

TEORÍA DEL DAÑO CONCENTRADO: APLICACIÓN A ESTRUCTURAS METÁLICAS

Yongtao Bai¹, Nestor Guerrero^{2,3}, Pether Inglessis², Masahiro Kurata¹, Ricardo Picón³, María Eugenia Marante³, Julio Flórez-López^{2,4} e Masayoshi Nakashima¹

1 Division of Seismic Resistant Structures, Disaster Prevention Research Institute (DPRI), Kyoto University, Japan

2 Departamento de Estructuras, Universidad de Los Andes, Venezuela

3 Departamento de Estructuras, Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado, Venezuela

4 Departamento da Engenharia de Estruturas, EESC, USP, Brasil

Agradecimientos:

Profesor Alfredo Canelas, Universidad de la República

Profesor Sergio P.B. Proença, Universidad de São Paulo

Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

Modelado de la propagación de fisuras bajo solicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

Observaciones finales

Computers & Structures

Latin American Journal of Solids and Structures

Engineering Structures

Steel and Composite Structure

Journal of Constructional Steel Research

Journal of Structural Engineering ASCE

Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

Modelado de la propagación de fisuras bajo sollicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

Observaciones finales



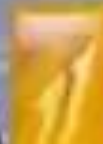
2013 12 10



五輪向け交通整備に重点



原爆症“心筋梗塞など2キロ以内”



長周期地震動“大型ビル”破壊実験



ザックロー二監督“暑さ対策 必要”



NIED

三次元震動台

X 軸

Z 軸



E-Defense





Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

Conceptos fundamentales de teoría del daño continuo

Modelado del pandeo local bajo solicitaciones monotónicas

Modelado del pandeo local bajo cargas cíclicas

Modelado de la propagación de fisuras bajo solicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

Observaciones finales

Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

Conceptos fundamentales de teoría del daño continuo

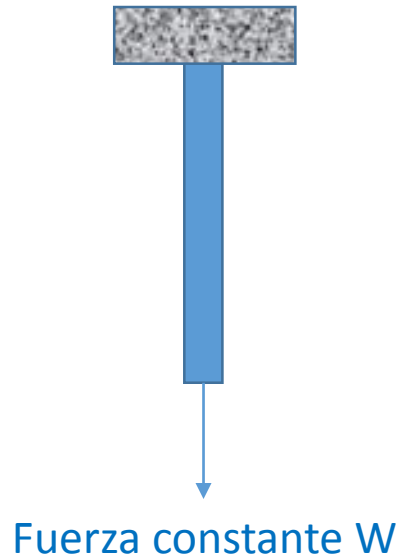
Modelado del pandeo local bajo solicitaciones monotónicas

Modelado del pandeo local bajo cargas cíclicas

Modelado de la propagación de fisuras bajo solicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

Observaciones finales

Teoría clásica del daño continuo: modelado de la fluencia terciaria (Kachanov 1958, Rabotnov 1969)



