DE ACERO.....	30
2.1 Modelo experimental.....	30
2.2 Diseño de probetas.....	32
2.3 Equipos utilizados.....	32
2.4 Historia de cargas.....	33
2.5 Descripción de los ensayos.....	33
2.6 Construcción de las curvas fuerza vs. def. plástica.....	35
2.7 Observaciones experimentales.....	40
2.8 Gráficas rigidez vs. flecha plástica.....	40
3. MODELO DE COMPORTAMIENTO.....	46

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....63

REFERENCIAS.....65

ANEXOS: otros modelos de daño para miembros estructurales de acero

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1. Representación del elemento de volumen.....	4
FIGURA 2. Elemento de volumen sometido a fuerza axial.....	5
FIGURA 3. Ensayo de tracción simple de una probeta de acero.....	8
FIGURA 4. Daño vs. Def. Plástica.....	9
FIGURA 5. Desplazamientos generalizados en el nudo I.....	10
FIGURA 6. Deformaciones Generalizadas del Miembro “i-j”.....	11
FIGURA 7. Esfuerzos generalizados en un miembro de un pórtico plano.....	12
FIGURA 8. Fuerzas internas generalizadas en un miembro de un pórtico plano.....	12
FIGURA 9. Deformaciones generalizadas en un miembro “i-j” producto de incrementos infinitesimales en los desplazamientos del nodo “I”.....	13
FIGURA 10. Equilibrio de un miembro de un pórtico plano.....	16
FIGURA 11. Elemento diferencial de una viga en configuración inicial.....	17
FIGURA 12. Elemento diferencial de una viga en configuración deformada.....	18
FIGURA 13. Modelo de plasticidad concentrada en un miembro de un pórtico plano.....	23
FIGURA 14. Modelo de disipación concentrada.....	25
FIGURA 15. (a)Mecanismo de disipación de energía,(b)Simulación experimental.....	30
FIGURA 16. Disposición de las probetas ensayadas.....	31
FIGURA 17. Detalle de la conexión.....	32
FIGURA 18. Historia de solicitaciones.....	33
FIGURA 19. Máquina Universal.....	34
FIGURA 20. Disposición del extensometro.....	35
FIGURA 21. Modelo experimental.....	46

LISTA DE GRÁFICOS

	Página
Gráficos (1,2,3,4) Fuerza vs. deflexión	36-39
Gráficos (5,6,7,8) Rigidez vs. Def. permanente	42-45
Gráficos (9,10,11,12) Daño vs. Def. plástica	48-51
Gráficos (13,14,15,16) Comparación de la ley de evolución del daño con resultados experimentales	53-56
Gráficos (13,14,15,16). Comparación del modelo analítico con resultados	
experimentales	58-61

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

INTRODUCCIÓN

La experiencia ha demostrado que la aplicación de los códigos sísmicos no garantiza el buen comportamiento de las edificaciones. El daño e inclusive el colapso de estructuras aporricadas diseñadas de acuerdo a las normas, evidencian la gran necesidad que existe de incorporar procedimientos mas rigurosos de análisis, que permitan predicciones confiables sobre la capacidad de un sistema estructural sometido a grandes sollicitaciones de disipar energía. Esta disipación de energía mediante el comportamiento inelástico implica daños, cuya magnitud puede no ser despreciable y se hace necesario cuantificarla adecuadamente.

En las ultimas décadas el propósito fundamental de muchos investigadores, ha sido desarrollar modelos que permitan predecir el grado de deterioro de un sistema estructural sollicitado. La utilidad de estos modelos es evidente puesto que representan una herramienta para el diseño sismorresistente, para el control localizado de daños estructurales previstos y permitirían cuantificar la resistencia residual en consecuencia la serviceabilidad de una estructura dañada durante su vida de servicio o sollicitada por sismos severos. Han sido propuestos numerosos modelos con diferentes grados de sofisticación, así por ejemplo:

En el caso de estructuras de concreto armado:

- Modelos basados en los conceptos de la mecánica de la degradación clásica y la plasticidad concentrada (Modelo simplificado de daño).

-Flórez López J. (1991,1993) [1,2,3]

- Cipollina A. y Flórez López J. (1992)[4,5]

-Puglisi Monica (1994)[6]

-Ramírez Angela (1995)[7]

-Thomson E. (1995)[8]

- Modelos basados en la disipación de energía, durante la respuesta inelástica de estructuras :

-Darwin y Nmai (1986) [10]

-Filippou, Popov y Bertero (1983)

que este modelo puede ser considerado como una adaptación del modelo de Lemaitre [9] al análisis de estructuras de acero.

El trabajo que aquí se presenta consta de tres capítulos :

En el primero de ellos, se describen los conceptos básicos de la mecánica de la degradación clásica, se hace una revisión bibliográfica de las leyes de comportamiento del modelo elástico, elastoplástico y del modelo simplificado de daño para el caso de pequeños desplazamientos .

En el segundo capítulo, se analiza el comportamiento experimental de los miembros de acero y se describen los ensayos y sus resultados.

En el tercer capítulo, se presenta el modelado matemático y se hace una comparación del modelo analítico con los resultados experimentales.

En el anexo se describen otros modelos de daño desarrollados para el caso de estructuras de acero.

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 Mecánica de la degradación clásica.

En la mecánica de la degradación clásica[9], el daño es estudiado como una variable interna, que representa el proceso progresivo de deterioro de un material cuando se encuentra sometido a sollicitaciones fuertes. La representación mecánica del daño la establece a través de la definición de la variable daño, el concepto de esfuerzo efectivo y la hipótesis de equivalencia de deformaciones.

1.1.1 Definición de la variable daño (L.M. Kachanov, 1958).

Considérese un medio continuo como el mostrado en la fig.1. Debido a las sollicitaciones aplicadas sobre el medio, se inicia en él un proceso de deterioro que induce la aparición de microfisuras. Si se toma un elemento representativo de volumen (fig. 1),

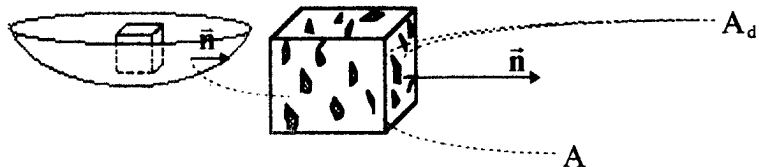


Fig.1 Representación del elemento de volumen

el daño se define como la relación entre el área de las microfisuras y el área total de la cara, orientada según la normal \vec{n} a esa cara del elemento de volumen:

$$D_{\vec{n}} = \frac{A_d}{A} \quad 1.1$$

siendo $D_{\vec{n}}$ la variable daño, A_d el área de las microfisuras y A el área total de la cara. Si el daño está igualmente distribuido en todas las direcciones del elemento de volumen se representa por medio de un escalar,

$$D_{\vec{n}} = D \quad \forall \quad \vec{n} \quad 1.2$$

que puede tomar valores únicamente en el intervalo $[0,1]$. Toma el valor de cero cuando se trata de un material intacto y uno cuando el material esta totalmente fisurado.

En el caso de un medio continuo la ley de elasticidad es obtenida a partir del concepto de esfuerzo efectivo y la hipótesis de equivalencia de deformaciones.

1.1.2 Esfuerzo efectivo (Y. N. Rabonov, 1968).

El elemento de volumen mostrado en la fig 2 esta sometido a una fuerza axial F . El esfuerzo normal en la cara se define como: $\sigma = \frac{F}{A}$ 1.3

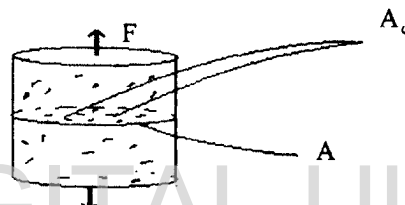


Fig.2 Elemento de volumen sometido a fuerza axial

Si se supone que no hay microfuerzas actuando en las microgrietas representadas por A_d , se puede introducir un esfuerzo efectivo $\bar{\sigma}$ asociado a la superficie que resiste efectivamente la carga $(A - A_d)$:

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{A - A_d} \quad 1.4$$

Introduciendo la variable daño($D = \frac{A_d}{A}$):

$$\bar{\sigma} = \frac{F}{A - A_d} = \frac{F}{A \left(1 - \frac{A_d}{A} \right)} \quad \text{ó}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - D}$$

1.5

1.1.3 Hipótesis de equivalencia de deformaciones (J. Lemaitre, 1971).

Admite que cualquier ecuación constitutiva de la deformación para un material dañado, se deriva de la misma forma que para un material intacto pero sustituyendo el esfuerzo normal (σ) por el esfuerzo efectivo ($\bar{\sigma}$)

En la ley de comportamiento de un elemento elasto-plástico :

$$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon_p) \quad 1.6$$

donde ε_p representa las deformaciones permanentes del material,

se sustituye σ por $\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1-D}$ se tiene:

$$\frac{\sigma}{1-D} = E(\varepsilon - \varepsilon_p)$$

$$\boxed{\sigma = (1-D)E(\varepsilon - \varepsilon_p)} \quad 1.7$$

Esta expresión representa la **ley de estado para un material elasto-plástico degradable**. Para definir su ley de comportamiento se hace necesario determinar las deformaciones plásticas y la variable daño. Las relaciones adicionales que permiten determinar las nuevas incógnitas se denominan leyes de evolución.

- Ley de evolución de las deformaciones plásticas

La ley de evolución de las deformaciones plásticas se expresa mediante la función de fluencia, que en el caso de un elemento elasto-plástico perfecto se representa como:

$$f = |\sigma| - \sigma_y \leq 0 \quad 1.8$$

mediante la hipótesis de equivalencia de deformaciones ec. 1.8 Se tiene la función de fluencia de un elemento elasto-plástico degradable y se expresa de la siguiente manera:

$$f = \left| \frac{\sigma}{1-D} \right| - \sigma_y \quad 1.9$$

La ley de evolución de las deformaciones plásticas se define como:

$$\begin{cases} d\varepsilon_p = 0 & \text{si } f(\sigma) < 0 & \text{o } df < 0 \\ d\varepsilon_p \neq 0 & \text{si } f(\sigma) = 0 & \text{y } df = 0 \end{cases} \quad 1.10$$

- Ley de evolución de la variable daño

Para completar el modelo se hace necesario determinar la ley de evolución para la variable interna daño. Esta ley de evolución se obtiene a partir de resultados experimentales, depende del tipo de material y del tipo de sollicitación a que este sometido. A continuación se describirá un método para la determinación de la ley de evolución del daño utilizado en uno de los modelos mas simples de la mecánica del daño: el modelo uniaxial de Lemaitre para metales

1.1.4 Modelo uniaxial de Lemaitre de daño dúctil para metales

El método usado en el laboratorio para medir el daño se denomina método de variación del modulo de elasticidad.

De la ley de elasticidad para un material dañado (ec.1.7) se tiene:

$$\sigma = (1-D)E(\varepsilon - \varepsilon_p)$$

donde :

$$\bar{E} = (1-D)E \quad 1.11$$

y representa el **modulo de elasticidad efectivo** del material dañado; el cual es determinado a través de un ensayo uniaxial simple en una probeta de acero sometida a carga y descarga(fig.3).

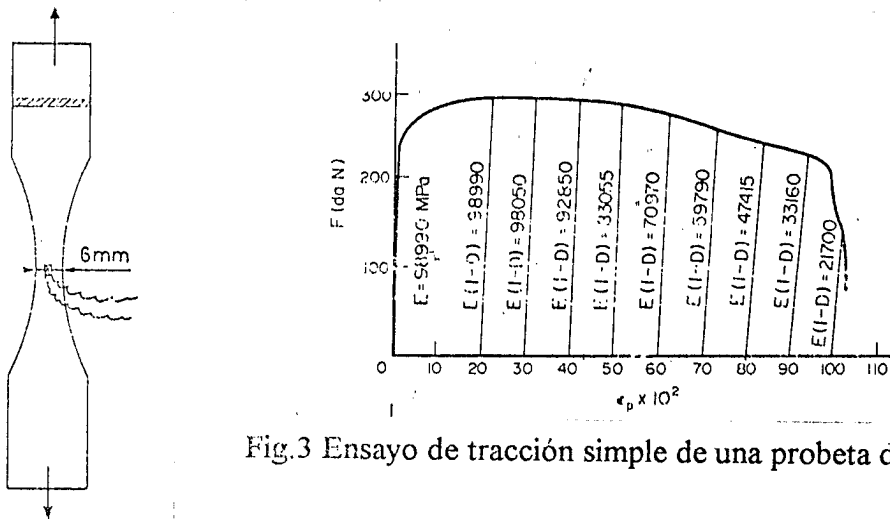


Fig.3 Ensayo de tracción simple de una probeta de acero[9]

El comportamiento experimental de la probeta se puede describir dividiendo la gráfica en tres partes:

1. Una zona elástica inicial en donde existe una relación de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación, en ella no aparecen deformaciones permanentes.
2. Una zona de fluencia en la cual se observa un considerable aumento de la deformación unitaria sin el correspondiente aumento de la carga. En esta zona se inicia la aparición de deformaciones permanentes
3. La zona de ablandamiento que se caracteriza por un aumento de la deformación acompañada de la disminución del límite elástico producto del daño del material.

Los valores del daño pueden ser determinados a partir de las mediciones del modulo de elasticidad efectivo (ec.1.11) puesto que el modulo de elasticidad del material es conocido:

$$D = 1 - \frac{\bar{E}}{E} \quad 1.12$$

Gratificando el daño en función de las deformaciones permanentes obtuvo:

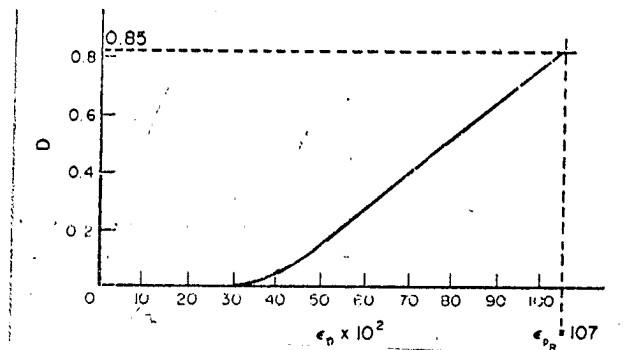


Fig.4 Daño vs. def. plásticas

En esta gráfica se puede observar una relación proporcional entre el daño y las deformaciones permanentes. Según Lemaitre esta relación puede ser expresada como :

$$D = C(q - q_{cr}) \quad 1.14$$

donde:

$$q = |\mathrm{d}\varepsilon_p| \text{ representa la deformación plástica acumulada} \quad 1.15$$

C , es un parámetro del material.

q_{cr} , representa la def. plástica en la cual se inicia el daño y depende del tipo de material.

En resumen el **modelo de Lemaitre de daño dúctil para metales** esta definido por las siguientes expresiones :

- ley de estado

$$\sigma = (1 - D)E(\varepsilon - \varepsilon_p)$$

- función de fluencia

$$f = \left| \frac{\sigma}{1 - D} \right| - \sigma_y$$

- ley de evolución del daño

$$D = C(q - q_{cr})$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

1.2 Modelo simplificado de daño.

Este modelo representa una adaptación de los conceptos básicos de la mecánica de la degradación clásica (sección anterior) a el análisis de estructuras aporticadas.

1.2.1 Variables del modelo:

Desplazamientos Generalizados.

Sea un sistema estructural plano cualquiera como el que se muestra en la fig.5[3] El mismo esta compuesto por "m" miembros conectados entre si por "n" nodos. Para indicar la posición de los nudos en el espacio se introduce un sistema de ejes coordenados ortogonales "X" e "Y", que serán denominados "ejes de referencia" y permanecen estacionarios durante en movimiento de la estructura

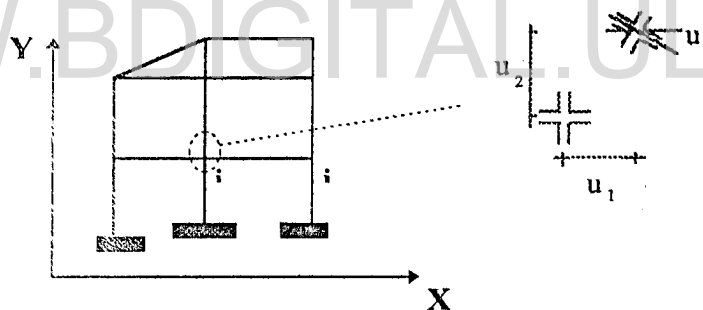


Fig.5 Desplazamientos Generalizados del nudo "i"

Se desea estudiar la historia de los desplazamientos durante un intervalo de tiempo $[0, T]$. En el tiempo "cero" la estructura se encuentra en la posición inicial y se supone conocida. Para cualquier tiempo "T" diferente de cero se encuentra en una posición deformada.

a) Desplazamientos Generalizados de los Nodos.

Asumimos tres desplazamientos generalizados por junta. Así por ejemplo, los

desplazamientos en el nodo “i” de una barra se representan mediante la matriz columna: $\{U\}_i^t = (U_1, U_2, U_3)$, siendo U_1, U_2 los desplazamientos traslacionales en la dirección horizontal y vertical, U_3 la rotación del nodo con respecto a los ejes de referencia.

b) Desplazamientos Generalizados del Miembro.

Los desplazamientos del miembro “b” entre los nudos “i” y “j” se representan por la matriz $\{q\}^t = (\{U\}_i^t, \{U\}_j^t)$. Dicha matriz posee por lo tanto 6 grados de libertad.

c) Desplazamientos generalizados de la estructura .

Representan el desplazamiento de todos los nodos de la estructura. Los desplazamientos generalizados de todos los nudos de la estructura se agrupan en la matriz $\{X\}^t = (\{U\}_1^t, \{U\}_2^t, \dots, \{U\}_n^t)$.

Deformaciones Generalizadas del Miembro.

Las deformaciones generalizadas permiten representar el cambio de forma de los miembros de la estructura. Las deformaciones generalizadas del miembro “b” entre los nudos “i” y “j” en la configuración deformada, se representan mediante la matriz $\{\Phi\}^t = \{\Phi_i, \Phi_j, \delta\}$, donde Φ_i y Φ_j indican la rotación de los extremos “i”, “j” con respecto a la cuerda “i-j” respectivamente y δ corresponde al alargamiento de la cuerda “i-j” del miembro (fig. 6)

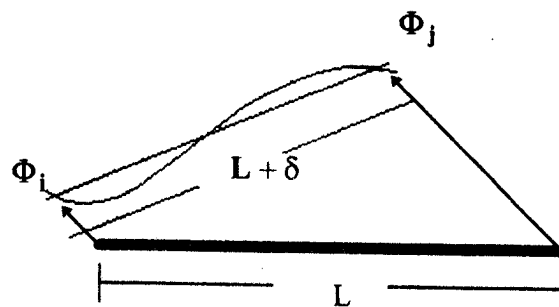


Fig. 6 Deformaciones Generalizadas del Miembro “i-j”

Esfuerzos Generalizados.

En un miembro "b" cualquiera del pórtico de la fig. 5 Los esfuerzos generalizados en la configuración deformada se representan en la matriz columna $\{M\}^t = (M_i, M_j, N)$ donde M_i y M_j corresponden a los momentos flectores en los extremos del miembro y N la fuerza axial (ver fig. 7).

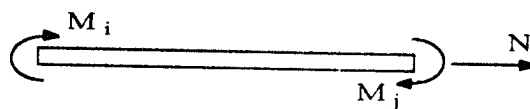


Fig.7 Esfuerzos Generalizados en un miembro de un pórtico plano.

Fuerzas Internas Generalizadas.

Las fuerzas internas generalizadas que actúan sobre el miembro en la configuración deformada se indican mediante la matriz $\{Q\}^t = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_6\}$ (fig.8) donde los tres primeros elementos representan las acciones sobre el extremo "i" y las tres últimas las del extremo "j". La matriz de fuerzas del miembro "b" en el contexto de la estructura se representa por el símbolo $\{Q\}_b$ y se construye añadiendo ceros en los lugares correspondientes a los demás grados de libertad de la estructura:

$$\{Q\}^t = \{0, 0, 0, \dots, Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_4, Q_5, Q_6, \dots, 0, 0, 0\}$$

nodo 1, , nodo i, , nodo j, , nodo n

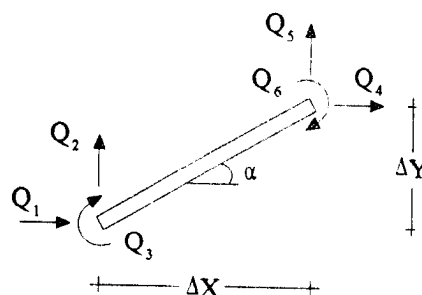


Fig.8 Fuerzas Internas Generalizadas en un miembro de un pórtico plano.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Fuerzas Externas Sobre los Nodos.

Las fuerzas externas aplicadas en los nudos de la estructura se agrupan en la matriz $\{P\}^t = \{P_1, P_2, \dots, P_{3n}\}$. Donde se incluyen tanto las fuerzas externas como las reacciones sobre los apoyos de la estructura. Las fuerzas P_1, P_2 y P_3 representan la fuerza horizontal, fuerza vertical y momento aplicados en el nodo 1. El vector de cargas P contiene $3 \cdot n$ variables de fuerzas y momentos aplicados.

1.2.2 Ecuaciones que definen el modelo.

Ecuaciones de compatibilidad.

Relacionan los Desplazamientos generalizados y sus correspondientes Deformaciones generalizadas.

Si sometemos a la estructura a un desplazamiento infinitesimal dq_1 en la dirección X, mientras que los demás desplazamientos permanecen nulos. Como se indica en la fig 9a.