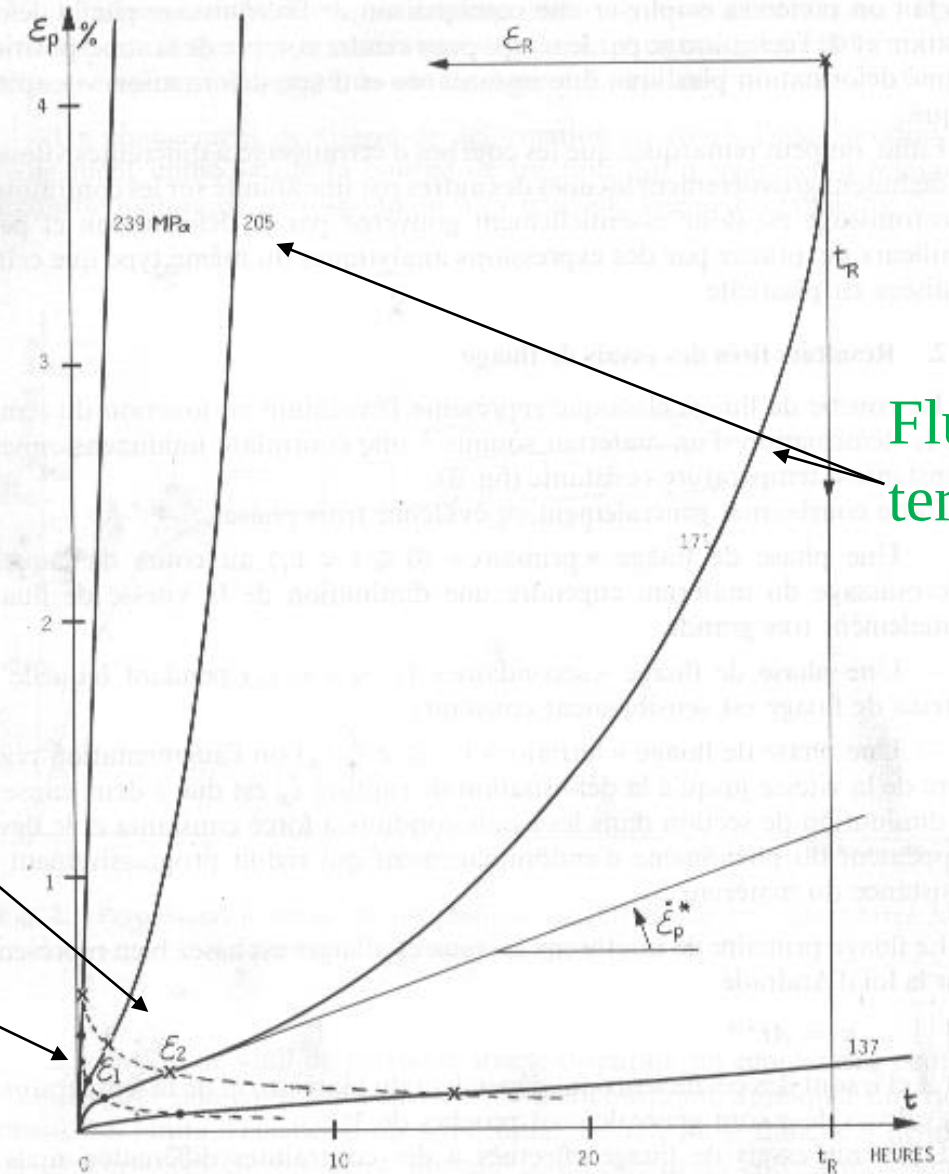
Ensayo de fluencia

Fluencia
secundaria

Fluencia
primaria

258

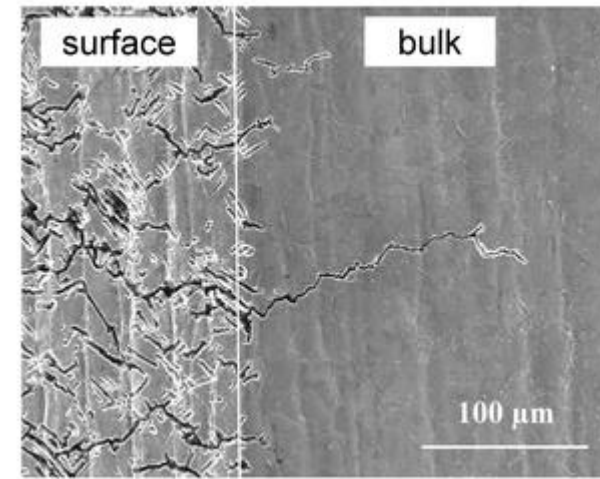
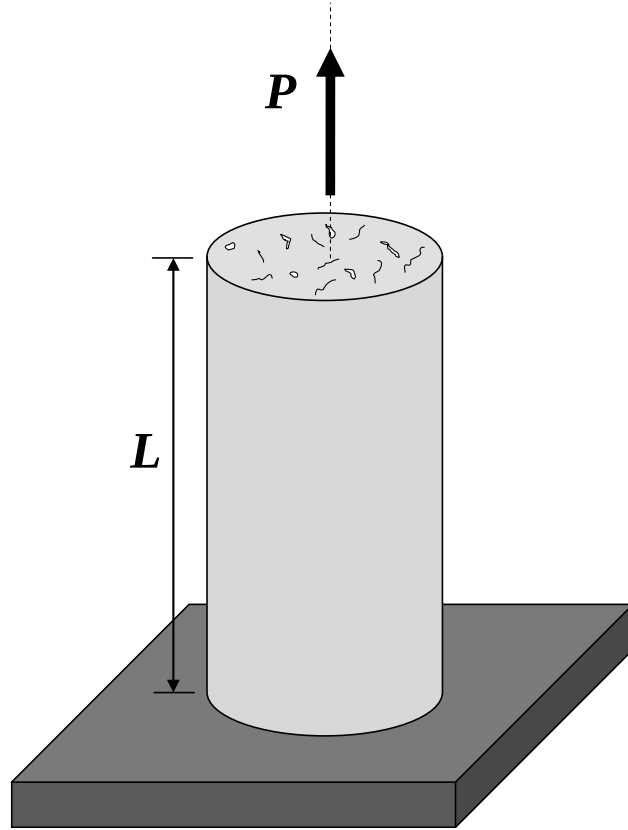
MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX SOLIDES



Fluencia
terciaria

Fig. 3. Essais de fluage à différentes contraintes, Superalliage IN 100 à 1 000 °C.

Variable de daño:



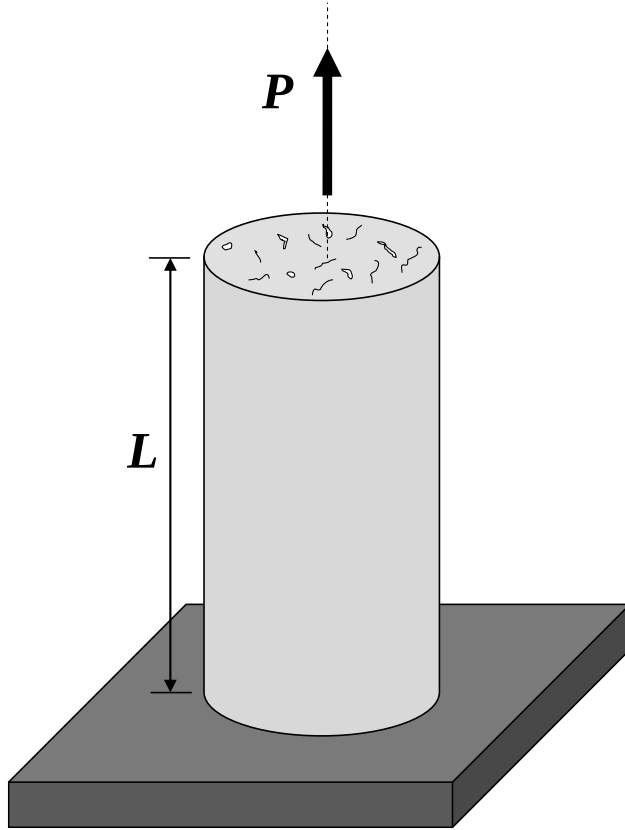
Área de micro defectos

$$\omega = \frac{A_d}{A}$$

$$0 \leq \omega \leq 1$$

Área total

Esfuerzo efectivo de Rabotnov:



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

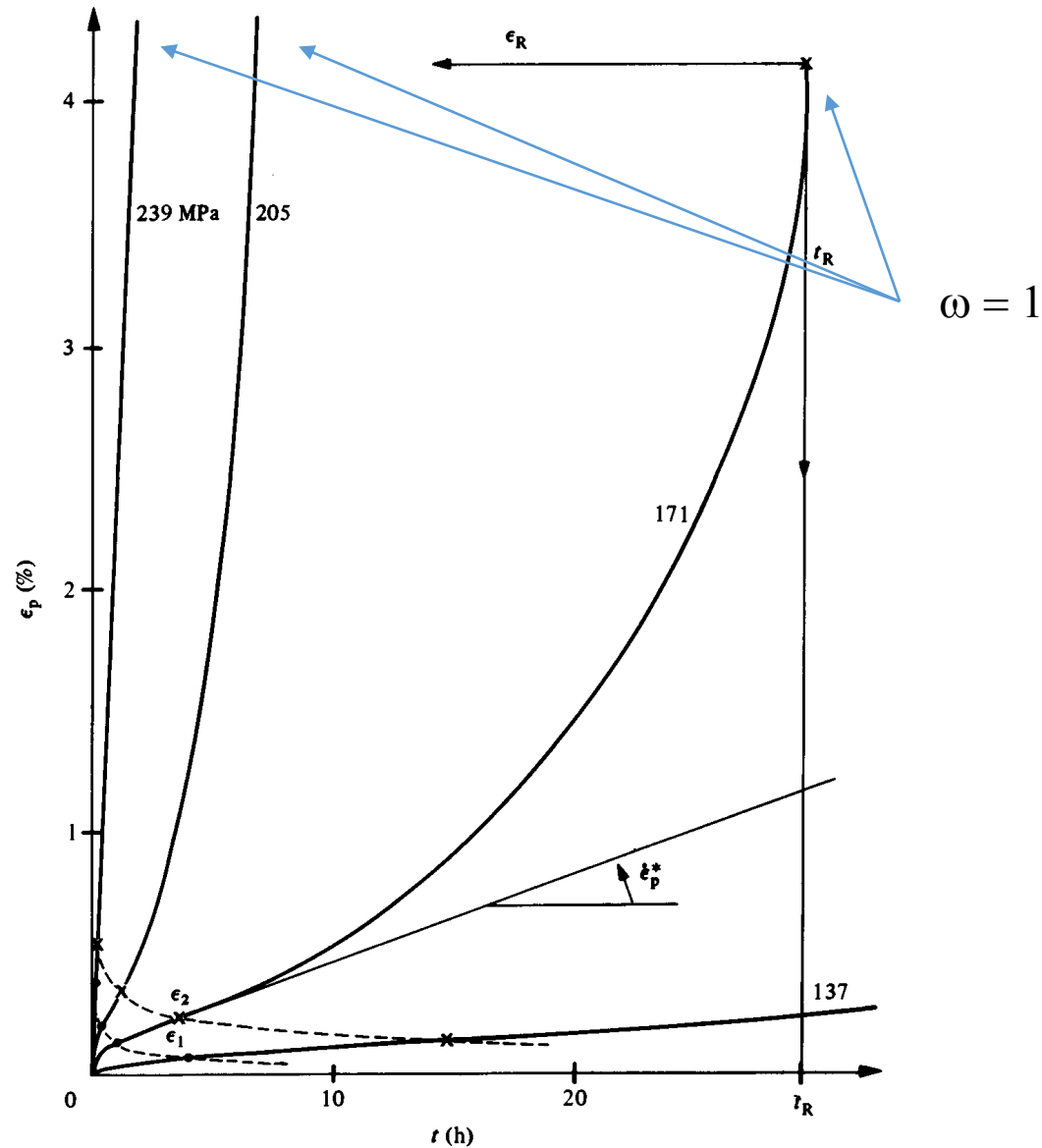
$$\omega = \frac{A_d}{A}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{A - A_d} = \frac{P}{A - \omega A}$$