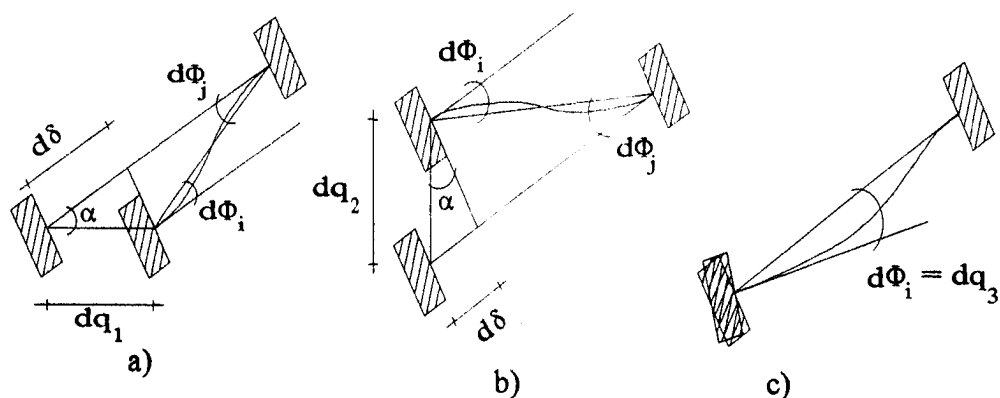


Fig. 9 Deformaciones generalizadas en el miembro "i-j" producto de incrementos infinitesimales en los desplazamientos del nodo "i"

Este incremento induce la aparición de deformaciones generalizadas en el miembro que expresadas matemáticamente se tiene:

$$d\Phi_i = dq_1 \frac{\text{sen}\alpha}{l} \quad d\Phi_j = dq_1 \frac{\text{sen}\alpha}{l} \quad d\delta = -dq_1 \cos\alpha \quad 1.16$$

Donde α representa el ángulo entre la cuerda "i-j" en la configuración deformada y el eje X del sistema de referencia. De igual forma un incremento diferencial dq_2 en la dirección Y del mismo nodo (fig. 9b) da lugar a incrementos de las deformaciones generalizadas que se pueden expresar como:

$$d\Phi_i = dq_2 \frac{\text{sen}\alpha}{l} \quad d\Phi_j = dq_2 \frac{\text{sen}\alpha}{l} \quad d\delta = -dq_2 \cos\alpha \quad 1.17$$

Por último, un incremento diferencial dq_3 de la rotación del nudo "i" (fig. 9c) da lugar a las siguientes deformaciones:

$$d\Phi_i = dq_3 \quad d\Phi_j = 0 \quad d\delta = 0 \quad 1.18$$

De igual manera, se pueden obtener los incrementos de deformaciones al aplicar los desplazamientos dq_4 , dq_5 ó dq_6 en el nudo "j". Aplicando el principio de superposición tenemos:

$$\{d\Phi\}_{3 \times 1} = [B(q)]_{3 \times 6} \{dq\}_{6 \times 1} \quad 1.19$$

Donde $[B(q)]$ será denominada "Matriz de transformación" y esta expresada en función de los desplazamientos:

$$[B(q)] = \begin{bmatrix} \sin(\alpha)/L & -\cos(\alpha)/L & 1 & -\sin(\alpha)/L & \cos(\alpha)/L & 0 \\ \sin(\alpha)/L & -\cos(\alpha)/L & 0 & -\sin(\alpha)/L & \cos(\alpha)/L & 1 \\ -\cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 \end{bmatrix}$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Si aceptamos la hipótesis de pequeños desplazamientos las modificaciones de la matriz de transformación son despreciables, entonces:

$$[B(q)] \cong [B_0] \quad 1.20$$

siendo $[B_0]$ la matriz de transformación en condición inicial. Por lo tanto tenemos ecuaciones de compatibilidad lineales:

$$\{\Phi\} = [B_0]\{q\} \quad 1.21$$

En forma general las relaciones esfuerzos-deformaciones pueden expresarse como la integración, desde el instante inicial ("o") hasta la configuración deformada ("d").

Procediendo de esta manera:

$$\{\Phi\}_{3 \times 1} = \int_0^d [B(q)]\{dq\} \quad 1.22$$

de donde se obtienen las siguientes expresiones :

$$\delta = \sqrt{(x_d^2 + y_d^2)} - L_0 \quad ; \quad \Phi_i = q_3 - [\alpha_o - \alpha_d] \quad ; \quad \Phi_j = q_6 - (\alpha_o - \alpha_d) \quad 1.23$$

$$x_d = x_0 + q_4 - q_1$$

$$y_d = y_0 + q_5 - q_2 \quad ;$$

$$\alpha_d = \arctan\left(\frac{y_d}{x_d}\right)$$

L_0 es la longitud inicial de la cuerda "i-j" y x_0 e y_0 son las proyecciones de la cuerda "i-j" en la configuración inicial sobre los ejes de referencia.

Ecuaciones de equilibrio

Relacionan las variables tipo esfuerzo $\{M\}$, con las fuerzas internas $\{Q\}$.

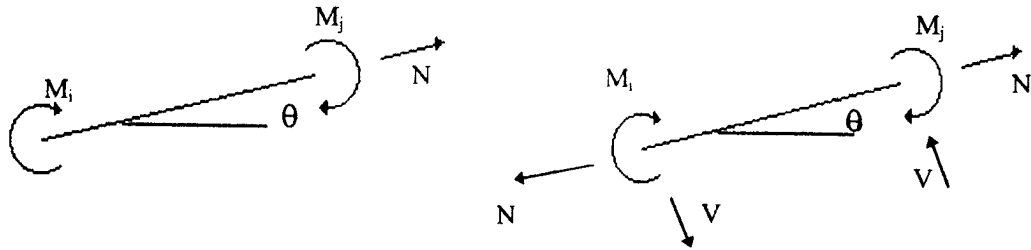


Fig. 10 Equilibrio de un miembro de un pórtico plano

a) Equilibrio estático de un miembro en la configuración deformada.

Considérese el miembro de la fig.(10a) donde se representan únicamente los esfuerzos generalizados, el miembro no se encuentra en equilibrio. Las fuerzas para equilibrar los esfuerzos se indican en la fig.(10b) proyectando las fuerzas sobre los ejes coordenadas tenemos:

$$\begin{aligned} Q_1 &= -N \cos \theta + V \operatorname{sen} \theta & Q_2 &= -N \operatorname{sen} \theta - V \cos \theta & Q_3 &= M_i & 1.24 \\ Q_4 &= N \cos \theta - V \operatorname{sen} \theta & Q_5 &= N \operatorname{sen} \theta + V \cos \theta & Q_6 &= M_j \end{aligned}$$

donde $V = (M_i + M_j) / L$

El equilibrio estático puede ser representado de la siguiente manera:

$$\{Q\}_{6 \times 1} = [B(q)]_{6 \times 3}^t \{M\}_{3 \times 1} \quad 1.25$$

donde $[B(q)]$ es la matriz de transformación definida en la ecuación (1).

Para pequeños desplazamientos:

$$[B(q)] \cong [B_0]$$

b) El equilibrio estático de los nodos de la estructura se expresa de la siguiente forma:

$$\{P\} - \sum_{b=1}^m \{Q\}_b = 0 \quad 1.26$$

donde el subíndice “b” representa cada barra y “m” es el número total de barras.

1.2.2.1 Leyes de comportamiento

- Ley de comportamiento del modelo elástico

Si tenemos un elemento diferencial sometido a las acciones definidas en la teoría de vigas : Campo de momentos flectores y de fuerzas cortantes

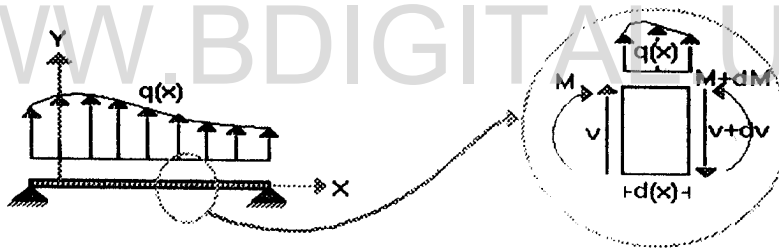


Fig. 11 Elemento diferencial de una viga en configuración inicial.

El equilibrio del elemento diferencial se obtiene:

$$V(x) - [V(x) + dV(x)] + q(x)dx = 0 \quad 1.27$$

simplificando

$$dV(x) = q(x)dx \quad \Rightarrow \quad \frac{dV(x)}{dx} = q(x) \quad 1.28$$

Equilibrando momentos tenemos:

$$M(x) - [M(x) + dM(x)] + V(x)dx + q(x)dx(dx/2) = 0 \quad 1.29$$

Despreciando el termino de orden superior $(dx)^2$ se tiene:

$$dM(x) = dV(x)dx \Rightarrow \frac{dM(x)}{dx} = V(x) \quad 1.30$$

De aquí las ecuaciones de equilibrio para pequeños desplazamientos :

$$V(x) = \int dV(x) = \int q(x)dx \quad 1.31$$

$$M(x) = \int dM(x) = \int V(x)dx \quad 1.32$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

El efecto del momento flector sobre el elemento diferencial se representa en la fig. 12

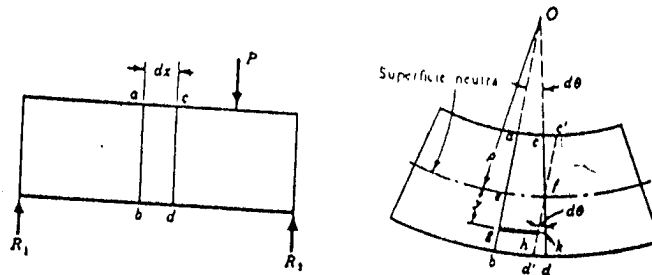


Fig. 12 Elemento diferencial de una viga en configuración deformada.

La figura muestra dos secciones adyacentes ab y cd separadas una distancia dx. Debido a una flexión producida por la carga P, las secciones ab y cd giran una con respecto a la otra un pequeño ángulo $d\theta$, pero permanecen planas.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La fibra ac de la parte superior se acorta y la fibra bd se alarga . En algún punto entre ellas existe una fibra , tal como ef, cuya longitud no varia .

Considerando ahora la deformación de una fibra cualquiera gh situada a una distancia y de la superficie neutra . Su alargamiento hk es el arco de circunferencia de radio y y el ángulo $d\theta$ viene dado por:

$$\delta = hk = yd\theta \quad 1.33$$

La deformación se obtiene dividiendo el alargamiento entre la longitud inicial de la fibra:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{dx} = \frac{yd\theta}{dx} = \frac{yd\theta}{\rho d\theta} = \frac{y}{\rho} \quad 1.34$$

El esfuerzo debido a la flexión en cualquier sección para una distancia y medida desde el eje neutro es:

$$\sigma_y = \frac{M_y}{I} \quad 1.35$$

y su deformación correspondiente será:

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} = \frac{M_y}{EI} \quad 1.36$$

De la ley de comportamiento se obtendrá igualmente la deformación axial:

$$N = AEd(x) \quad 1.37$$

Al deducir la formula de flexión se obtiene la relación:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad 1.38$$

Donde el radio de curvatura ρ se define matemáticamente como:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2y / dx^2}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right]^{3/2}} \quad 1.39$$

Teniendo en cuenta que dy/dx es muy pequeño, su cuadrado es despreciable frente a la unidad, por lo que se puede escribir

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad 1.40$$

En el caso en que el momento esté dado como una función $M(x)$:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad 1.41$$

$$\delta(x) = \frac{du(x)}{dx} \quad 1.42$$

Derivando un par de veces las dos ecuaciones anteriores:

$$\frac{d^3y}{dx^3} = \frac{d}{dx} \left[\frac{M(x)}{EI} \right] \quad 1.43$$

$$\frac{d^4y}{dx^4} = \frac{d^2}{dx^2} \left[\frac{M(x)}{EI} \right] \quad 1.44$$

y para el caso axial queda:

$$AE \frac{du(x)}{dx} = N \quad 1.45$$

si, EI es constante a lo largo de la longitud del miembro y utilizando las ecuaciones se tiene:

$$\frac{d^3y}{dx^3} = \frac{1}{EI} \frac{dM(x)}{dx} = \frac{V(x)}{EI} \quad 1.46$$

$$\frac{d^4y}{dx^4} = \frac{1}{EI} \frac{dV(x)}{dx} = \frac{q(x)}{EI} \quad 1.47$$

Por lo tanto, la ecuación diferencial que gobierna un elemento a flexión, en pequeñas deformaciones, con sección transversal y propiedades constantes, se escribirá de la forma:

$$EI \frac{d^4y}{dx^4} = q(x) \quad AE \frac{du(x)}{dx} = N \quad 1.48$$

Considerando que no hay cargas transversales ($q(x)=0$), la integración de las ecuaciones es:

$$y = C_1 \frac{x^3}{6} + C_2 \frac{x^2}{2} + C_3x + C_4 \quad AEu(X) + C_5 \quad 1.49$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Por medio de las condiciones de borde se puede calcular las constantes de integración en función de las deformaciones generalizadas ($C_i=C_i(\Phi)$):

$$x = 0 \Rightarrow \begin{cases} y = 0 \\ \frac{dy}{dx} = -\Phi_i \end{cases} \quad ; \quad x = L \Rightarrow \begin{cases} y = 0 \\ \frac{dy}{dx} = \Phi_j \end{cases} \quad 1.50$$

Evaluando se obtiene:

$$\begin{aligned} C_4 &= 0 \\ C_3 &= -\Phi_i \\ C_2 &= \frac{4}{L}\Phi_i + \frac{2}{L}\Phi_j \\ C_1 &= \frac{6}{L^2}\Phi_i + \frac{2}{L^2}\Phi_j \end{aligned} \quad 1.51$$

Sustituyendo las constantes en la Ec 1.40 se tiene:

$$\begin{aligned} x = 0 \Rightarrow M_i &= \left[\frac{d^2y}{dx^2} \right] \\ x = L \Rightarrow M_j &= \left[\frac{d^2y}{dx^2} \right] \end{aligned}$$

lo cual conduce a las expresiones:

$$\begin{aligned} M_i &= C_2 L \\ M_j &= C_1 L + C_2 \end{aligned} \quad 1.52$$

Para el caso axial las condiciones de borde son:

$$\begin{aligned} U(0) &= 0 \\ U(L) &= \delta \end{aligned}$$

Al igual que en el caso anterior:

$$C_s=0$$

$$N = \frac{AE}{L} \delta$$

1.53

Escribiendo las expresiones anteriores en forma matricial tenemos la ley de comportamiento del elemento elástico:

$$\begin{Bmatrix} M_i \\ M_j \\ N \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \frac{EI}{L} & 2 \frac{EI}{L} & 0 \\ 2 \frac{EI}{L} & 4 \frac{EI}{L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{AE}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_i \\ \Phi_j \\ \delta \end{Bmatrix} \quad \text{ó} \quad \{M\} = [S]\{\Phi\} \quad 1.54$$

Donde [S] es la matriz de rigidez del miembro.

Limitaciones del modelo

El modelo elástico no permite cuantificar las deformaciones generalizadas permanentes que surgen como consecuencia de someter la estructura a grandes sobrecargas. En otras palabras, según este modelo las cargas que actúan sobre una estructura pueden crecer ilimitadamente ocasionándole a la misma deformaciones ilimitadas, lo que evidentemente no representa el comportamiento real de un sistema estructural. Entre las leyes de comportamiento que permiten tomar en cuenta este efecto, se tiene el modelo elasto-plástico perfecto.

- **Ley de comportamiento del modelo elasto-plástico perfecto**

Para obtener el modelo se supondrá que las deformaciones plásticas de un miembro de un pórtico plano, se concentran en los extremos del mismo, mientras que la barra conserva su comportamiento elástico. Por lo tanto, el comportamiento de toda la barra es el resultado de la suma de una viga elástica, más un sistema de resortes o de rótulas donde se

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

concentran las deformaciones permanentes del elemento. Esta representación es denominada “**modelo de plasticidad concentrada**”.

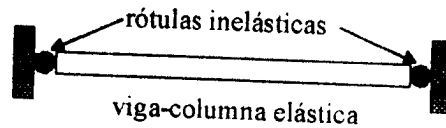


Fig.13 Modelo de plasticidad concentrada en un miembro de un pórtico plano

Es así, como se introduce una nueva variable interna : la matriz de deformaciones generalizadas plásticas $\{\Phi_p\} = \{\Phi_i^p, \Phi_j^p, \delta^p\}$, donde se representa la rotación permanente de las rótulas “i”, “j” y el alargamiento permanente de la cuerda “i-j”. Las deformaciones generalizadas de la viga columna elástica son entonces el resultado de la diferencia entre las deformaciones totales del miembro y las deformaciones de las rótulas, es decir:

De aquí, la expresión que permite obtener el valor de los esfuerzos generalizados a partir de las deformaciones generalizadas para el caso de un elemento elastoplástico es:

$$\{M\} = [S]\{\Phi - \Phi_p\} \quad 1.55$$

donde $[S]$ es la matriz de rigidez de la viga elástica

En las aplicaciones practicas se desprecian las deformaciones axiales permanentes ($\delta^p = 0$), por lo tanto, para que la ec. 1.55 represente una ley de comportamiento es necesario determinar la nueva incógnita introducida $\{\Phi^p\}$. La relación adicional que permite determinar dicha incognita se denomina **ley de evolución de las deformaciones plásticas** y se expresa mediante el concepto de “función de fluencia”. En este caso la función de fluencia es:

$$f_i(M_i) = |M_i| - M_y \leq 0 \quad f_j(M_j) = |M_j| - M_y \leq 0 \quad 1.56$$

Licencia Creative Commons.

La evolución de la rotación plástica se define como:

$$\begin{cases} d\Phi_i^p = 0 & \text{si } f_i < 0 \text{ o } df_i < 0 \\ d\Phi_i^p \neq 0 & \text{si } f_i = 0 \text{ y } df_i = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} d\Phi_j^p = 0 & \text{si } f_j < 0 \text{ o } df_j < 0 \\ d\Phi_j^p \neq 0 & \text{si } f_j = 0 \text{ y } df_j = 0 \end{cases} \quad 1.57$$

Limitaciones del modelo

El modelo elasto-plástico no es útil, cuando se desea obtener la información necesaria que permita predecir la capacidad de deformación de un sistema estructural. El mismo considera que las deformaciones pueden crecer ilimitadamente sin producirle deterioro alguno a la estructura. Es evidente que la pérdida de rigidez y el ablandamiento por deformación, inherentes al desarrollo de las deformaciones generalizadas debido a cargas de gran intensidad son inevitables. Por lo tanto, no es posible describir el comportamiento de un sistema estructural sin tomar en cuenta estos efectos.

Entre los modelos desarrollados que permiten cuantificar tanto las deformaciones generalizadas permanentes, como el grado de deterioro físico de un sistema estructural cualquiera, tenemos el **modelo simplificado de daño**. Este modelo se basa en los conceptos de la mecánica de la degradación clásica para medios continuos y los introduce en el análisis de estructuras aporticadas a través de un concepto similar al empleado en los modelos de plasticidad concentrada. El marco teórico general del mismo será descrito a continuación, para posteriormente presentar el modelo para elementos estructurales de acero sometidos a sollicitaciones monotónicas, que es el propósito del presente trabajo.

- **Modelo mecánico de un miembro elástico degradable**

Para simular el grado de deterioro físico de los elementos de un sistema estructural sometido a sollicitaciones fuertes de una manera sencilla, se adopta el **modelo de daño concentrado**[1,2,3], cuyo concepto es similar al empleado en los

modelos de plasticidad concentrada. Según los cuales, cada elemento se modela como una viga elástica con dos resortes degradables a flexión combinados con uno axial en sus extremos. Se considera, que los efectos inelásticos de cada miembro se concentran en los extremos del mismo, mientras que el elemento permanece en el rango elástico, por lo tanto el comportamiento a flexión del elemento viga es descrito mediante la relación momento-curvatura y el comportamiento de los resortes se representa mediante la ley de momento-rotación o fuerza desplazamiento .

Por medio de este modelo, el daño se mide mediante escalares. El concepto de zona plástica de la teoría de vigas, es sustituido por el de articulación plástica que permite representar con suficiente exactitud los fenómenos que están ocurriendo en la estructura y se gana en simplicidad y facilidad de implementación en los programas de calculo existentes. Por otra parte, el fenómeno de **localización** del daño y la deformación en ciertas zonas de pequeño volumen que se observa experimentalmente, justifica la utilización de este modelo. En los modelos de disipación concentrada la barra se representa como se indica en la Fig 14

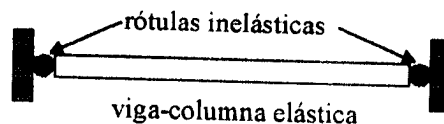


Fig.14 Modelo de disipación concentrada

Deformaciones generalizadas de las rótulas plásticas

Las deformaciones generalizadas del elemento las constituyen: las deformaciones de la viga y las deformaciones de las rótulas plásticas.

$$\{\Phi\} = \{\Phi_v\} + \{\Phi_r\} \quad 1.58$$

donde:

$$\{\Phi_v\} = [F^0]\{M\} \quad 1.59$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La introducción de las deformaciones debidas al daño en las deformaciones generalizadas de las rótulas, se logra al incluir un nuevo conjunto de variables $\{\Phi^d\}^t = (\Phi_i^d, \Phi_j^d, \delta^d)$ las cuales permiten registrar el deterioro de las rótulas. En forma análoga al caso de las deformaciones plásticas: Φ_i^d representa el daño a flexión de la rótula i, Φ_j^d representa el daño a flexión en la rótula j, δ^d representa el daño axial en el elemento. Estas variables alcanzan un valor entre cero y uno. Cuando el daño toma el valor de cero las rotulas poseen una flexibilidad nula(o una rigidez infinita), por el contrario, si el daño es igual a uno la flexibilidad es infinita(o rigidez nula).

Las deformaciones generalizadas de las rótulas pueden descomponerse entonces, en dos partes: las deformaciones generalizadas plásticas $\{\Phi_p\}$ y las deformaciones debidas al daño $\{\Phi^d\}^t = (\Phi_i^d, \Phi_j^d, \delta^d)$ es decir:

$$\{\Phi_r\} = \{\Phi_d\} + \{\Phi_p\} \quad 1.60$$

En forma general se obtiene:

$$\{\Phi\} = \{\Phi_v\} + (\{\Phi_d\} + \{\Phi_p\}) \quad 1.61$$

Las deformaciones elásticas del miembro se obtienen de la diferencia entre las deformaciones totales y las deformaciones permanentes:

$$\{\Phi_c\} = \{\Phi\} + \{\Phi_p\} \quad 1.62$$

$$\boxed{\{\Phi\} - \{\Phi_p\} = \{\Phi_v\} + \{\Phi_d\}} \quad 1.63$$

Ley de estado de un miembro elasto plástico dañado

Considérese un miembro de longitud L, sección transversal A y modulo de elasticidad E sometido únicamente al esfuerzo generalizado axial N, se puede deducir a partir de la ley de estado de un elemento elasto-plástico degradable (Ec.1.7) que:

Licencia Creative Commons:

$$N = \frac{(1-D)}{F_{33}^0} (\delta - \delta_p) \quad 1.64$$

por otra parte

$$\delta - \delta_p = \delta_v - \delta_d$$

por lo tanto

$$N = \frac{(1-D)}{F_{33}^0} (NF_{33}^0 + \delta_d) \quad 1.65$$

Cuando existe efecto de flexión, es muy complejo deducir expresiones matemáticas sencillas como en el caso axial, en consecuencia se postula :

$$\{\Phi_d\} = [C(D)]\{M\} \quad 1.66$$

donde $[C(D)]$ representa la matriz diagonal cuyos términos no nulos son:

$$C_{11} = \frac{d_i F_{11}^0}{(1-d_i)} \quad C_{22} = \frac{d_j F_{22}^0}{(1-d_j)} \quad C_{33} = \frac{d_a F_{33}^0}{(1-d_a)} \quad 1.67$$

Reemplazando las expresiones anteriores en la ec. 1.63 se obtiene la ley de estado para un miembro elasto-plástico degradable :

$$\{\Phi\} - \{\Phi_p\} = \{\Phi_d\} + \{\Phi_v\}$$

donde:

$$\{\Phi_v\} = [F_0]\{M\} \text{ y } \{\Phi_d\} = [C(D)]\{M\}$$

por lo tanto:

$$\{\Phi\} - \{\Phi_p\} = [C(D) + [F_0]]\{M\} \quad 1.68$$

La relación entre los esfuerzos y las deformaciones para un miembro dañado es entonces:

$$\{\Phi\} - \{\Phi_p\} = [F(D)]\{M\} \quad 1.69$$

Licencia Creative Commons:

siendo :

$$[C(D) + [F_0]] = [F(D)] \quad 1.70$$

La expresión 1.70 representa la matriz de flexibilidad de un miembro degradado, de sección transversal A, inercia I, modulo de elasticidad E y longitud L. En el caso de pequeñas deformaciones se define como:

$$[F(D)] = \begin{bmatrix} \frac{L}{3EI(1-d_i)} & -\frac{L}{6EI} & 0 \\ -\frac{L}{6EI} & \frac{L}{3EI(1-d_i)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L}{EA(1-d_a)} \end{bmatrix} \quad 1.71$$

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

En la ley de estado del elemento elasto-plástico degradable, se han introducido dos conjuntos de variables internas adicionales, las deformaciones plásticas generalizadas y las deformaciones generalizadas debidas al daño, por lo tanto, se necesita dos nuevas ecuaciones para definir el modelo. Para el caso de las deformaciones plasticas generalizadas, se pueden obtener a partir del concepto de esfuerzo efectivo y la hipótesis de equivalencia de deformaciones. En el caso de las deformaciones debidas al daño, estas ecuaciones dependen del tipo de material estudiado y del tipo de sollicitación a que este sometido, las mismas son obtenidas a partir de resultados experimentales.

Función de fluencia de una rótula elastoplastica degradable

La función de fluencia para el caso de un elemento elastoplástico degradable posee la misma forma que la función de fluencia de los elementos elastoplásticos, con la diferencia que depende ahora del daño. La inclusión del daño se logra a partir de la hipótesis de equivalencia de deformaciones, la cual establece que cualquier ecuación constitutiva de un

material dañado se deriva de la misma forma que para un material intacto; pero sustituyendo el esfuerzo nominal por el esfuerzo efectivo, de aquí que el esfuerzo generalizado efectivo de un miembro del portico puede definirse como:

$$\bar{\mathbf{M}} = \left(\frac{\bar{\mathbf{M}}_i}{1 - d_i}, \frac{\bar{\mathbf{M}}_j}{1 - d_j}, \frac{\bar{\mathbf{N}}}{1 - d_n} \right) \quad 1.72$$

La función de fluencia de un elemento elastoplástico degradable se puede formular de la siguiente manera:

$$f_i = \left| \frac{\mathbf{M}_i}{1 - d_i} \right| - \mathbf{M}_y \quad f_j = \left| \frac{\mathbf{M}_j}{1 - d_j} \right| - \mathbf{M}_y \quad 1.73$$

donde \mathbf{M}_y representa el momento de fluencia de la sección.

Para la definición de la ley de comportamiento del elemento elasto-plástico degradable de acero, resta por definir la ley de evolución del daño y es el objetivo del próximo capítulo.

2. ANALISIS EXPERIMENTAL DE LOS MIEMBROS DE ACERO

Bajo la premisa de que el propósito de esta investigación es la determinación de la ley de comportamiento de elementos estructurales de acero sometidos a solicitaciones monotónicas y que para su definición completa restan por definir las ecuaciones que permitan determinar las deformaciones generalizadas debidas al daño, un modelo estructural simple fue fabricado y ensayado. El modelo permite estudiar la gran mayoría de modos de falla localizadas en las componentes de acero, como por ejemplo: la propagación de la grieta en elementos soldados, pandeo local, entre otros. Sin embargo un sólo parámetro de daño caracteriza este proceso sin importar cual de estos efectos predomine en la falla del elemento.

2.1 Modelo experimental.

El sistema mostrado en la fig. 15(b) fue construido para desarrollar el mecanismo de disipación de energía mostrado en la fig. 15(a).

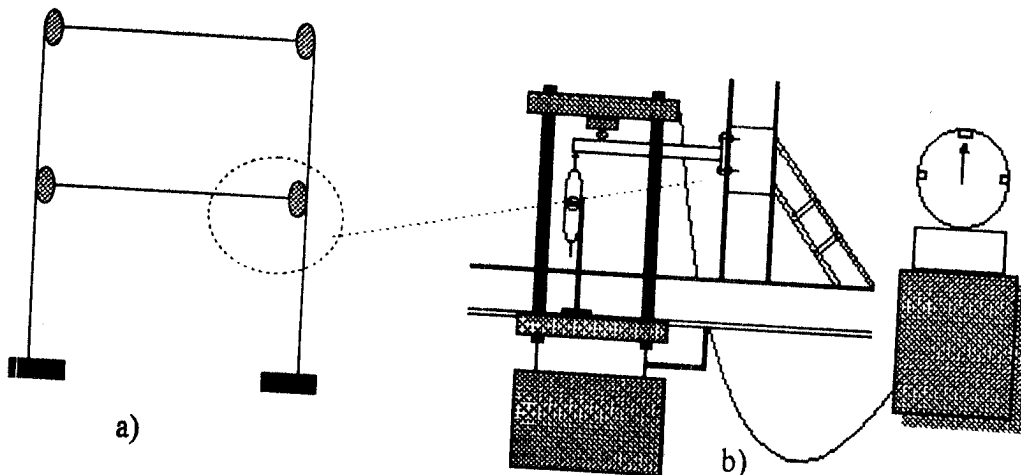


Fig. 15 (a) Mecanismo de disipación de energía, (b) Simulación experimental

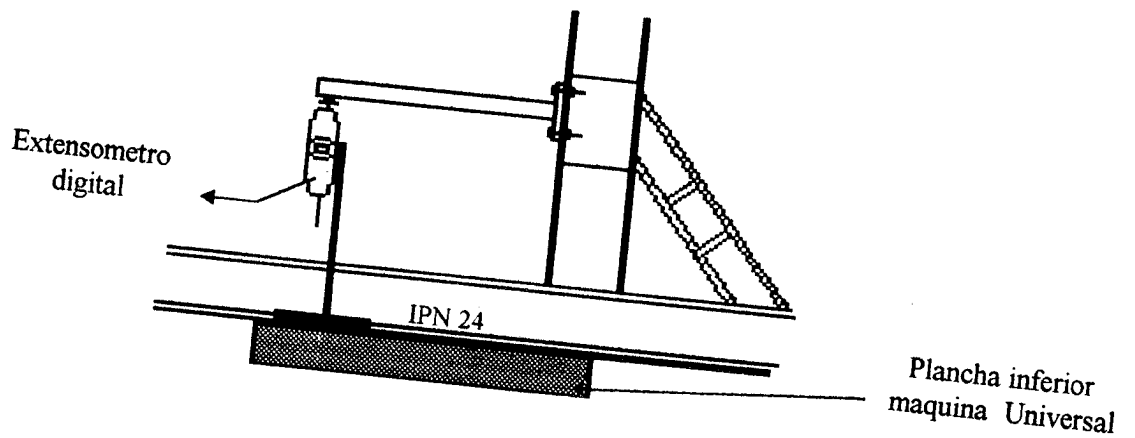


Fig. 16 Disposición de las probetas ensayadas

Se ensayaron probetas de diferentes secciones, dimensiones, espesores y longitudes. Las propiedades y características de los perfiles ensayados se describen en las tablas 1, 2 y 3.

Tabla 1 Propiedades de las probetas de sección circular:

PROBETA	DIAMETRO D (pulgadas)	DIMENSIONES mm		SECCION A cm ²	I cm ⁴	LONGITUD DE LA PROBETA cm
		D	e			
1	2"	50.8	2.25	3.49	10.13	66.5
2	3 1/2 "	88.9	2.25	6.12	57.7	66.5

Tabla 2 propiedades de las probetas de sección rectangular y cuadrada:

PROBETA	DIMENSIONES NOMINALES H x B mm	DIMENSIONES mm		SECCION A cm ²	I cm ⁴	LONGITUD DE LA PROBETA cm
		e	R			
3	60 x 60	2.00	2.00	4.54	25.1	80
4	60 x 60	2.00	2.00	4.54	25.1	66.5
5	100 x 100	3.00	3.00	11.4	177	70
6	100 x 40	2.25	2.25	5.97	25.1	70
7	60 x 60	2.00	2.00	4.54	25.1	50

Tabla 3 Propiedades de las probetas de sección abierta (perfiles I SIDOR):

PROBETA	IPN	DIMENSIONES mm				SECCION A cm ²	I cm ⁴	LONGITUD DE LA PROBETA cm
		h	b	d	t			
8	80	80	35	4.5	7.0	7.75	74.4	65.0

2.2 Diseño de las probetas

Cada probeta de soldó a una placa de acero de ½ x 8 x 8" ver fig. 17,

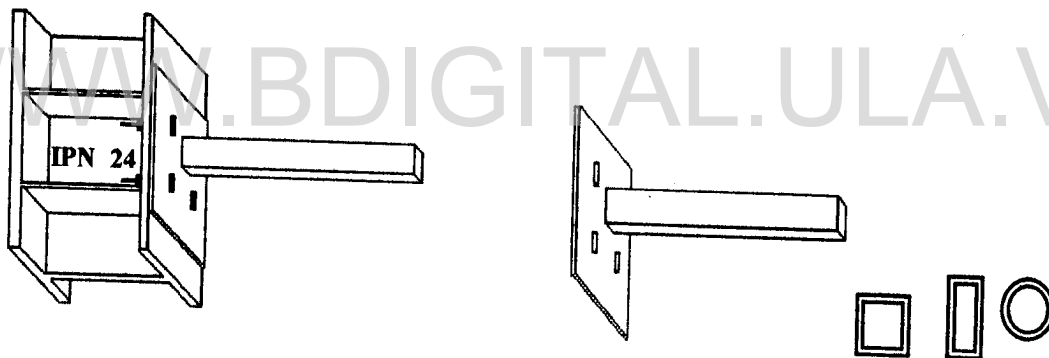


Fig. 17 Detalle de la conexión

la cual fue conectada a la columna por medio de pernos de alta resistencia (¾ x 5" G-5 NC). Este arreglo permitió reemplazar las probetas después de cada ensayo.

2.3 Equipos utilizados

Para la aplicación de la carga se utilizó, una máquina Universal de transmisión hidráulica, con una capacidad máxima de 200 toneladas y una precisión de 4 ton (en su escala menor), en ella se pueden realizar pruebas de tracción y de flexión. Tiene un

accionamiento que realiza una deformación regular a la muestra y un mecanismo que permite medir las fuerzas (indicadores), con la ayuda del cual se mide el esfuerzo de resistencia a la deformación creada en la probeta.

Para la medición de las deformaciones se utilizó un extensómetro digital de reloj, con un recorrido máximo de 4 pulg.(101.6mm) y una precisión de 1/100mm.

2.4 Historia de carga

La carga se aplicó como una carga puntual en el extremo de la probeta, para así generar el momento de flexión máximo en la unión. Cada probeta se sometió a ciclos de carga y descarga. Los ensayos se prolongaron hasta obtener la falla completa de la unión.

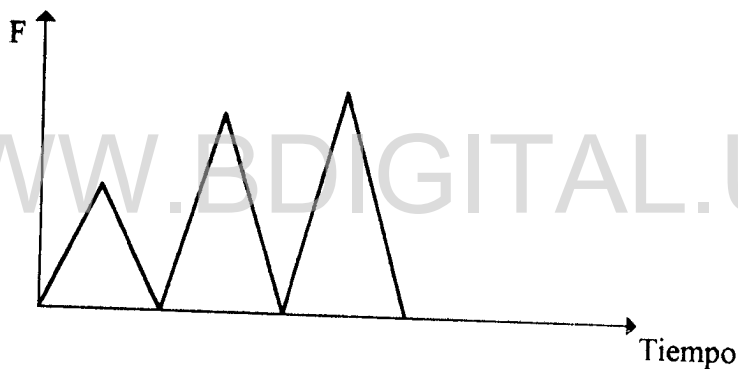


Fig.18 Historia de sollicitaciones.

2.5 Descripción de los ensayos

- **Sistema de aplicación de la carga**

La muestra fue colocada sobre la plancha de apoyo inferior de la máquina Universal y se deformó mediante un cuchillo de flexión, fijado en la agarradera de la plancha superior. Los ciclos de carga se lograron por medio del descenso y elevación de la plancha inferior.

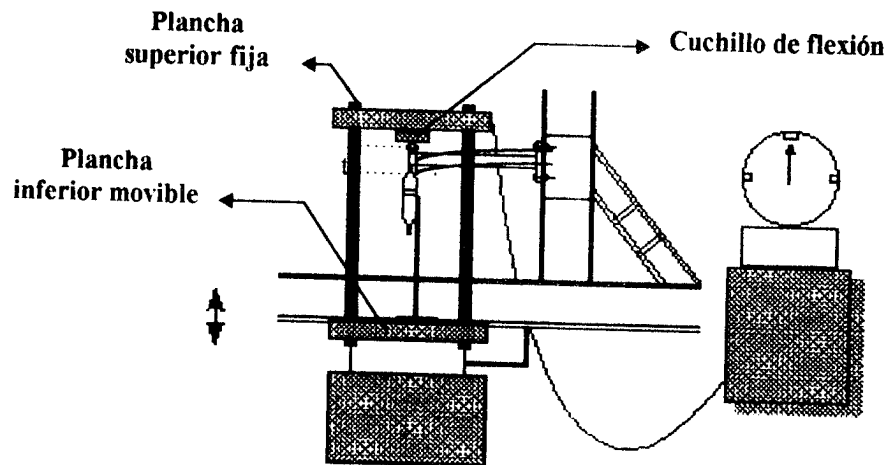


Fig. 19 Máquina Universal.

- **Sistema de medición de las deformaciones**

La deflexión de la viga se midió por medio del extensómetro digital de reloj, colocado en una barra de aluminio fijada a la plancha inferior de la máquina Universal y al extremo de la probeta. Los ciclos estudiados se realizaron de manera de controlar dicha deflexión.

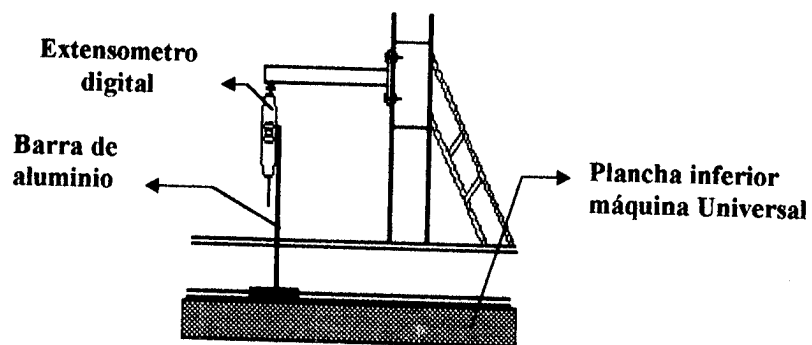


Fig. 20 Disposición del extensómetro.

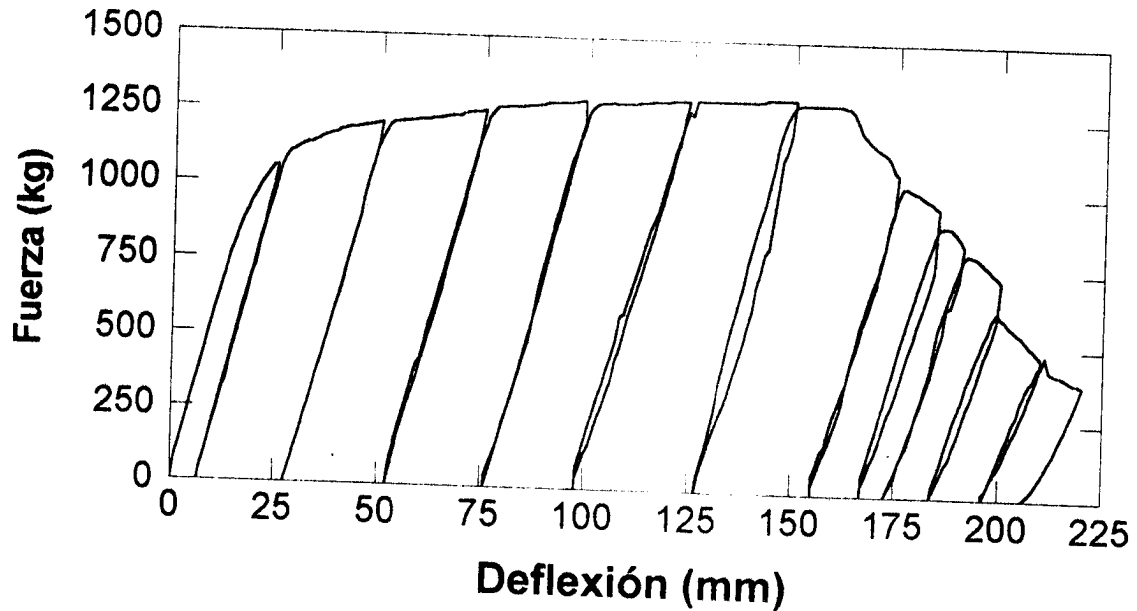
Se registró la fuerza de resistencia a la deformación creada por la probeta con sus respectivo desplazamiento.

2.6 Construcción de la curva fuerza vs. def. plástica

Una vez obtenidos los valores de carga y deformación, se construye las gráficas colocando como ordenada las fuerzas y como abscisas las deformaciones. Estas gráficas representa el resultado generalizado de la prueba (los ensayos se enumeraron de acuerdo al numero de la probeta).

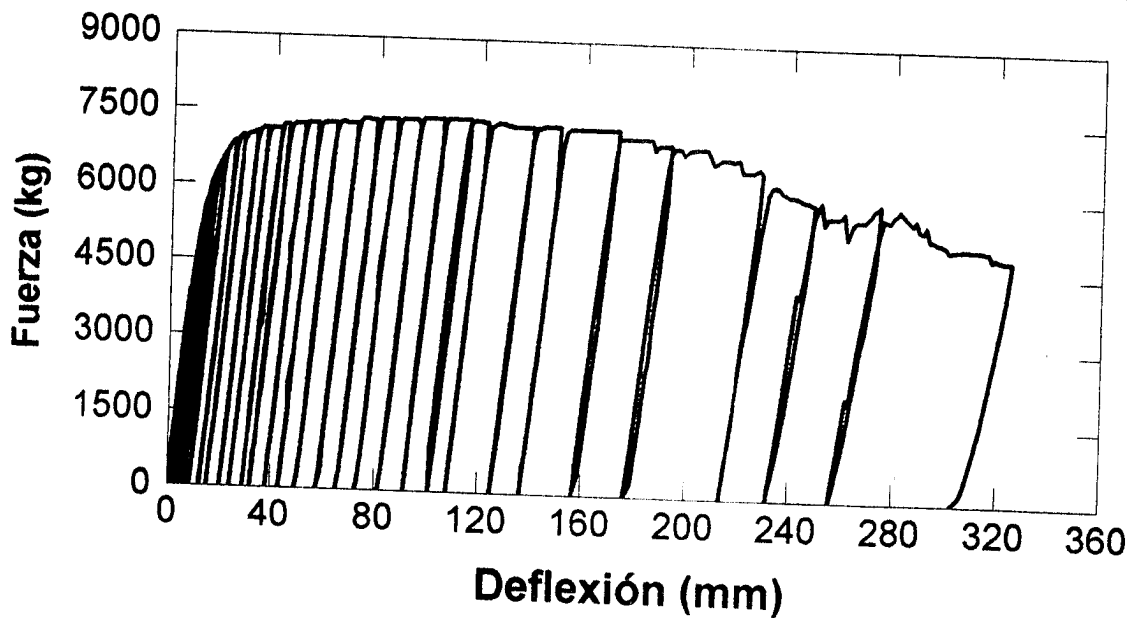
WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ENSAYO 1 Fuerza vs. Deflexión



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

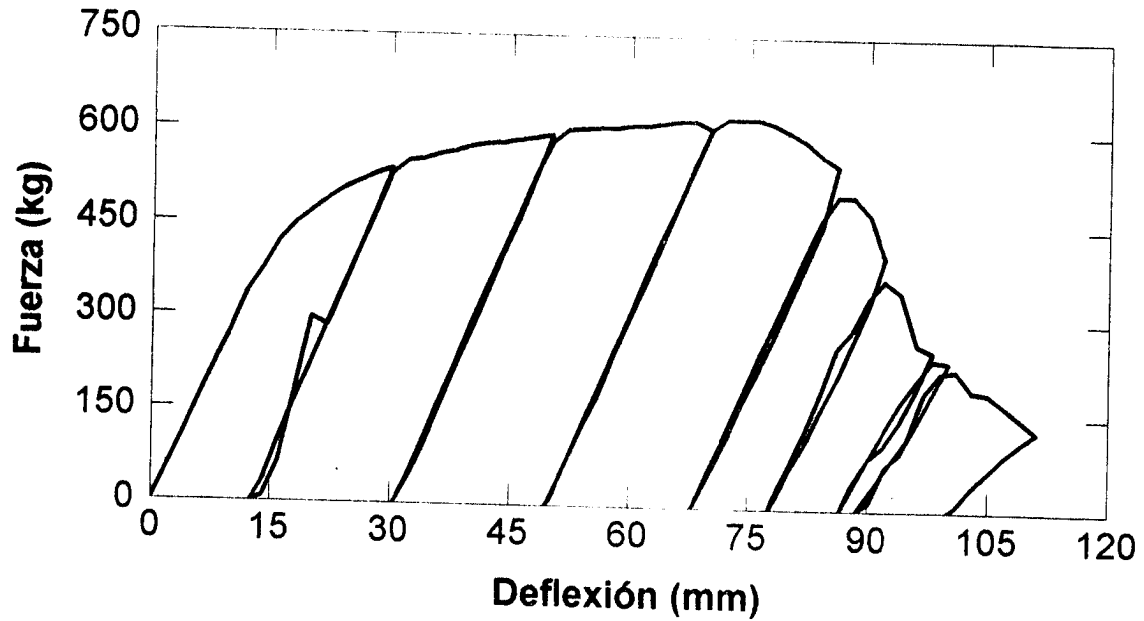
ENSAYO 2 Fuerza vs. Deflexión



Licencia Creative Commons:

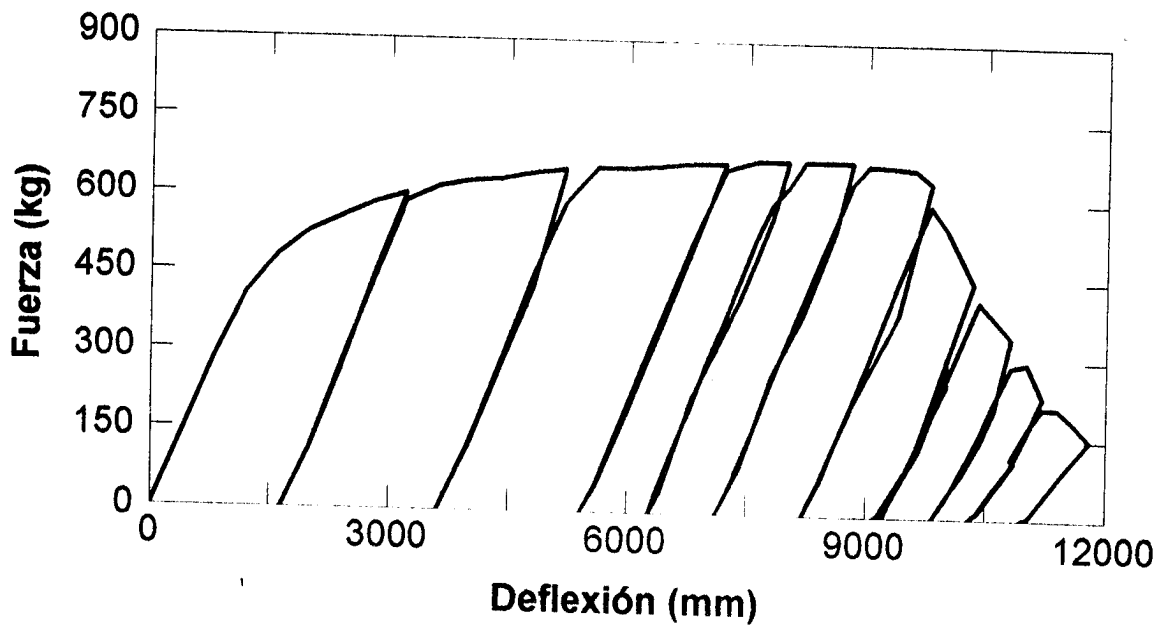
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ENSAYO 3 Fuerza vs. Deflexión