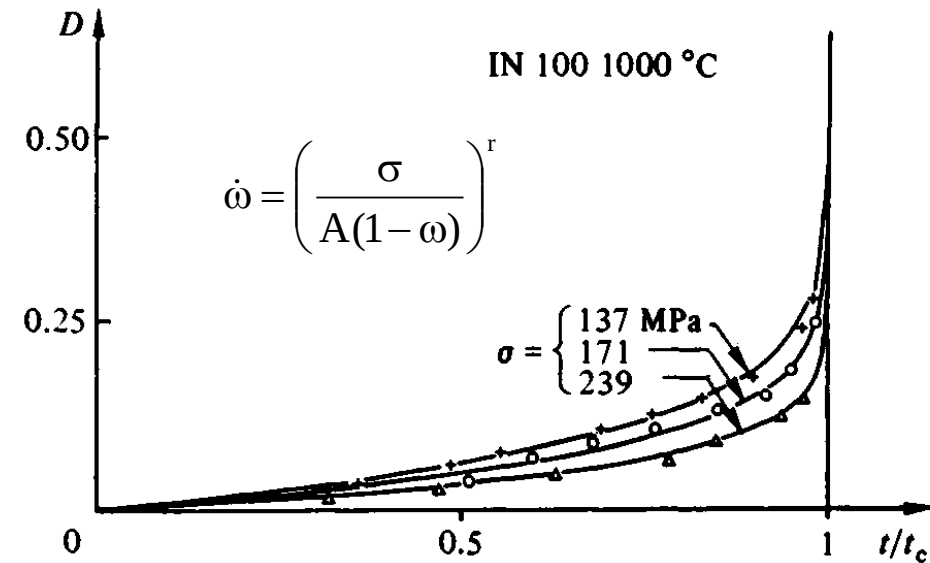
$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1 - \omega}$$

Teoría clásica del daño continuo: modelado de la fluencia terciaria (Kachanov 1958, Rabotnov 1969)

Creep tests at different stress levels: IN 100 superalloy at 1000 °C.



Creep damage evolution for the alloys IN 100 and AU2GN.



Modelado del ablandamiento por deformación en materiales dúctiles (Lemaitre 1970):