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

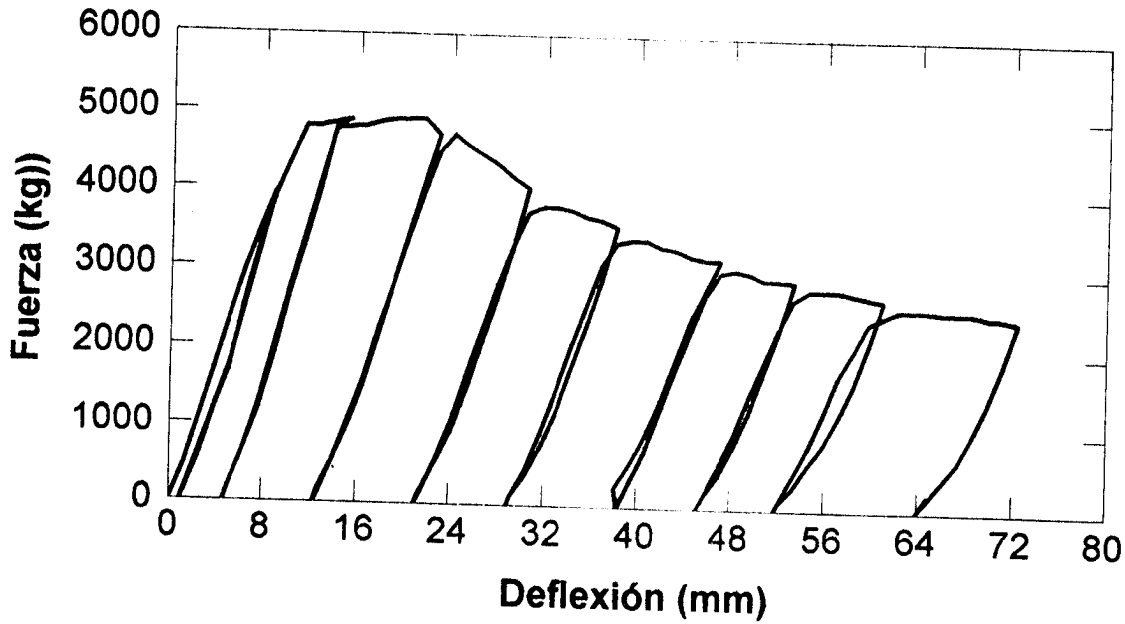
ENSAYO 4 Fuerza vs. Deflexión



Licencia Creative Commons:

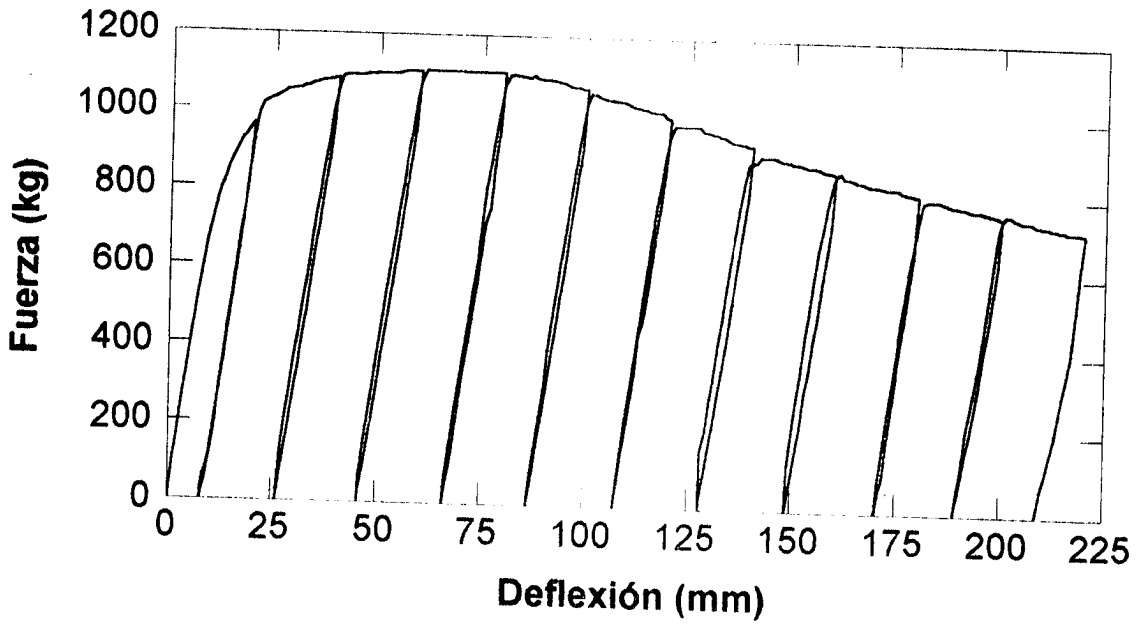
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ENSAYO 5 Fuerza vs. Deflexión

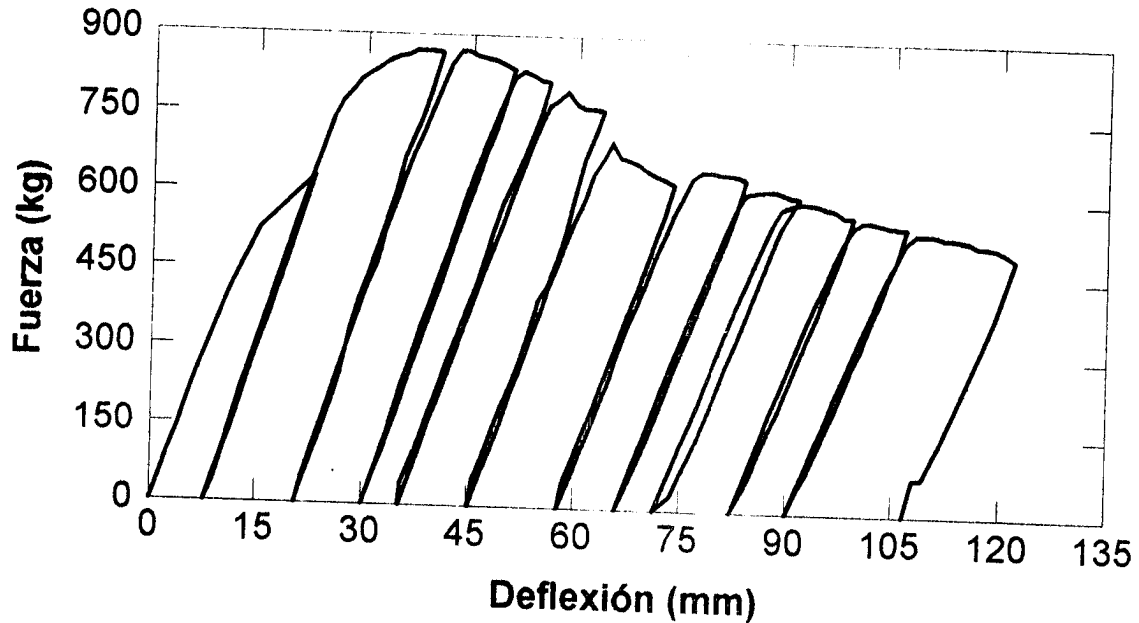


WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ENSAYO 6 Fuerza vs. Deflexión

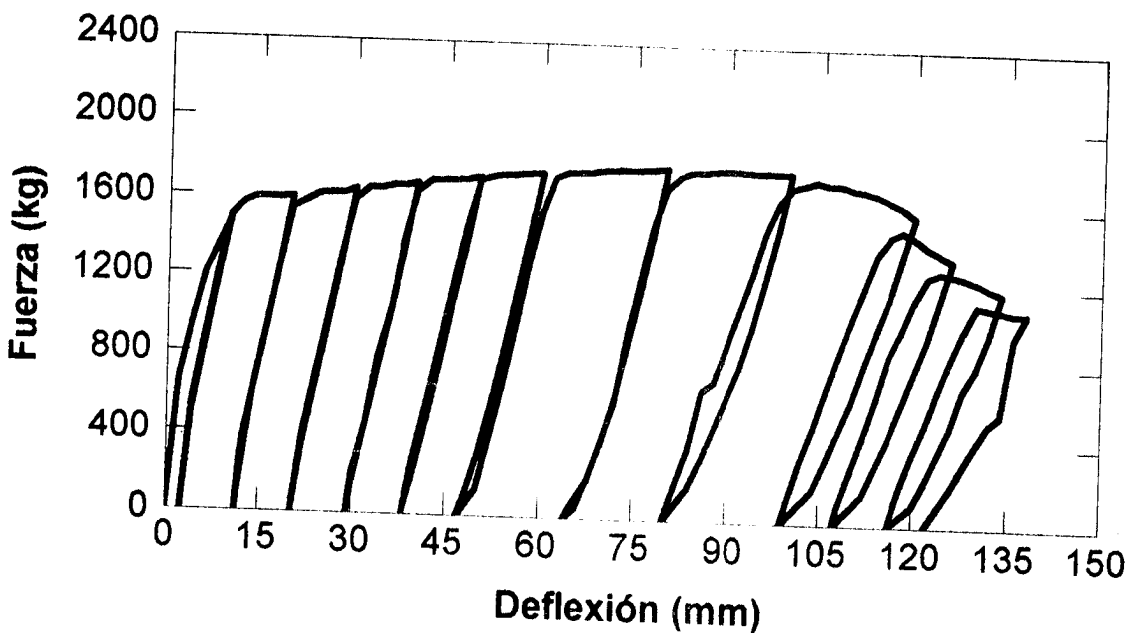


ENSAYO 7 Fuerza vs. Deflexión



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ENSAYO 8 Fuerza vs. Deflexión



Licencia Creative Commons:

Gráfico 4

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

2.7 Observaciones experimentales

A medida que se aumentó el número de ciclos de carga, en la probeta se desarrollaron los siguientes procesos:

1. Deformaciones plásticas.
2. Nacimiento de grietas, desarrollo gradual de algunas de estas y expansión predominante de una grieta principal. Simultáneamente se inicia y evoluciona el pandeo local en la sección.
3. Finalmente ocurre la rotura rápida y definitiva de la probeta.

El comportamiento experimental de la probeta se puede describir dividiendo la gráfica en tres partes:

1. Una zona elástica inicial donde se puede observar una relación de proporcionalidad entre las fuerzas y los desplazamientos. En ella no aparecen deformaciones permanentes.
2. Una zona de fluencia en la cual se observa un apreciable aumento de la deformación unitaria para un esfuerzo constante. En esta zona se inicia la aparición de deformaciones permanentes.
3. Por último, una zona de ablandamiento en donde ocurre un aumento de la deformación unitaria acompañada de la disminución del límite elástico y pérdida de rigidez, consecuencia del daño del material.

En la probeta de sección abierta mientras las cargas que actuaron en el plano del alma permanecieron por debajo de una cierta intensidad, la viga se deformó únicamente en ese plano, pero al aumentar la intensidad de las solicitaciones, la viga adoptó una configuración además de flexionada en su plano, flexionada lateralmente y torsionada. La determinación de la curva esfuerzo deformación es complicada debido a dificultades en la instrumentación, no fue posible digitalizar el fenómeno completo.

2.8 Gráfica Rigidez vs. Flecha plástica

Al reiterar la carga sobre la muestra plastificada disminuye su rigidez y su resistencia. Esta pérdida de rigidez y resistencia puede ser determinada a partir de las curvas esfuerzo deformación obtenidas en el laboratorio.

El cambio de rigidez se obtiene para cada ciclo, por medio del cálculo de la pendiente cada una de las descargas elásticas (Z_i) es decir:

$$Z_i = \frac{P_i}{(Y_i - Y_p)}$$

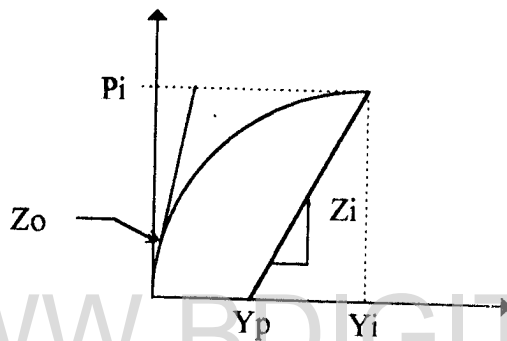
donde:

P_i = Representa la fuerza aplicada en la viga

Y_i = Representa la flecha correspondiente a la carga aplicada

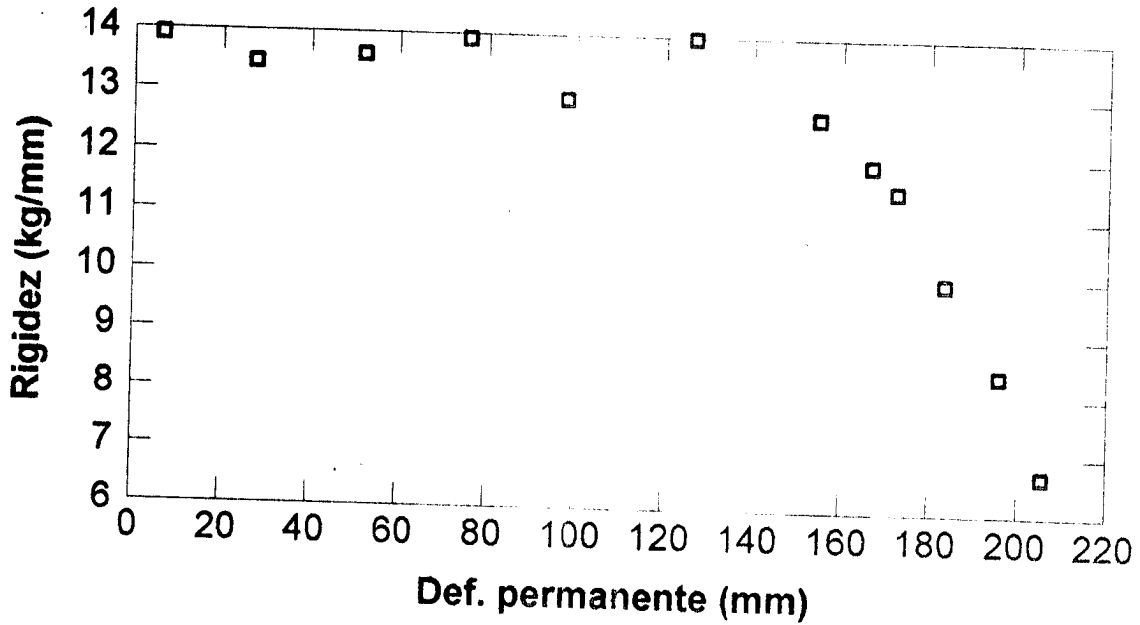
Y_p = Representa la flecha permanente de cada descarga

Z_o =Representa la rigidez inicial del elemento



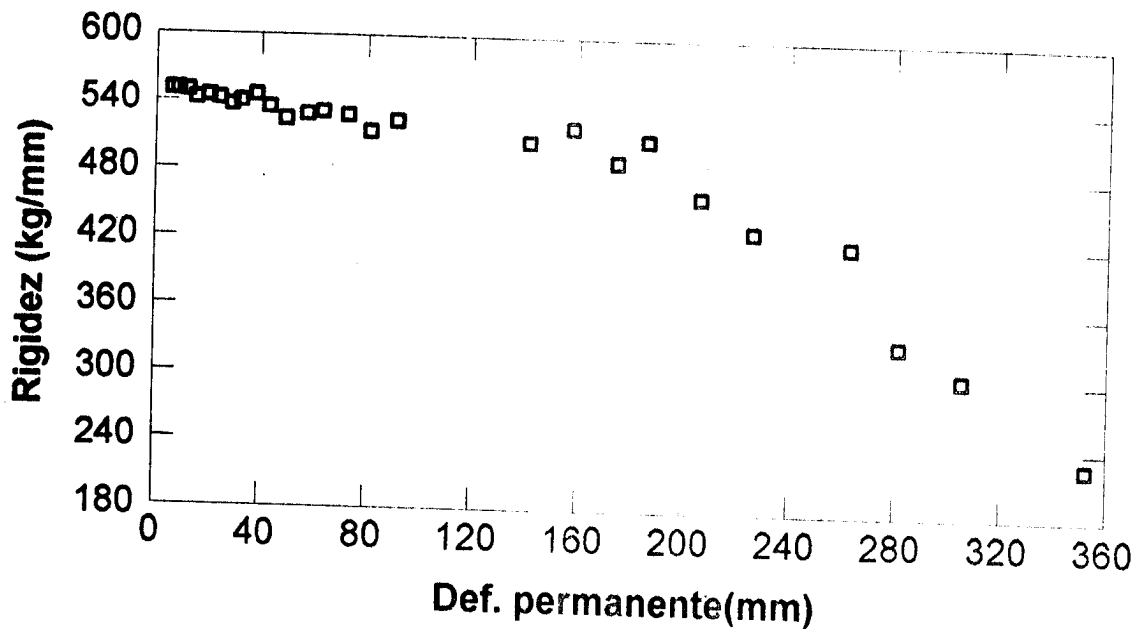
WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ENSAYO 1
Rigidez vs. Def. permanente



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

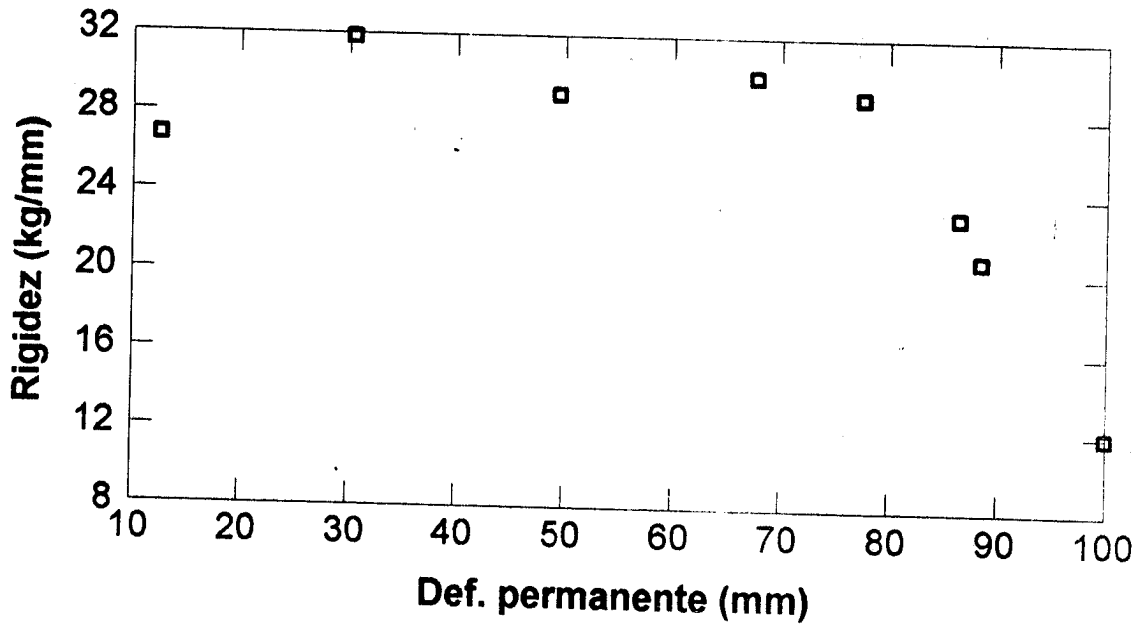
ENSAYO 2
Rigidez vs. Def. permanente



Licencia Creative Commons:

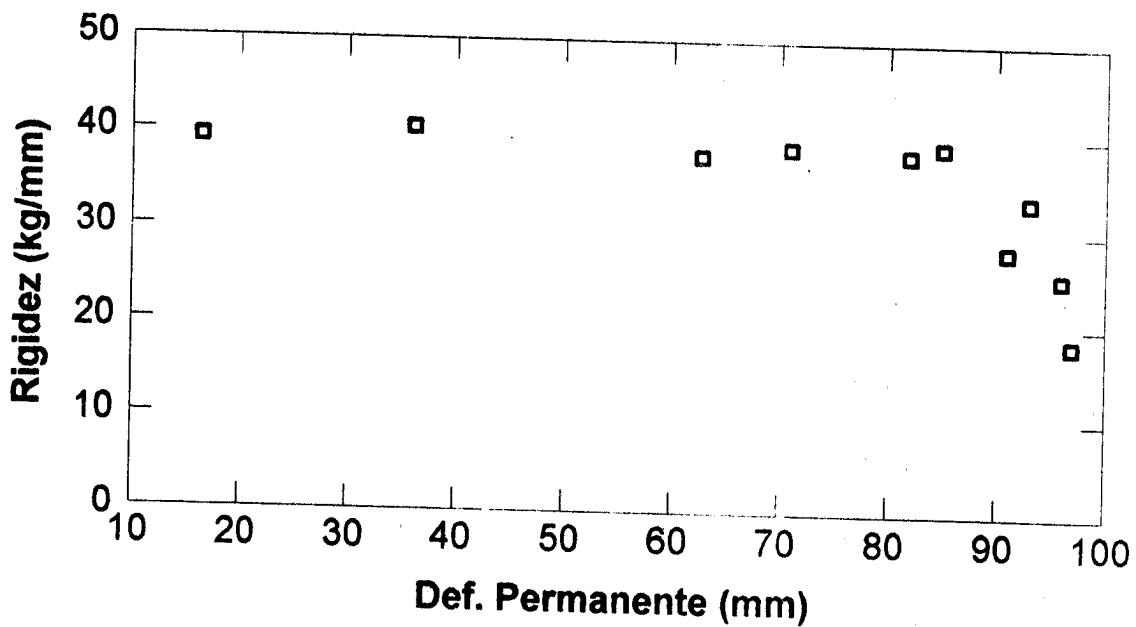
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ENSAYO 3 Rigidez vs. Def. permanente



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

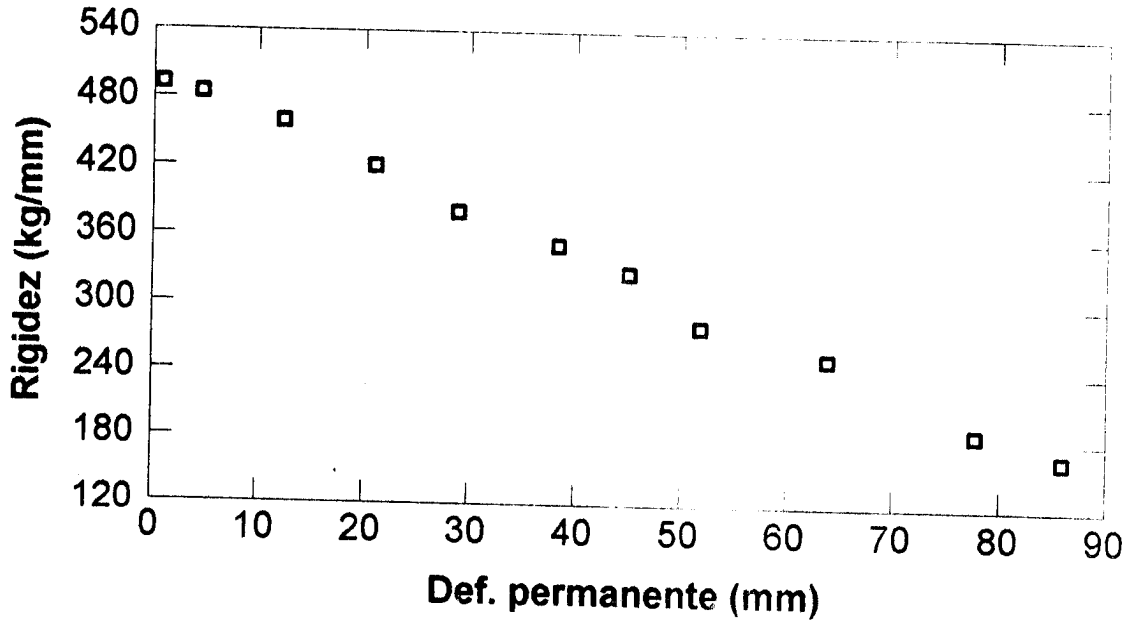
ENSAYO 4 Rigidez vs. Def. permanente



Licencia Creative Commons:

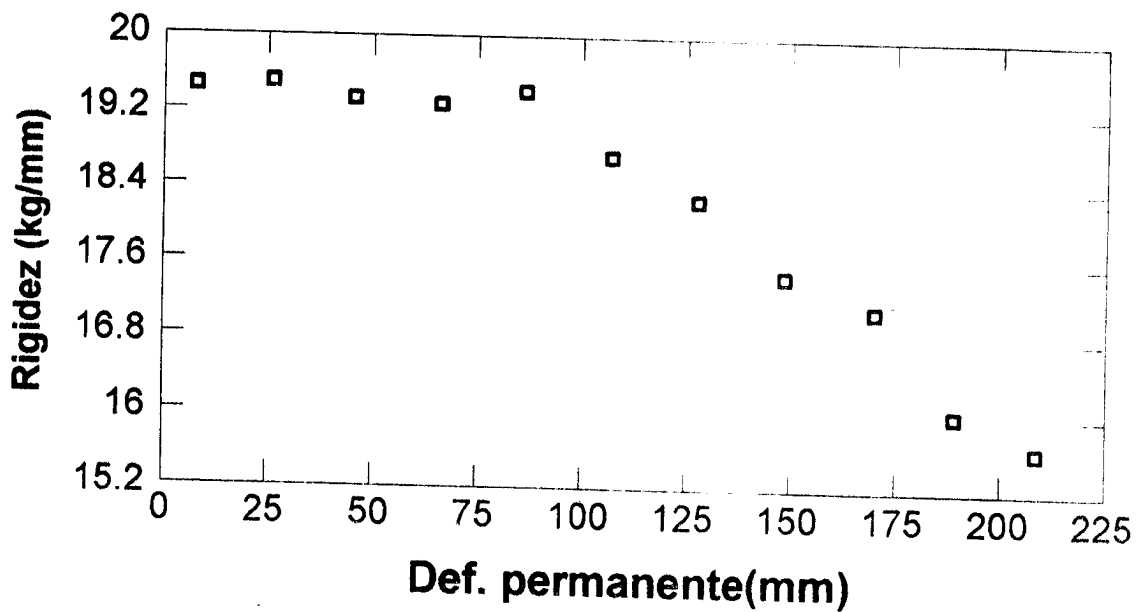
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ENSAYO 5 Rigidez vs. Def. permanente

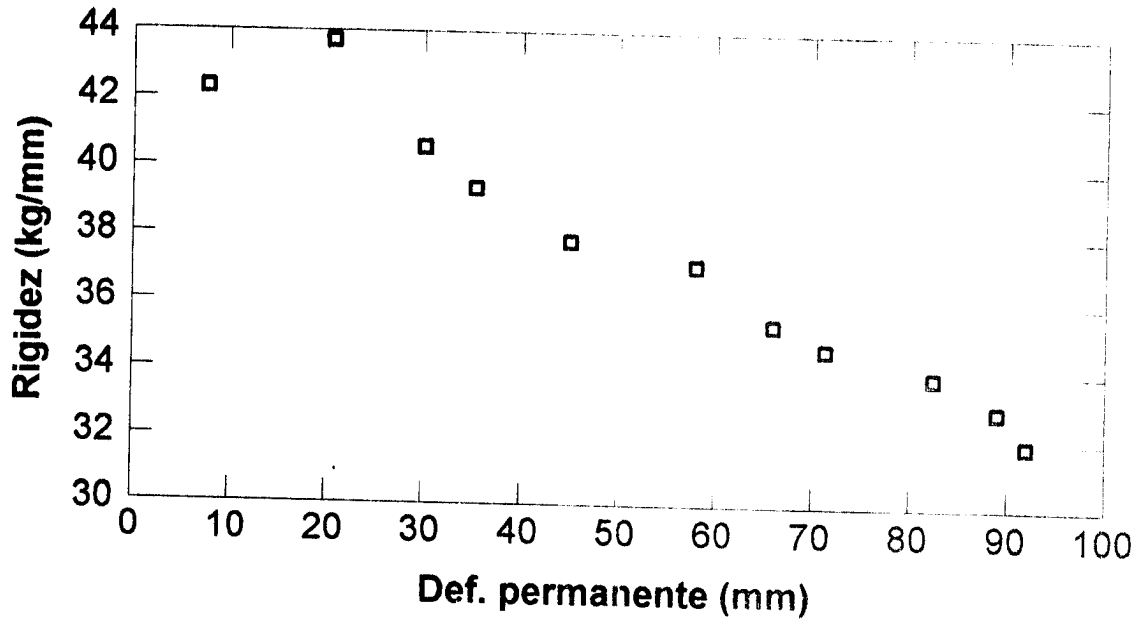


WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ENSAYO 6 Rigidez vs. Def. permanente

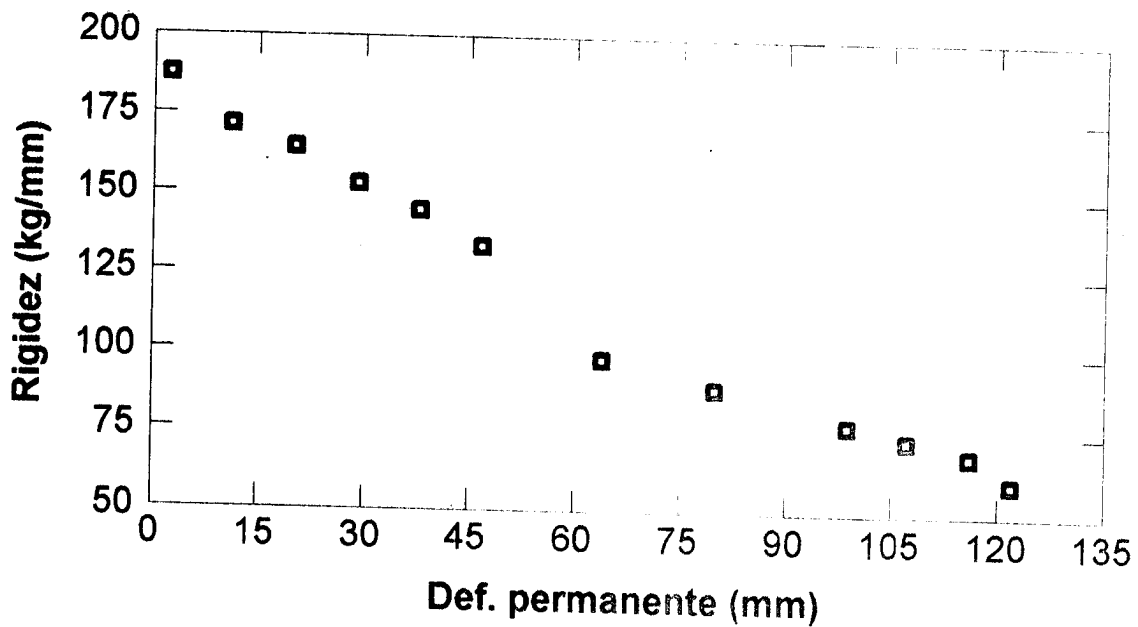


ENSAYO 7 Rigidez vs. Def. Permanente



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ENSAYO 8 Rigidez vs. Def. permanente



3. MODELO DE COMPORTAMIENTO

La identificación de la ley de evolución del daño, se hará en base al espécimen ensayado en el laboratorio, que representa una unión externa soldada, diseñada bajo el concepto de viga débil columna fuerte sometida a solicitaciones monotónicas. Este ensayo se puede representar a través del modelo de inelasticidad concentrada que se muestra en la figura:

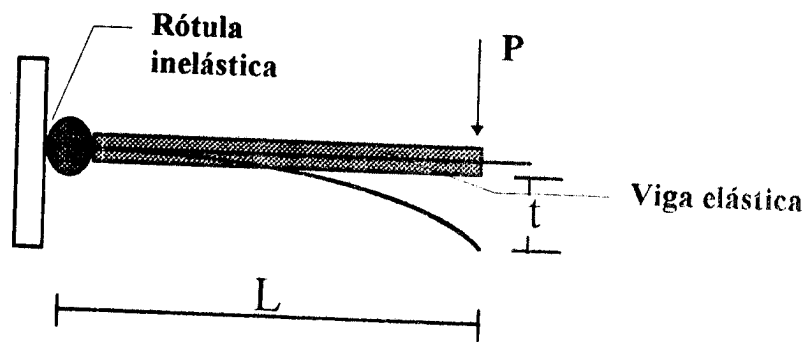


Fig.21 Modelo experimental

El modelo de la probeta está representado por una viga elástica con un resorte degradable en la unión. En el extremo derecho el momento flector es cero, por lo tanto se supondrá que en este extremo, no hay deformaciones plásticas ni daño. Por otra parte, se supondrá despreciable la fuerza axial.

Por lo tanto, las condiciones de borde del elemento son:

$$N = 0 \quad da = 0$$

$$M_i = PL \quad d_i \neq 0 \quad \Phi_i = \frac{t}{L} \quad \Phi_i^P = \frac{t^P}{L}$$

$$M_j = 0 \quad d_j = 0$$

Sustituyendo en la ley de estado de un elemento elasto-plástico degradable (ec.1.69) se tiene:

$$\{\Phi - \Phi_p\} = [F(D)]\{M\}$$

$$\begin{Bmatrix} \Phi_i - \Phi_i^p \\ \Phi_j - \Phi_j^p \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L}{3EI(1-d_i)} & -\frac{L}{6EI} \\ -\frac{L}{6EI} & \frac{L}{3EI(1-d_j)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M_i \\ M_j \end{Bmatrix}$$

Resolviendo:

$$\Phi_i - \Phi_i^p = \frac{L}{3EI(1-d_i)} M_i - \frac{L}{6EI} M_j$$

$$\Phi_j - \Phi_j^p = -\frac{L}{6EI} M_i + \frac{L}{3EI(1-d_j)} M_j$$

$$\left(\frac{t}{L} - \frac{t^p}{L}\right) = \frac{L}{3EI(1-d_i)} PL$$

$$\Rightarrow P = (1-d_i) \frac{3EI}{L^3} (t - t^p)$$

$$P = Z_d (t - t^p)$$

donde: $Z_d = (1-d_i)Z_0$ y $Z_0 = \frac{3EI}{L}$ 1.74

1.75

Z_d representa el cambio de rigidez del elemento y es obtenida a partir de los ensayos de laboratorio y. Z_0 representa la rigidez inicial del elemento:

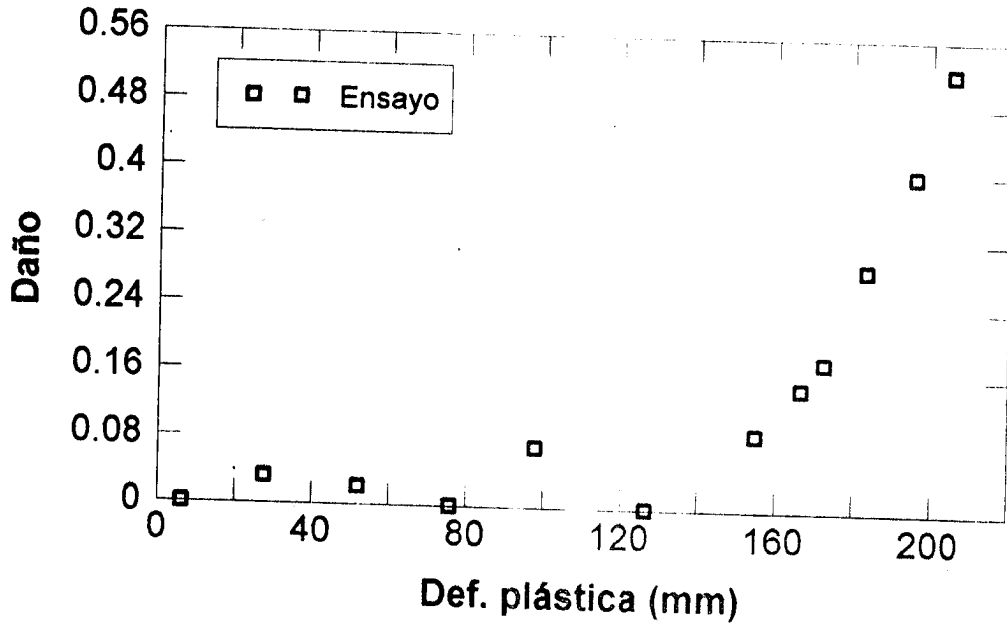
Por lo tanto, el daño del elemento queda definido como:

$$d = 1 - \frac{Z_d}{Z_0} \quad 1.76$$

Esta expresión permite obtener experimentalmente el valor del daño de una rótula inelástica

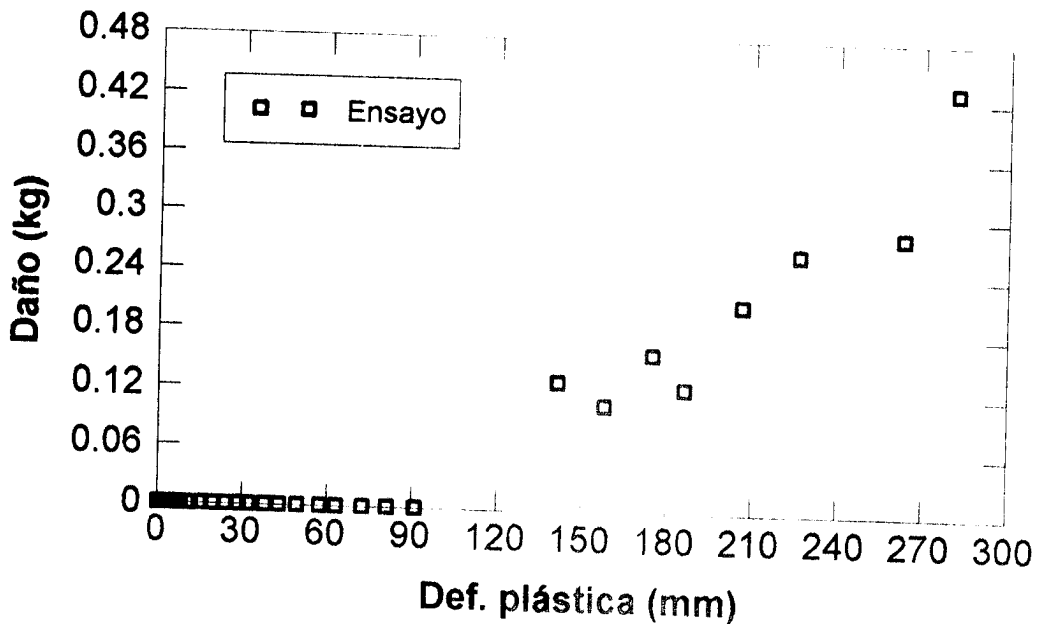
Graficando el daño vs. la def. plástica tenemos:

ENSAYO 1 Daño vs. Def. plásticas



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

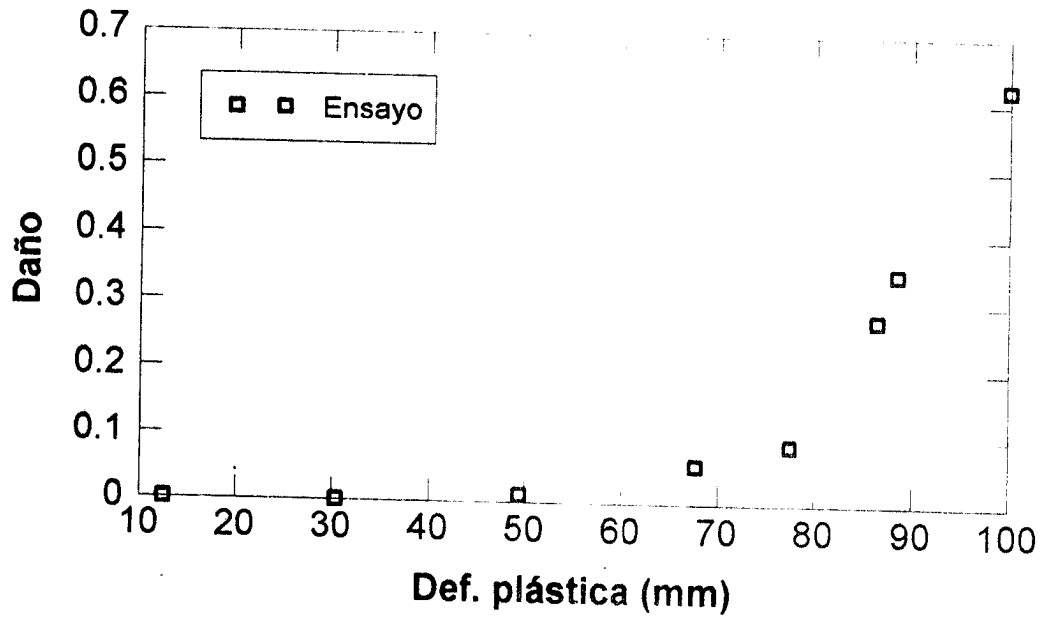
ENSAYO 2 Daño vs. Def. plástica



Licencia Creative Commons:

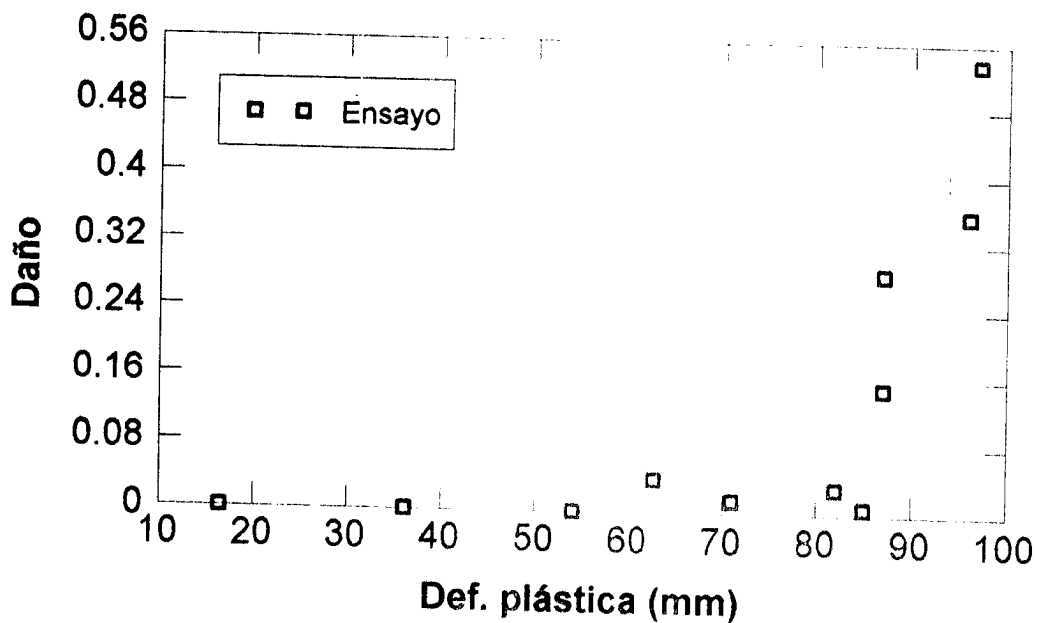
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ENSAYO 3 Daño vs. Def. plástica



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

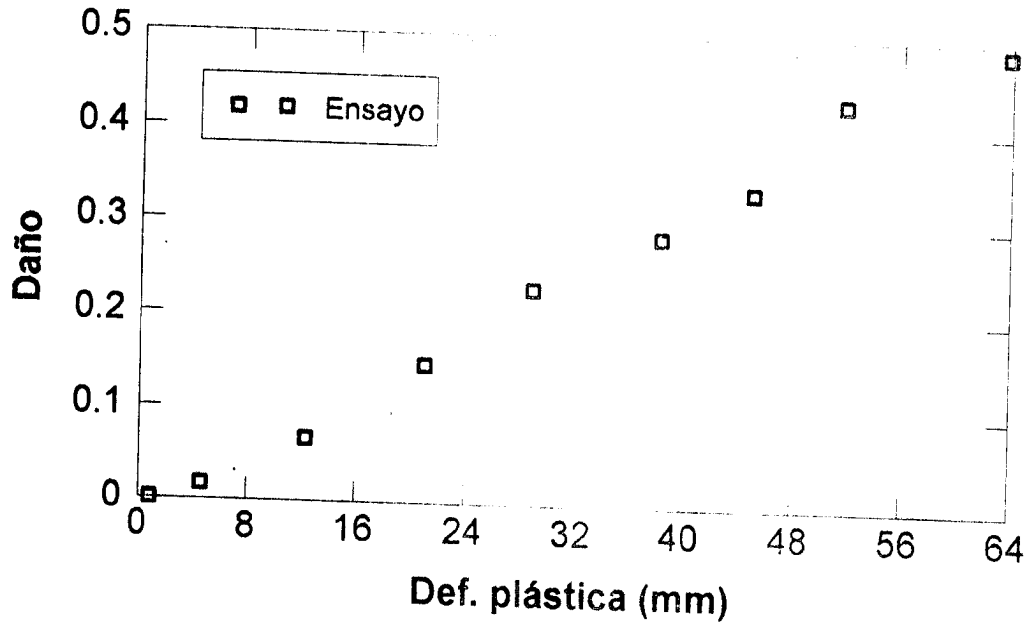
ENSAYO 4 Daño vs. Def. plástica



Licencia Creative Commons:

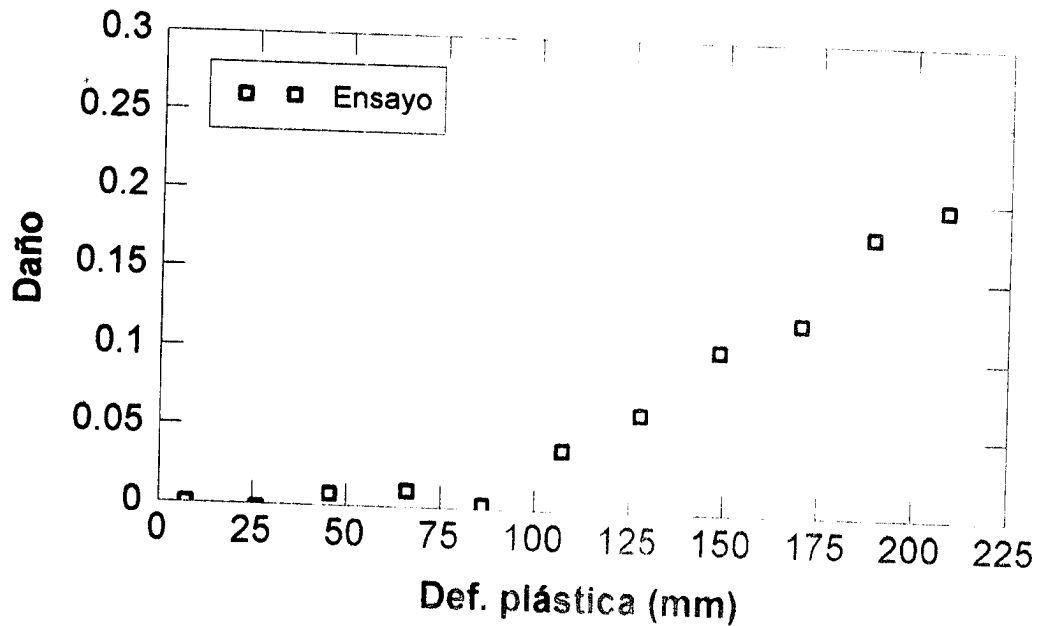
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ENSAYO 5 Daño vs. Def. plástica



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ENSAYO 6 Daño vs. Def. plástica

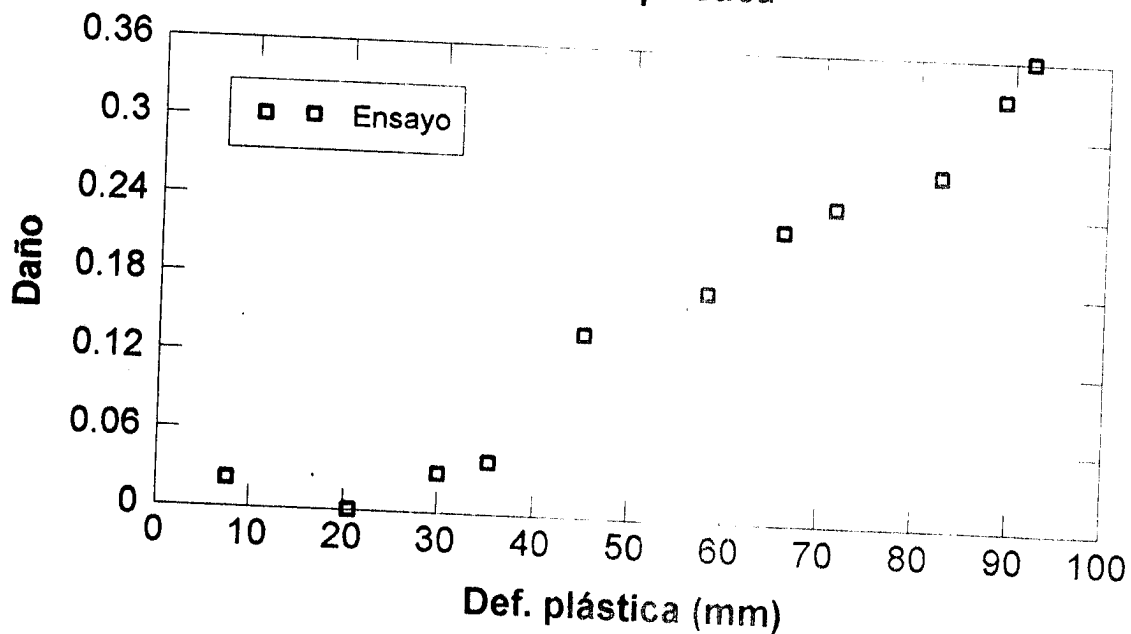


Licencia Creative Commons:

Gráfico F1

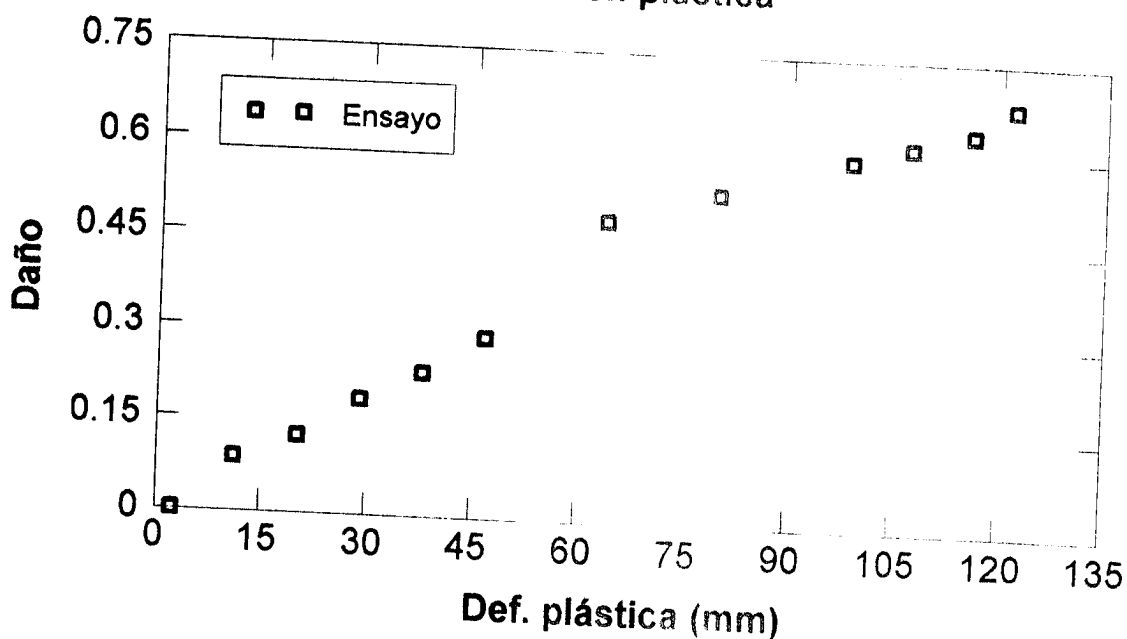
Atribución.- No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

ENSAYO 7 Daño vs. Def. plástica



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ENSAYO 8 Daño vs. Def. plástica



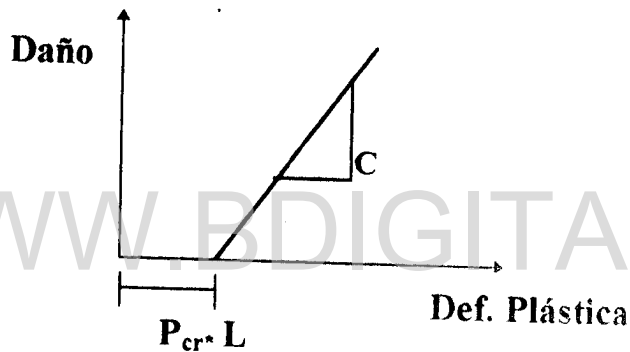
Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

En base a estos resultados (gráficos 9,10,11,12), se propone evaluar el daño dependiente exclusivamente de las deformaciones plásticas acumuladas, esto permite formular su ley de evolución, de la misma forma que la fórmula Lemaitre en su modelo de daño dúctil para metales, es decir:

	Rótula inelástica i	Rótula inelástica j
• Ley de evolución del daño ec. 1.77	$d_i = c < p_i - p_{cr} >$	$d_j = c < p_j - p_{cr} >$

donde:



p_{cr} y c son constantes que dependerán de las propiedades del elemento.

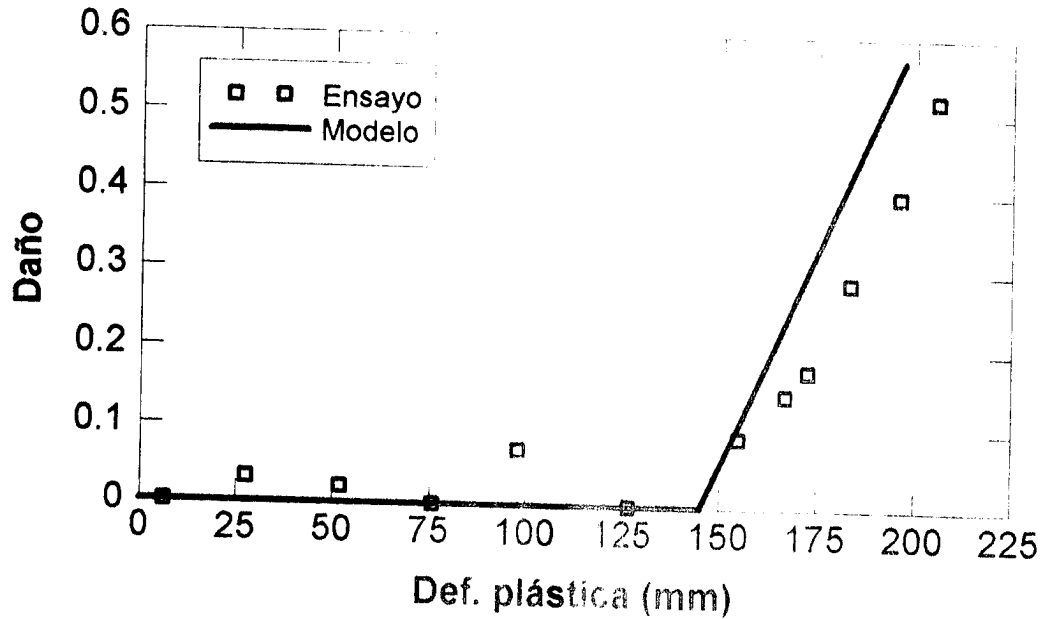
p_i y p_j representan rotaciones plásticas generalizadas acumuladas de las rótulas, es decir:

$$dp_i = |d\Phi_i^p|$$

$$dp_j = |d\Phi_j^p|$$

Comparando la ley de evolución del daño propuesta con los resultados experimentales se tiene:

ENSAYO 1 Daño vs. Def. plásticas



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ENSAYO 2 Daño vs. Def. plástica

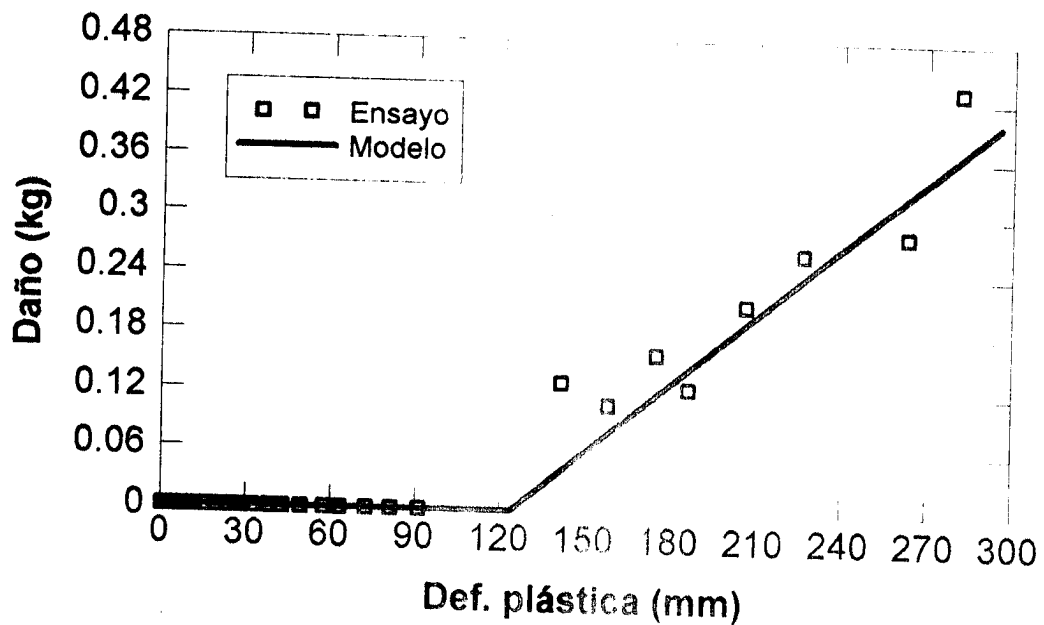
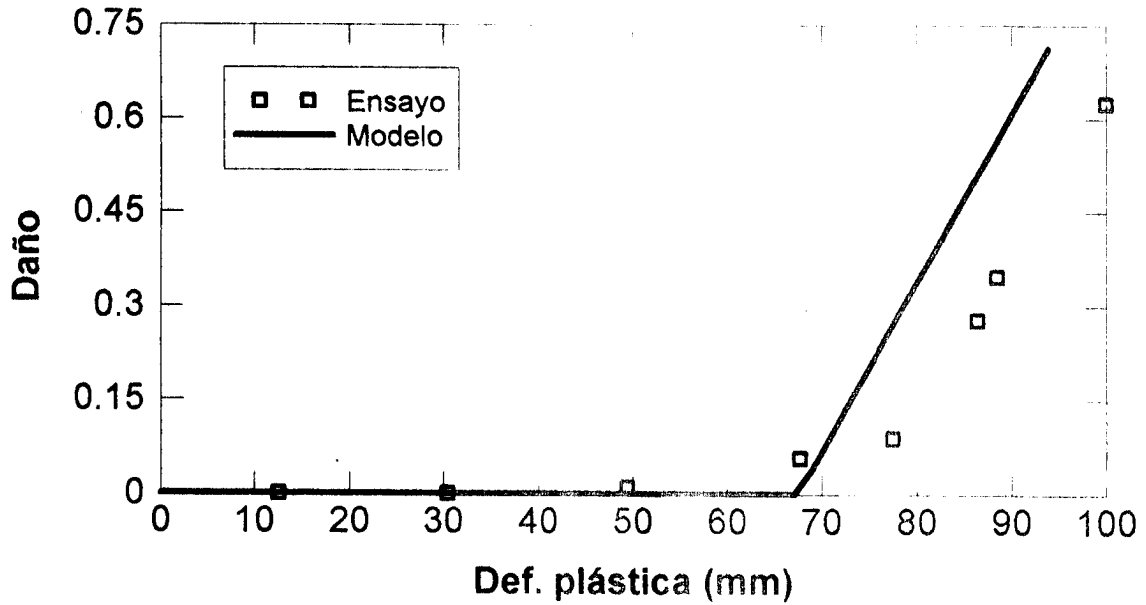


Gráfico 13

ENSAYO 3 Daño vs. Def. plástica



ENSAYO 4 Daño vs. Def. plástica

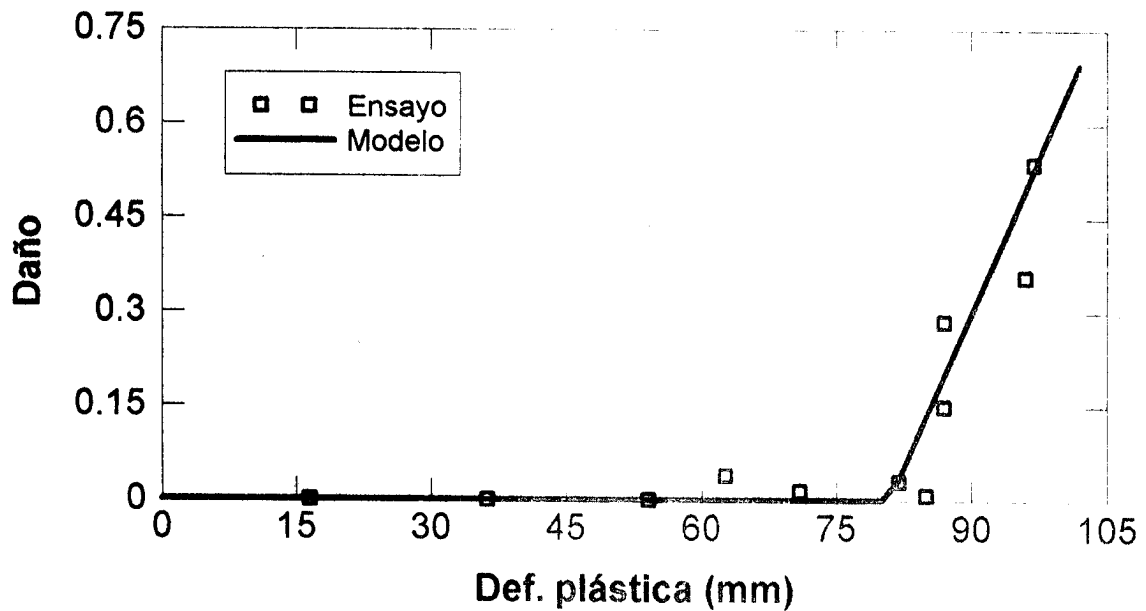
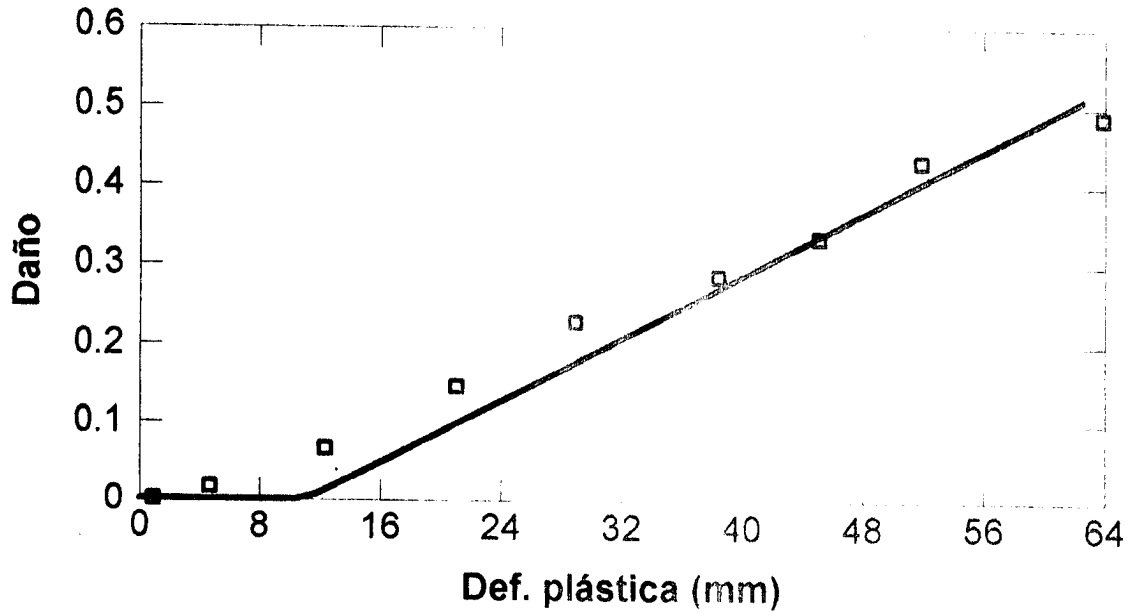


Gráfico 14

ENSAYO 5 Daño vs. Def. plástica



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ENSAYO 6 Daño vs. Def. plástica

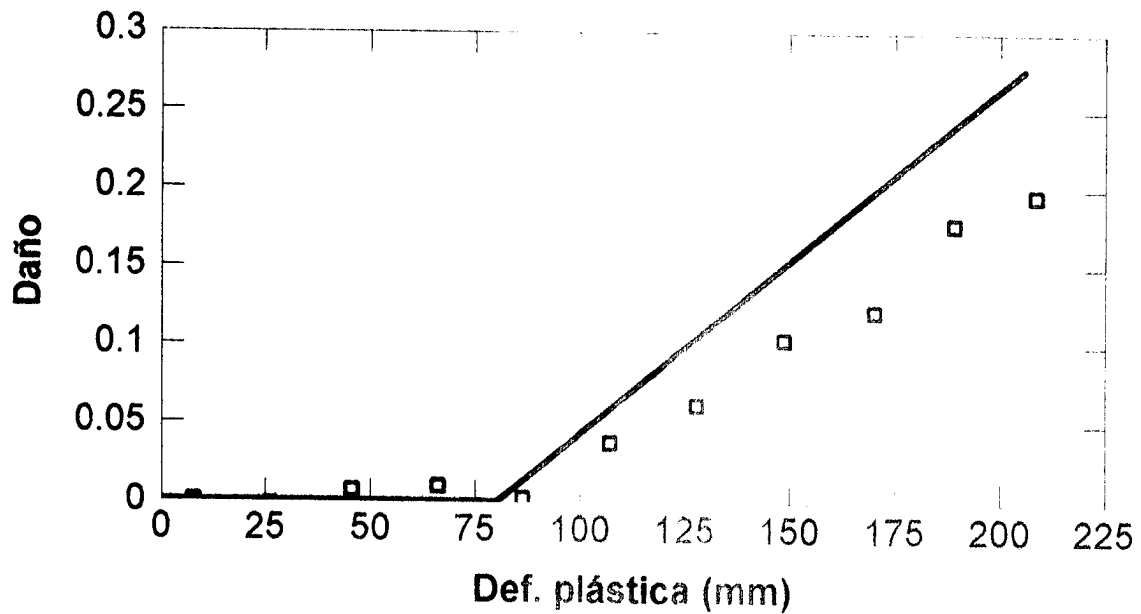
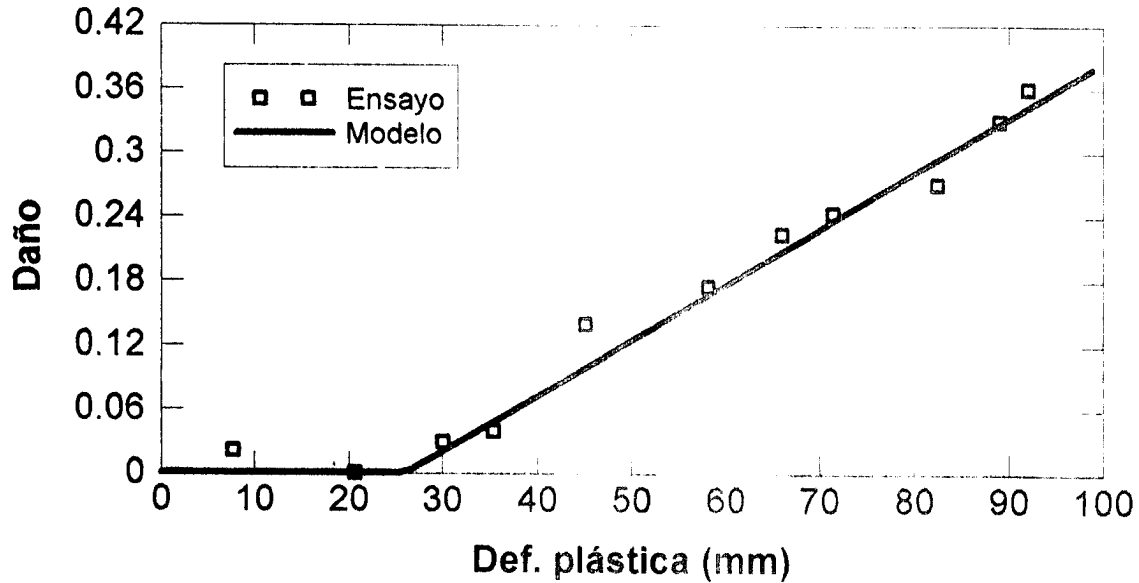


Gráfico 15

ENSAYO 7

Daño vs. Def. plástica



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ENSAYO 8

Para evaluar el daño en perfiles de sección abierta , se requiere digitalizar todos los efectos que se producen en ellos cuando se someten a sobrecargas excesivas.