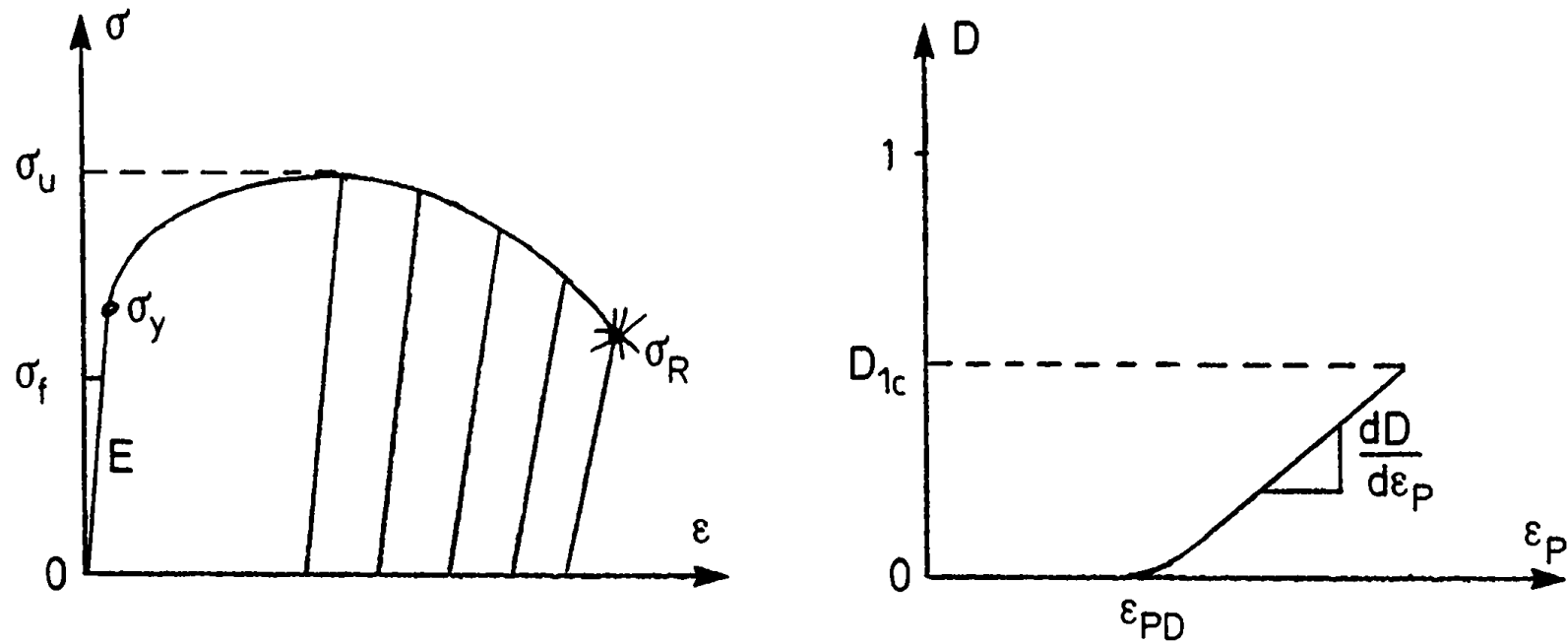


Fig. 3.4. Identification of damage coefficients

Hipótesis de equivalencia en deformación

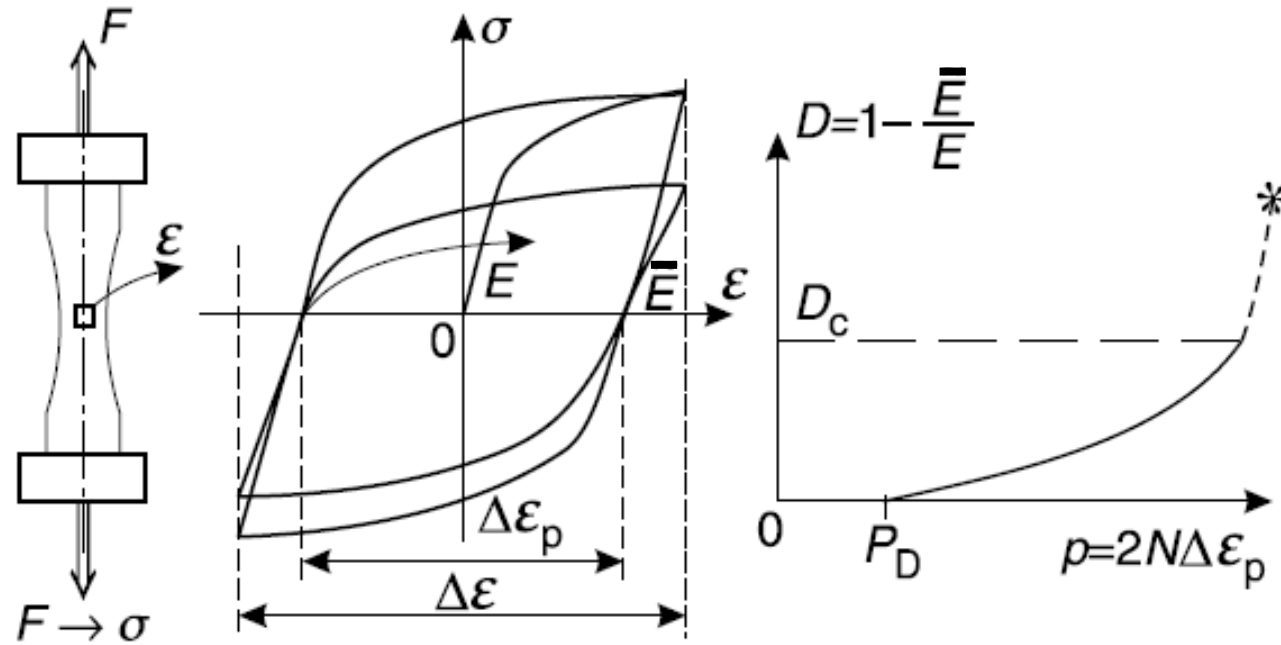
	Material intacto	Material dañado	
Ley de elasticidad	$\sigma = E\varepsilon$	$\bar{\sigma} = E\varepsilon$	$\sigma = (1 - \omega)E\varepsilon$
Ley de elasticidad material dúctil	$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon^p)$	$\bar{\sigma} = E(\varepsilon - \varepsilon^p)$	$\sigma = (1 - \omega)E(\varepsilon - \varepsilon^p)$
Función de fluencia	$f = \sigma - \sigma_y$	$f = \bar{\sigma} - \sigma_y$	$f = \left \frac{\sigma}{1 - \omega} \right - \sigma_y$

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^d + \varepsilon^p$$

$$\varepsilon^e = \frac{1}{E} \sigma$$

$$\varepsilon^d = \frac{\omega}{E(1 - \omega)} \sigma$$

Medida experimental del daño: método de la variación del modulo de elasticidad (Lemaitre)



$$\sigma = (1 - \omega)E(\varepsilon - \varepsilon^p) \quad \sigma = \bar{E}(\varepsilon - \varepsilon^p)$$

$$\omega = 1 - \frac{\bar{E}}{E}$$

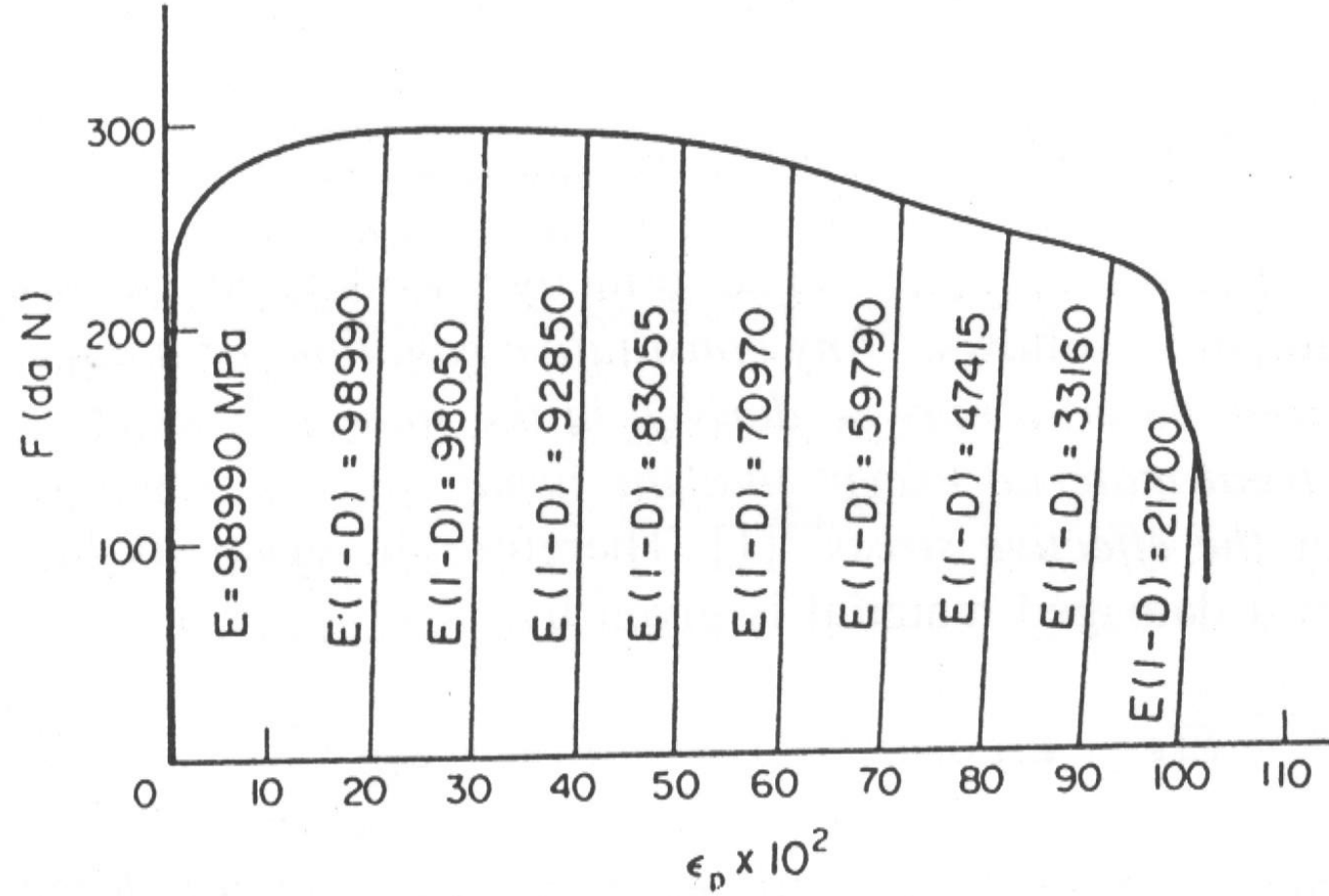
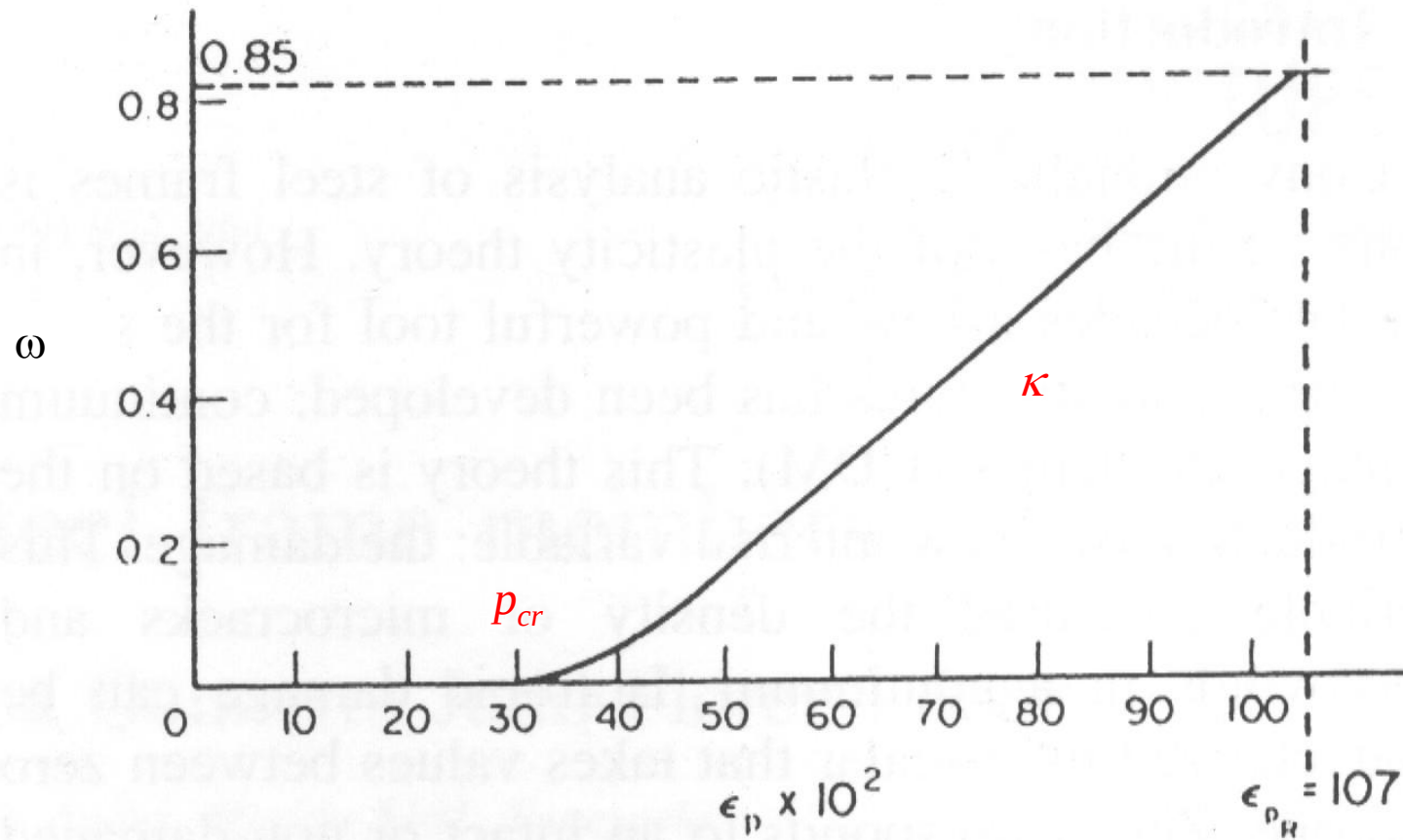


Fig. 1. Variation of the elasticity modulus with damage for copper after Lemaitre and Duffailly [12].



$$\omega = \kappa \langle \epsilon_p - p_{cr} \rangle_+$$

Ley de daño dúctil de
Lemaitre

Fig. 2. Ductile damage as a function of the plastic deformation after Lemaitre and Duffailly [12].