Las simulaciones se lograron con los siguientes parámetros:

Ensayo	1	2	3	4	5	6	7
c	0.011	0.0022	0.024	0.03	0.05	0.0022	0.0052
P _{Cr}	145	130	67	81	11	80	26

Gráfico 16

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

La ley de evolución de daño propuesta y los resultados experimentales muestran una buena correlación (gráficos 13,14,15,16). Esto permite concluir que efectivamente la ley de evolución de daño propuesta por Lemaitre en su modelo daño dúctil para metales, puede adaptarse a la teoría de pórticos.

En resumen, la ley de comportamiento de los elementos de acero sometidos a solicitaciones monotónicas queda definido por las siguientes expresiones:

- Ley de estado de un elemento elastoplástico degradable ec. 1.69:

$$\{M\} = [S(D)]\{\Phi - \Phi^P\}$$

	Rótula inelástica i	Rótula inelástica j
<ul style="list-style-type: none"> • Función de fluencia ec.1.73 	$f_i = \left \frac{M_i}{1 - d_i} \right - M_y$	$f_j = \left \frac{M_j}{1 - d_j} \right - M_y$
<ul style="list-style-type: none"> • Ley de evolución de las articulaciones plásticas ec. 1.57 	$\begin{cases} d\Phi_i^P = 0 & \text{si } f_i < 0 \text{ o } df_i < 0 \\ d\Phi_i^P \neq 0 & \text{si } f_i = 0 \text{ y } df_i = 0 \end{cases}$	$\begin{cases} d\Phi_j^P = 0 & \text{si } f_j < 0 \text{ o } df_j < 0 \\ d\Phi_j^P \neq 0 & \text{si } f_j = 0 \text{ y } df_j = 0 \end{cases}$
<ul style="list-style-type: none"> • Ley de evolución del daño ec. 1.77 	$d_i = c < p_i - p_{cr} >$	$d_j = c < p_j - p_{cr} >$

donde:

M_y , p_{cr} y c son parámetros constantes del elemento y dependerán de las propiedades del material.

p_i y p_j representan las rotaciones plásticas generalizadas acumuladas:

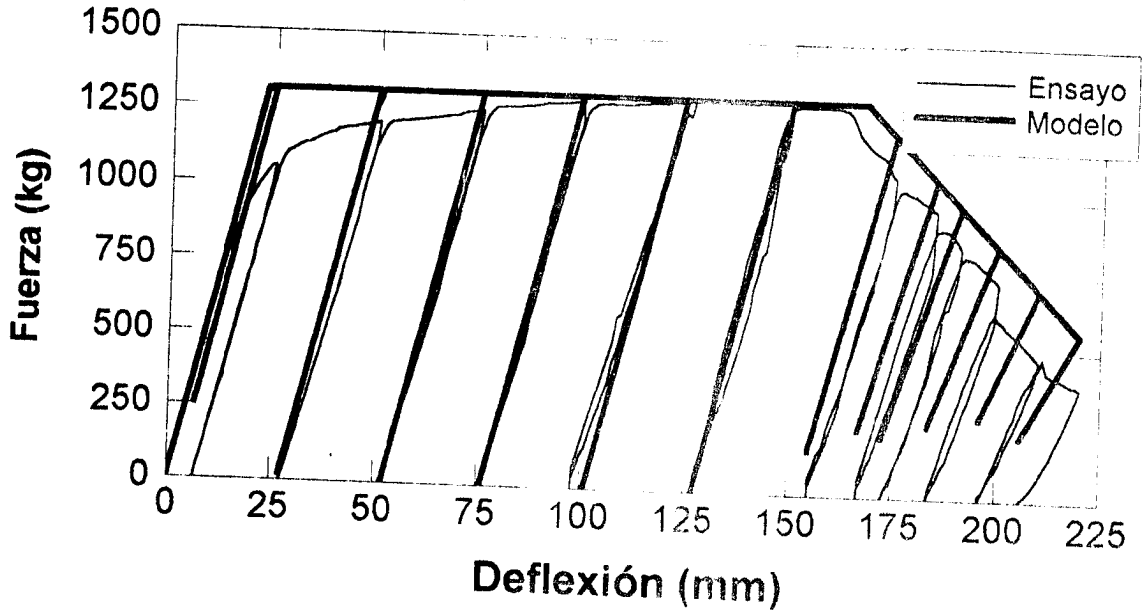
$$dp_i = |d\Phi_i^P|$$

$$dp_j = |d\Phi_j^P|$$

Comparando el modelo propuesto con los resultados experimentales tenemos:

Licencia Creative Commons:

ENSAYO 1 Fuerza vs. Deflexión



ENSAYO 2 Fuerza vs. Deflexión

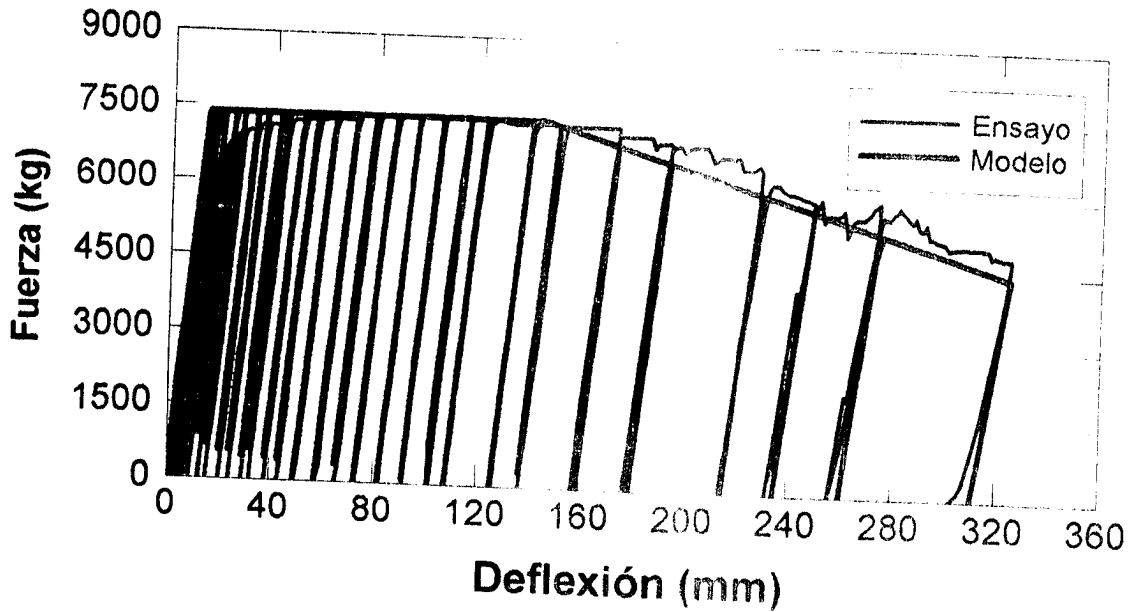
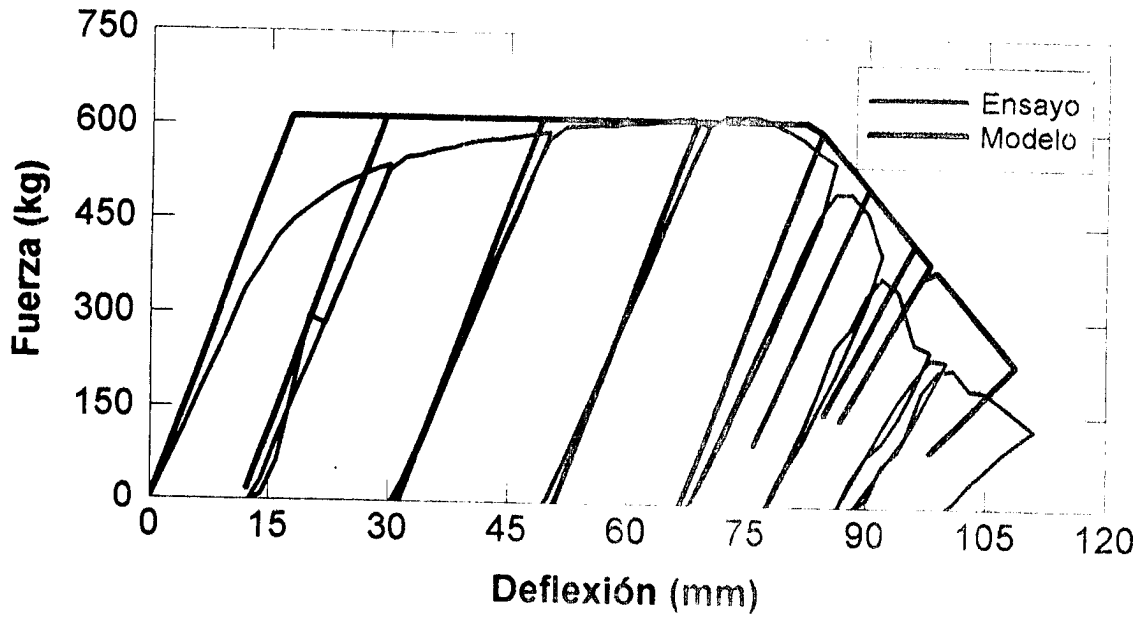


Gráfico 17

ENSAYO 3 Fuerza vs. Deflexión



ENSAYO 4 Fuerza vs. Deflexión

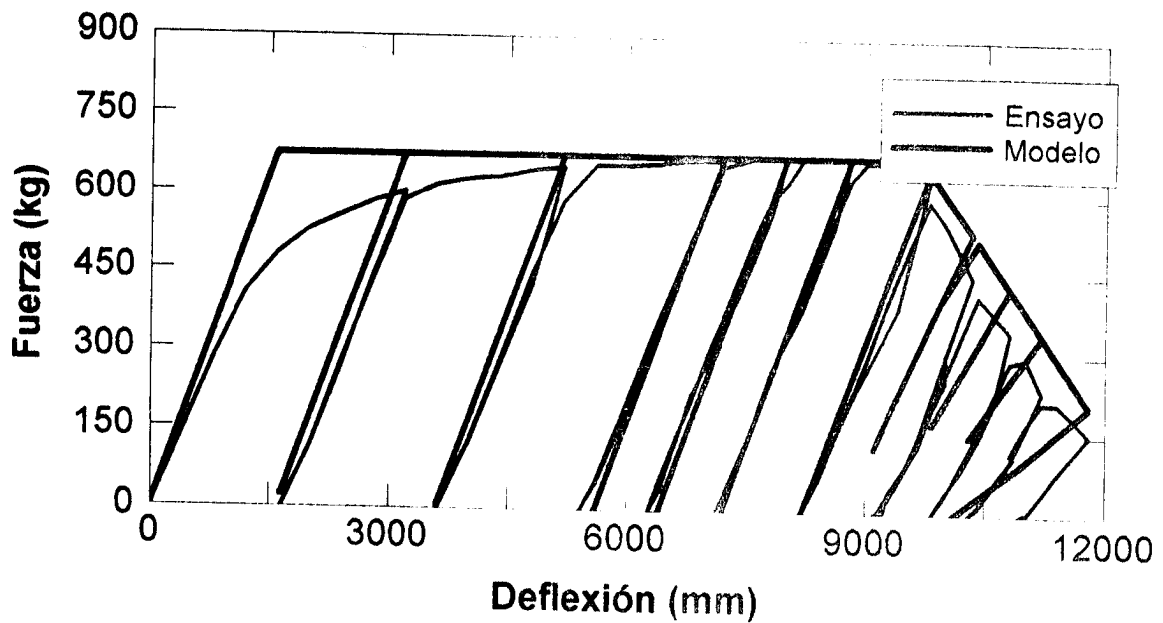
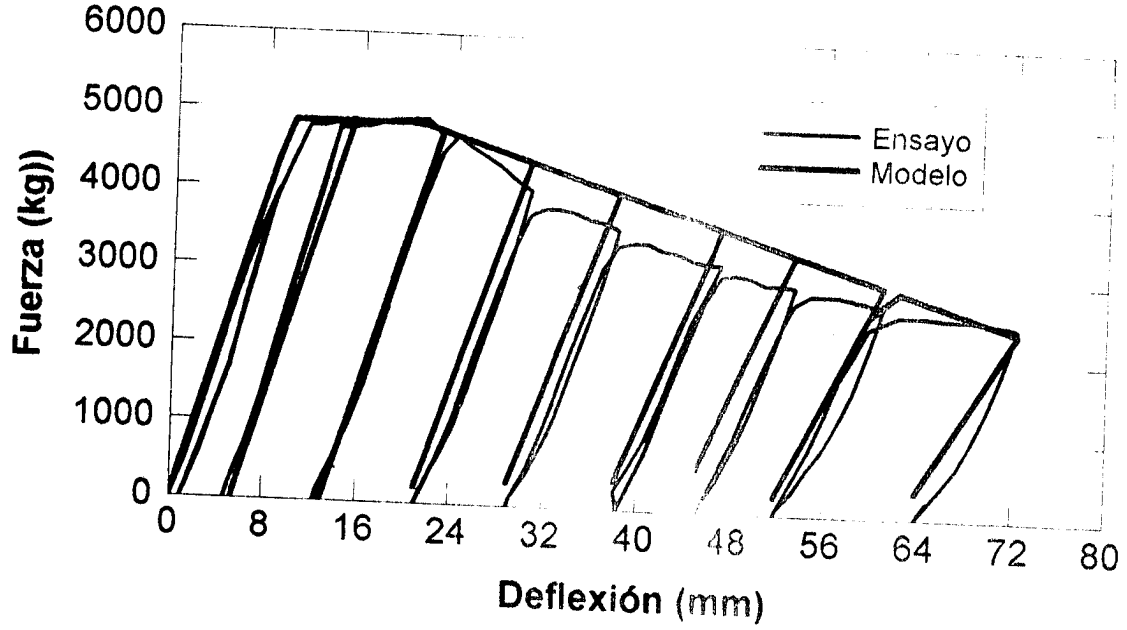


Gráfico 18

ENSAYO 5 Fuerza vs. Deflexión



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

ENSAYO 6 Fuerza vs. Deflexión

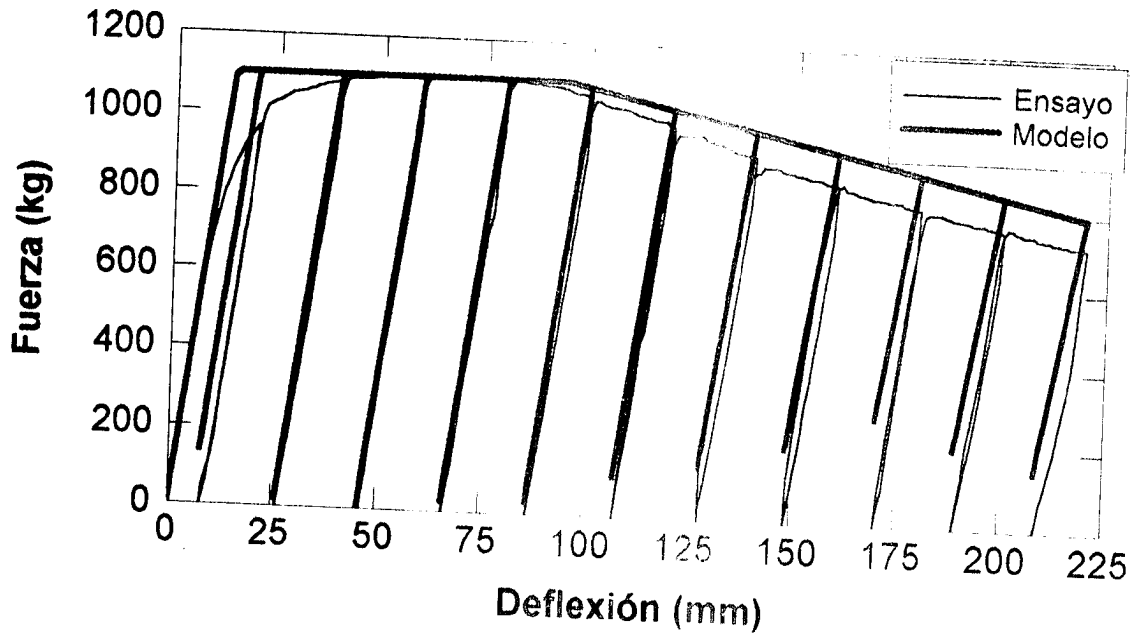
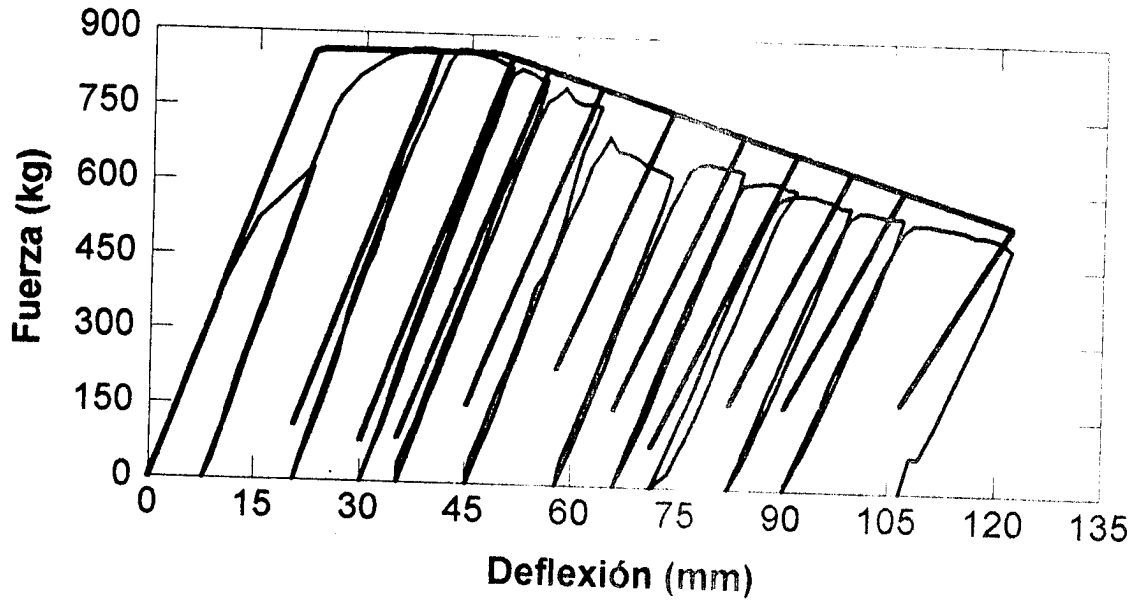


Gráfico 19

ENSAYO 7 Fuerza vs. Deflexión



WWW.BDIGITAL.ULA.VE

La comparación de el modelo analítico con los resultados experimentales se logro (gráficos 17, 18, 19,20) con los parámetros tabulados a continuación:

Ensayo	Zo(kg/mm)	C	Pcr*L(mm)	ty (mm)
1	55.6	0.011	145	23.02
2	52.5	0.0022	130	14
3	34	0.024	67	18
4	42	0.03	81	16
5	50	0.05	11	9.9
6	19.45	0.0022	80	14.14
7	37.5	0.0052	26	23

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

4. CONCLUSIONES

Se propone un modelo simplificado, que permite predecir el comportamiento no lineal de porticos planos de acero sometidas a solicitaciones monotónicas. Este modelo tiene como base el modelo simplificado de daño, por medio del cual se integra una poderosa herramienta que ha surgido para el análisis no lineal, como es caso de la mecánica de la degradación clásica para medios continuos, a el análisis inelástico estructural, a través de los modelos de plasticidad concentrada. Se ha comprobado que la combinación de estos conceptos permite representar: las deformaciones generalizadas permanentes, la pérdida de rigidez y la pérdida de resistencia de los elementos estructurales. Este modelo introduce el daño como una variable interna que expresa en términos numéricos el deterioro observado experimentalmente en los miembros ensayados. El rango de variación de la variable daño oscila entre 0 y 1, extremos que significan material intacto y totalmente dañado.

Se comprueba que el deterioro de los elementos estructurales de acero se puede representar adaptando uno de los modelos mas simples de la mecánica continua del daño, como es el caso del modelo de Lemaitre de daño dúctil para metales, a el análisis estructural.

El modelo propuesto permite efectuar el análisis inelástico de las estructuras de acero con un reducido numero de parámetros, además cubre la gran mayoría de modos de falla localizadas en las componentes de acero, por lo tanto puede extenderse a modos de falla tales como: propagación de la grieta en elementos soldados y pandeo local entre otros, pero no incluye el pandeo torsional que se produce en perfiles de sección abierta cuando la carga a que se someten supera un valor critico.

El modelo puede incluirse en la librería de elementos finitos de programas comerciales de análisis no lineal y de esta manera permitiría la simulación numérica del proceso de daño y colapso de estructuras de acero.

Necesidades de estudio y recomendaciones:

El modelo propuesto no incluye el efecto de la fuerza axial sobre los elementos, por lo cual se recomienda en refinamientos posteriores del modelo la inclusión de dichos efectos.

En este trabajo la predicción del proceso de daño se basa en un análisis inelásticos bidimensional. Esta idealización se puede usar para predecir el comportamiento no lineal de edificaciones regulares con excentricidad por torsión despreciable o nula. Sin embargo aún las edificaciones sin excentricidad, podrían tener torsión debido a las deformaciones inelásticas iniciales de una o más zonas construidas débilmente, edificaciones construidas con perfiles de sección abierta en donde se presenta pandeo torsional cuando la carga a la que se someten los elementos supera un valor crítico. De aquí la necesidad de extender el modelo para que permita determinar el comportamiento mecánico tridimensional de sistemas estructurales de acero, sometidos además de cargas de servicio a sollicitaciones histeréticas y dinámicas. Por otra parte, en el modelo propuesto el parámetro de daño se asume por simplicidad proporcional a las deformaciones plásticas acumuladas, sin embargo se pudo observar que en estados avanzados de daño este tiende a estabilizarse, por consiguiente el modelo en estas zonas sobre estima el daño. Se sugiere desarrollar la ley de evolución del daño, de tal manera que incluya más parámetros para que de esta manera permita simular mejor el proceso, los valores de estos parámetros dependerán de las propiedades de los miembros de la estructura. Será necesario numerosos ensayos para evaluar la dependencia de estos parámetros con las características del elemento.

REFERENCIAS

- [1] Flórez L., "Análisis de Estructuras Aporticadas Mediante la Mecánica de la Degradación". XXV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Porto Alegre, Brazil (1991)
- [2] J. Flórez López " Modelos de daño concentrado para la simulación numérica del colapso de pórticos planos". Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Vol. 9, 2, 123-139 (1993)
- [3] J. Flórez L., " Análisis Elástico No Lineal de Estructuras Aporticadas". Informe Interno del Postgrado de Estructuras. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- [4] A. Cipollina, J. Flórez López, A. López Inojosa. "Un Modelo Simplificado de Daño para Pórticos de Concreto Armado". I Jornadas Andinas de Ingeniería Estructural, Mérida, Venezuela (1993)
- [5] Cipollina A., López A., Flórez López J. "A Simplified Damage Mechanics Approach to nonlinear analysis of frames". Computers & Structures, Vol. 54, NO 6 pp.1113-1126, 1995
- [6] Puglisi, M., "Fallas por fatiga en estructuras de concreto armado". Propuesta de Tesis para optar al grado de Magister Scientiae en Ingeniería Estructural. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- [7] Ramírez A., "Análisis Dinámico de Modelos Histeréticos de Daño ". Propuesta de Tesis para optar al grado de Magister Scientiae en Ingeniería Estructural. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- [8] Thomson, E., "Un modelo histerético con efectos de daño y fatiga de bajo ciclaje para miembros de concreto armado". Trabajo de ascenso, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 1996
- [9] J. Lemaitre, "A Course on Damage Mechanics", Springer-Verlag, Berlin, 1992
- [10] Darwin, D., and Nmai, "Energy dissipation in RC beams under cyclic load." Journal of Structural Engineering, ESCE, Vol 112 ,Nº 8, pp.1829-1846, 1987.

- [12] Takeda, T., Sozen, M., y Nielsen, N.N., "Reinforced concrete response to simulated earthquakes". Journal of Structural Engineering, ESCE, Vol 96 ,Nº ST12, pp. 2557-2573, 1970
- [13] Banon, H., Biggs, J. M., and Irvine, H. M. " Seismic Damage in reinforced concrete frames." Journal of Structural Engineering, ESCE, Vol 107 ,Nº 9, pp.1713 -1729, 1981
- [14] Roufaiel, M. S. L., and Meyer, C. "Analytical modeling of hysteretic behavior of R/C frames." Journal of Structural Engineering, ESCE, Vol 113 ,Nº 3, pp.429-444, 1987
- [15] Kasiraj, I., and Yao, J. T. P. "Fatigue damage in seismic structures." Journal of Structural Engineering, ESCE, Vol 95 ,Nº 8, pp.1673-1692, 1969.
- [16] Suidan, M. T., and Eubanks, R. A. "Cumulative fatigue damage in seismic structures." Journal of Structural Engineering, Vol. 99, Nº 5, pp. 923-943, 1973.
- [17] Helmut, Krawinkler. "Performance Assessment of Steel Components", Earthquake Spectra, Vol 3, No 1, 1987
- [18] Ballio G., and Castiglioni C., "An approach to the seismic design of steel structures basec on cumulative damage criteria", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 23, pp. 969-986, 1994.
- [19] Chai, Y. H., Romstad, K. M., and Bird, S. M. "Energy-Based Linear Damage Model For High-Intensity Seismic Loading", Journal of Structural Engineering, Vol. 121, Nº 5, May 1995.
- [20] Flórez L., "Simplified Model of unilateral damage for RC Frames". Journal of Structural Engineering, ESCE, Vol 121 ,Nº12, pp. 1765-1772, 1995

ANEXOS

WWW.BDIGITAL.ULA.VE

Licencia Creative Commons:
Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

OTROS MODELOS DE DAÑO PARA ANALISIS DE ESTRUCTURAS DE ACERO

Helmunt Krawinkler (1983)[17]

Presenta una metodología para la evaluación del daño acumulado en las componentes de acero estructural, sujetos a una historia de cargas cíclicas inelásticas. Esta metodología se basa en : El modelo clásico de fatiga de bajo ciclaje para materiales inelásticos y acumulación lineal de daño (regla de Miner).

- Modelo de fatiga de bajo ciclaje

Se postula que bajo ciclos de amplitud constante, el numero de ciclos hasta la falla N_f , puede ser relacionado con la deformación plástica del ciclo $\Delta\delta_p$, por una ecuación del tipo:

$$N_f = C^{-1} (\Delta\delta_p)^{-c} \quad (1)$$



Fig.1 Rango de deformación plástica

donde:

$\Delta\delta_p$ puede ser: deformación unitaria , el ángulo de distorsión , rotación o deflexión los cuales dependen del modo de falla en estudio.

C y c son parámetros del material.

- Usando la hipótesis de que el daño se acumula linealmente (Regla de Miner), el daño acumulado después de N ciclos puede ser relacionado con la deformación plástica del ciclo $\Delta\delta_p$ por:

$$D \sum_{i=1}^N \frac{1}{N_{fi}} = C \sum_{i=1}^N (\Delta\delta_{pi})^c \quad (2)$$

Los modos de falla estudiados en este artículo son:

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Propagación de la grieta en elementos soldados y pandeo local del ala de la viga

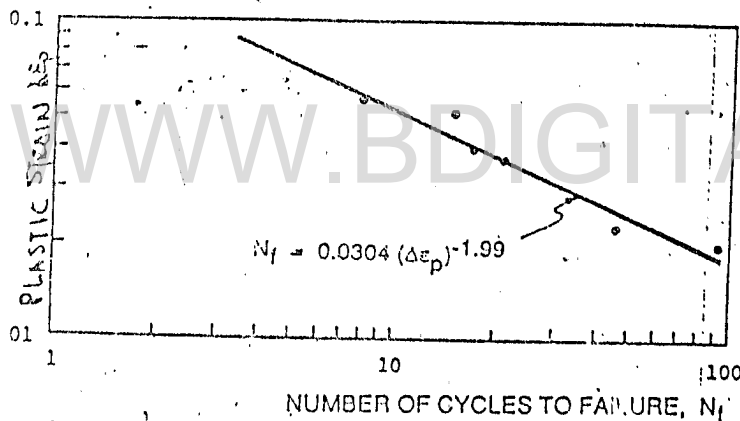
Modelo de daño por propagación de la grieta en elementos soldados

Se estudio la respuesta de vigas en cantiliver, sometidas a lazos histereticos estables, hasta que ocurre la falla.

Para obtener los parámetros del modelo C,c (ec. 2) se pueden hacer dos aproximaciones :

-Usando los datos observados:

Se mide (a amplitud constante) $\Delta\epsilon_p$ según los ciclos , se gráfica la ecuación N_f vs. $\Delta\epsilon_p$ en Log-Log. Y se busca la curva mas apropiada (una recta), obteniendla por regresión lineal.



$$N_f = 0.0304(\Delta\epsilon_p)^{-1.99}$$

$$C=0.0304$$

$$c=-1.99$$

$$D = \sum_{i=1}^N C(\Delta\epsilon_p)^c$$

Fig. 2 Resultados de ensayos a ciclos de amplitud constante

-Usando los conceptos de la mecánica de la fractura:

En esta aproximación se asume un tamaño inicial de la grieta "a₀", que existe en el espécimen virgen debido a las imperfecciones en el pie de la soldadura.

Si el espécimen es sometido a ciclos de amplitud constante, el logaritmo de la profundidad de la grieta "a" esta relacionado linealmente con el numero de ciclos N (fig.3). Todos los especímenes, se relaciona en papel log-log da/dN vs $\Delta\epsilon_p$.

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

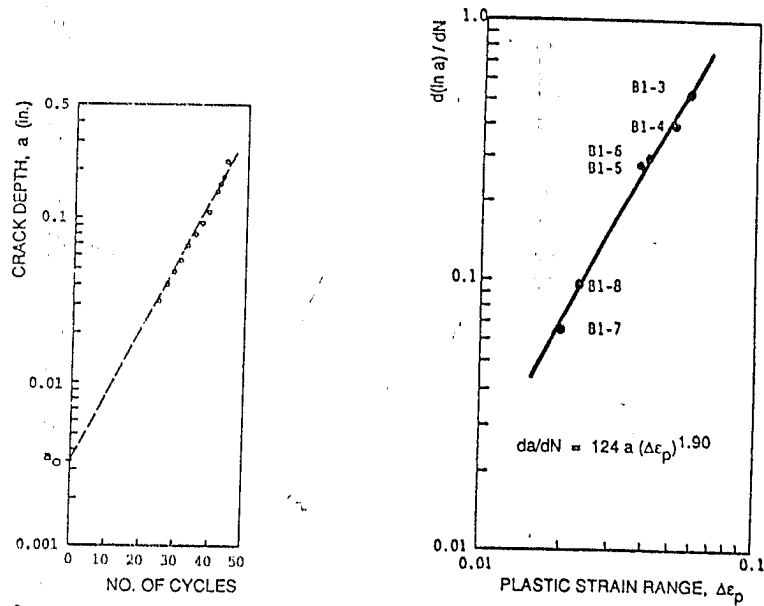


Fig. 3 Rango del modelo de propagación de la grieta

obteniendo una ecuación del tipo :

$$\frac{da}{dN} = \alpha a (\Delta \epsilon_p)^p \quad (3)$$

donde : a = tamaño de la grieta.

α y β = son parámetros mecánicos de la fractura que dependen de las propiedades del material, geometría, forma de la grieta y localización de los esfuerzos. Asumiendo a_0 conocido, el número de ciclos hasta la falla de amplitud constante se calcula como :

$$N_f = \alpha^{-1} \ln \frac{a_c}{a_0} (\Delta \epsilon_p)^{-\beta} \quad (4)$$

donde a_c es la longitud de la grieta crítica.

Usando los conceptos de la mecánica de fractura y sustituyendo en la ec 2 se tiene:

$$D \sum_{i=1}^N \frac{1}{N_{fi}} = \alpha \ln \left(\frac{a_c}{a_0} \right)^{-1} \sum_{i=1}^N (\Delta \epsilon_{pi})^\beta$$

$$D = \alpha \left(\ln \frac{a_c}{a_0} \right)^{-1} \sum_{i=1}^N (\Delta \epsilon_{pi})^\beta \quad (5)$$

donde:

$$c = \beta$$

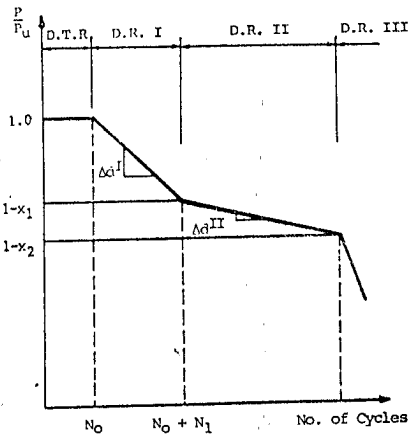
$$C = \alpha \left(\ln \frac{a_c}{a_0} \right)^{-1}$$

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

Modelo de daño para pandeo local

Se determina la respuesta de vigas en cantiliver cuya falla fue pandeo local. En las probetas ensayadas el pandeo local y el Deterioro ocurrieron tempranamente junto con la perdida gradual de la rigidez elástica, se puede representar como indica fig. 4



D.T.R: identifica el numero de ciclos necesarios para causar pandeo local.

D.R.I: identifica el rango de rápido deterioro, en el cual el pandeo local aumenta.

D.R.II: identifica el rango de lento deterioro en el cual el tamaño del pandeo se estabiliza.

D.R.III: identifica el rango de gran rapidez en el deterioro y esta gobernado por la propagación de la grieta y la fractura.

Fig. 4 Rango de deterioro para modos de falla por pandeo local

Las pendientes de las líneas de la fig. 4 representan la variación del deterioro por ciclo. Si esas pendientes son graficadas en log-log Vs las rotaciones plásticas $\Delta\theta_p$ para todos los ensayos de amplitud constante el resultado se muestra en la fig. 5

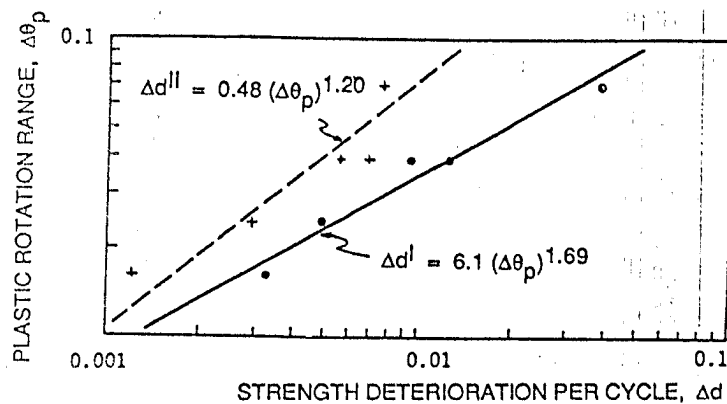


Fig. 5 Rapidez de deterioro del modelo

En el rango I: la pérdida de resistencia por ciclo “ Δd ” y el rango de rotación plástica “ $\Delta\theta_p$ ” se relacionan por medio de:

$$\Delta d = A(\Delta\theta_p)^a \quad (6)$$

donde: A, a ; son parámetros del comportamiento estructural.

Si llamamos “ x ” el valor limite de un aceptable daño que constituye la falla, el numero de ciclos correspondiente se calcula como:

$$N_1 = \frac{x}{\Delta d} = xA^{-1}(\Delta\theta_p)^{-a} \quad (7)$$

El numero de ciclos totales hasta la falla a una amplitud constante :

$$N = N_0 + N_1 = C^{-1}(\Delta\theta_p)^{-c} + xA^{-1}(\Delta\theta_p)^{-a} \quad (8)$$

siendo N_0 el numero de ciclos esperados en el rango del inicio del deterioro

Si se quiere introducir el modelo de daño para ciclos de amplitud variable considera un valor promedio de deterioro :

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{1}{C^{-1}(\Delta\theta_p)^{-c} + xA^{-1}(\Delta\theta_p)^{-a}} \quad (9)$$

Este modelo es solamente una aproximación. En esta formulación el inicio del deterioro es ignorado y el daño se asume que empieza en la primera incursión inelástica.

Chay, Y. H., Romstad, M., and Bird, M. (1995)[19]

Examina el modelo propuesto por Park y Ang (1985) y Park et al (1985), el cual considera el daño como una combinación lineal entre el máximo desplazamiento normalizado y la energía de deformación plástica normalizada.

El modelo de Park y Ang (1985) usa un índice de daño D_i para caracterizar el daño de la estructura y lo define como:

$$D_i = \frac{\Delta_m}{\Delta_{um}} + \frac{\beta E_h}{V_y \Delta_{um}} \quad (1)$$

donde: Δ_m = Máximo desplazamiento de respuesta.

Δ_{um} = Deformación última para carga monotónica.

β = factor que refleja la importancia de la contribución de la energía disipada.

E_h = Energía de deformación plástica disipada por el miembro.

V_y = Fuerza cedente.

El modelo se propuso originalmente para calcular daño en estructuras de concreto después de sismos severo y varios valores han sido sugeridos para representar varios estados de daño en estructuras de concreto reforzado (Park et al. 1987), así por ejemplo:

$D_i < 0.4$ el daño es reparable.

$0.4 < D_i < 1$ corresponde a un daño irreparable.

$D_i \geq 1$ implica el colapso de la estructura.

Haciendo el índice de daño igual a la unidad (ec. 1) se puede demostrar que :

$$\frac{E_h}{V_y \Delta_{um}} = \frac{1}{\beta} - \frac{1}{\beta} \frac{\Delta_m}{\Delta_{um}} \quad (2)$$

El estado límite último expresado por la ec.2 describe la capacidad de energía de deformación plástica como una función lineal del desplazamiento de respuesta pico. Graficando la energía

normalizada $\frac{E_h}{V_y \Delta_{um}}$ vs. Desplazamiento normalizado $\frac{\Delta_m}{\Delta_{um}}$ se tiene:

Licencia Creative Commons:

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY-NC-SA 3.0 VE)

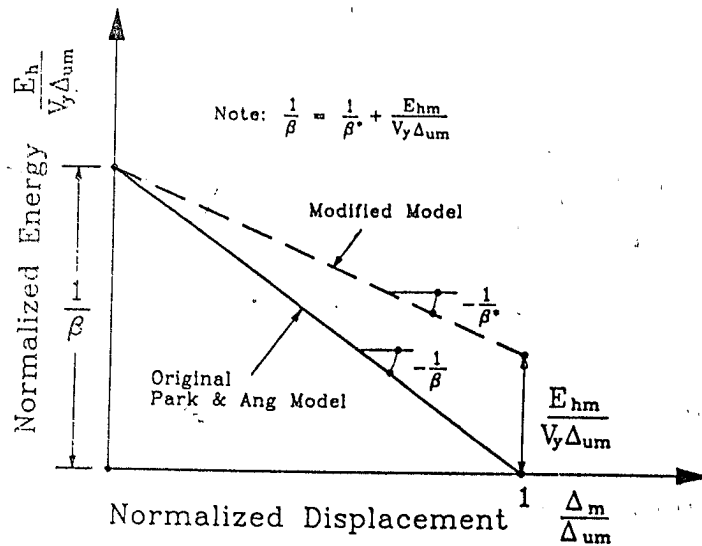


Fig. 1 Estado limite según el modelo de Park y Ang y El modelo modificado

El estado limite es mostrado en la fig. 1 como una línea continua con una intersección en Y de $1/\beta$ y una pendiente de $-1/\beta$.

Bajo carga monotonica ($\Delta_m = \Delta_{um}$) se tiene:

$$\frac{E_h}{V_y \Delta_{um}} = 0$$

sin embargo, en la realidad la estructura tiene que presentar un comportamiento no lineal y disipar cierta cantidad de energía de deformación plástica. La falta de precisión del modelo es corregida mediante la incorporación solamente de la cantidad de energía disipada mayor que la producida por la carga monotonica como contribución al daño .

$$D_i = \frac{\Delta_m}{\Delta_{um}} + \frac{\beta^* (E_h - E_{hm})}{V_y \Delta_{um}} \quad (3)$$

Donde :

E_{hm} = energía de deformación plástica disipada por la estructura bajo carga monotonica .

β^* = parámetro que toma en cuenta la perdida de resistencia y calibra el modelo (ensayos).

Si en la ec. 3 se hace $D=1$ se puede demostrar que:

$$\frac{E_h}{V_y \Delta_{um}} = \frac{1}{\beta^*} - \frac{1}{\beta^*} \frac{\Delta_m}{\Delta_{um}} + \frac{E_{hm}}{V_y \Delta_{um}} \quad (4)$$

Representado este modelo en el espacio $\frac{E_h}{V_y \Delta_{um}}$ vs. $\frac{\Delta_m}{\Delta_{um}}$ se tiene una recta (Fig.1 línea punteada).

De la fig 1, la relación entre β y β^* se expresa como:

$$\frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta^*} + \frac{E_{hm}}{V_y \Delta_{um}} \quad (5)$$

Considerando la respuesta elatoplástica perfecta, la energía de deformación plástica disipada por la carga monotónica es igual a:

$$E_{hm} = V_y (\Delta_{um} - \Delta_y) \quad (6)$$

Introduciendo la ec. 6 en la ec. 5, se tiene:

$$\frac{\beta}{\beta^*} = \frac{\mu_m}{\mu_m - (1 - \mu_m)\beta} \quad (7)$$

esta relación entre los parámetros β y β^* se gráfica y se tiene:

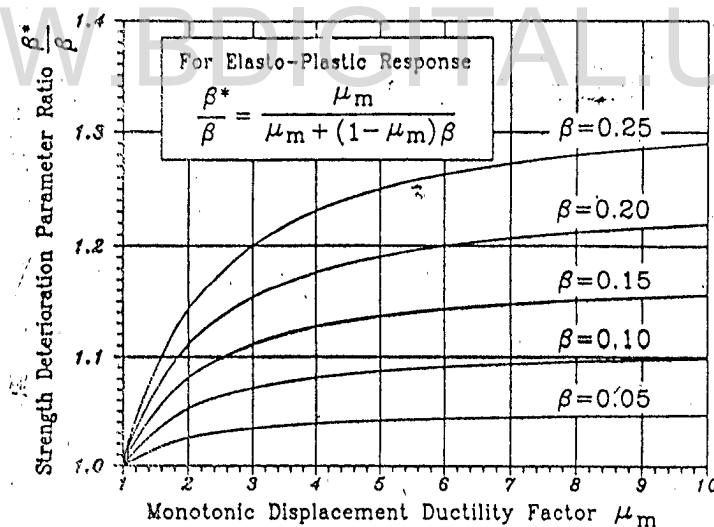


Fig 2 Relación de parámetros de pérdida de resistencia $\frac{\beta}{\beta^*}$ vs factor de ductilidad de desplazamiento monotónico μ_m

La respuesta no lineal de una estructura bajo alta intensidad sísmica puede ser expresada en un espacio bidimensional Ver fig 3

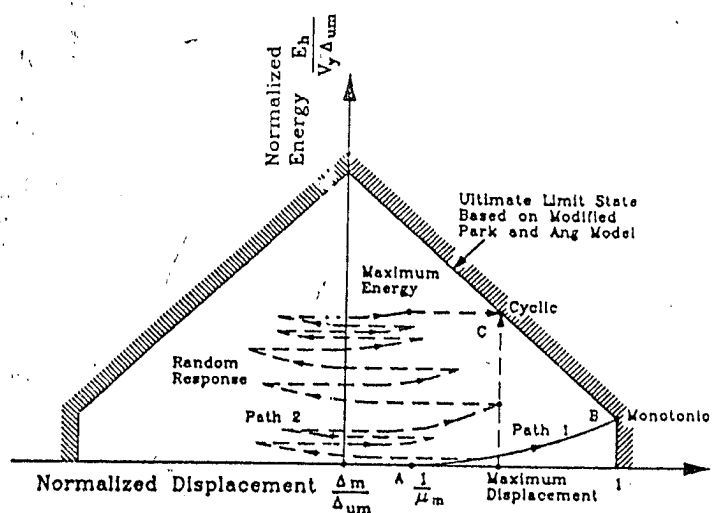


Fig.3 Respuesta estructural energía normalizada vs. desplazamiento

Bajo carga monotonica, la respuesta de la estructura se considera lineal, hasta la primera fluencia (pto. "A").

Continua con una respuesta no lineal hasta alcanzar el punto "B".

Bajo cargas aleatorias la respuesta de la estructura se caracteriza por una trayectoria irregular, dependiendo de los valores de la energía normalizada y del desplazamiento normalizado. Hasta alcanzar el pto. "C", en el estado limite.

A este mismo pto "C" en el estado limite se puede llegar con una trayectoria diferente, siempre y cuando se consiga la misma combinación de la energía normalizada con el desplazamiento normalizado.