Modelo de daño dúctil para metales (Lemaitre)

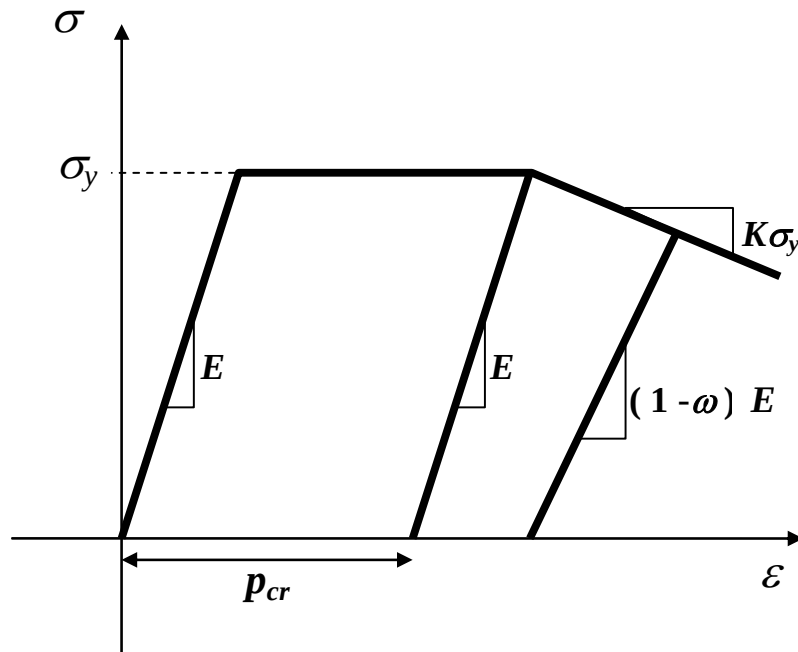
$$\sigma = (1 - \omega) E (\varepsilon - \varepsilon^p)$$

Ley de elasticidad

$$\begin{cases} d\varepsilon_p = 0 & \text{if } f < 0 \\ f = 0 & \text{if } d\varepsilon_p \neq 0 \end{cases}$$

$$f = \left| \frac{\sigma}{1 - \omega} \right| - \sigma_y \leq 0$$

Ley de plasticidad



Ley de daño

$$\omega = \kappa \langle p - p_{cr} \rangle_+$$

$$dp = |d\varepsilon_p|$$

Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

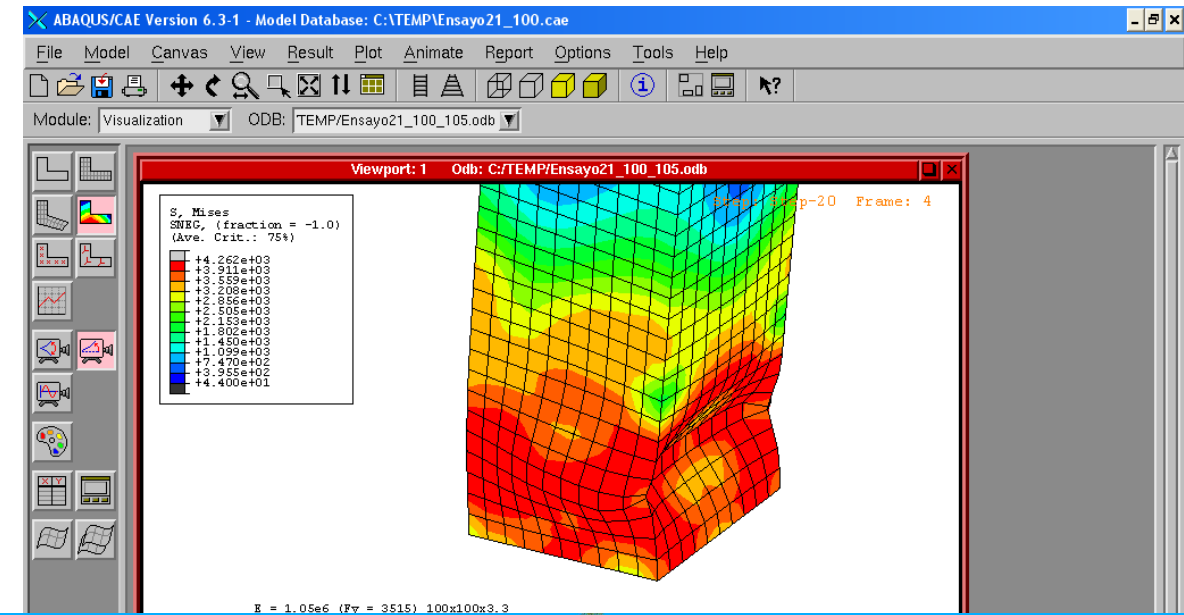
Conceptos fundamentales de teoría del daño continuo

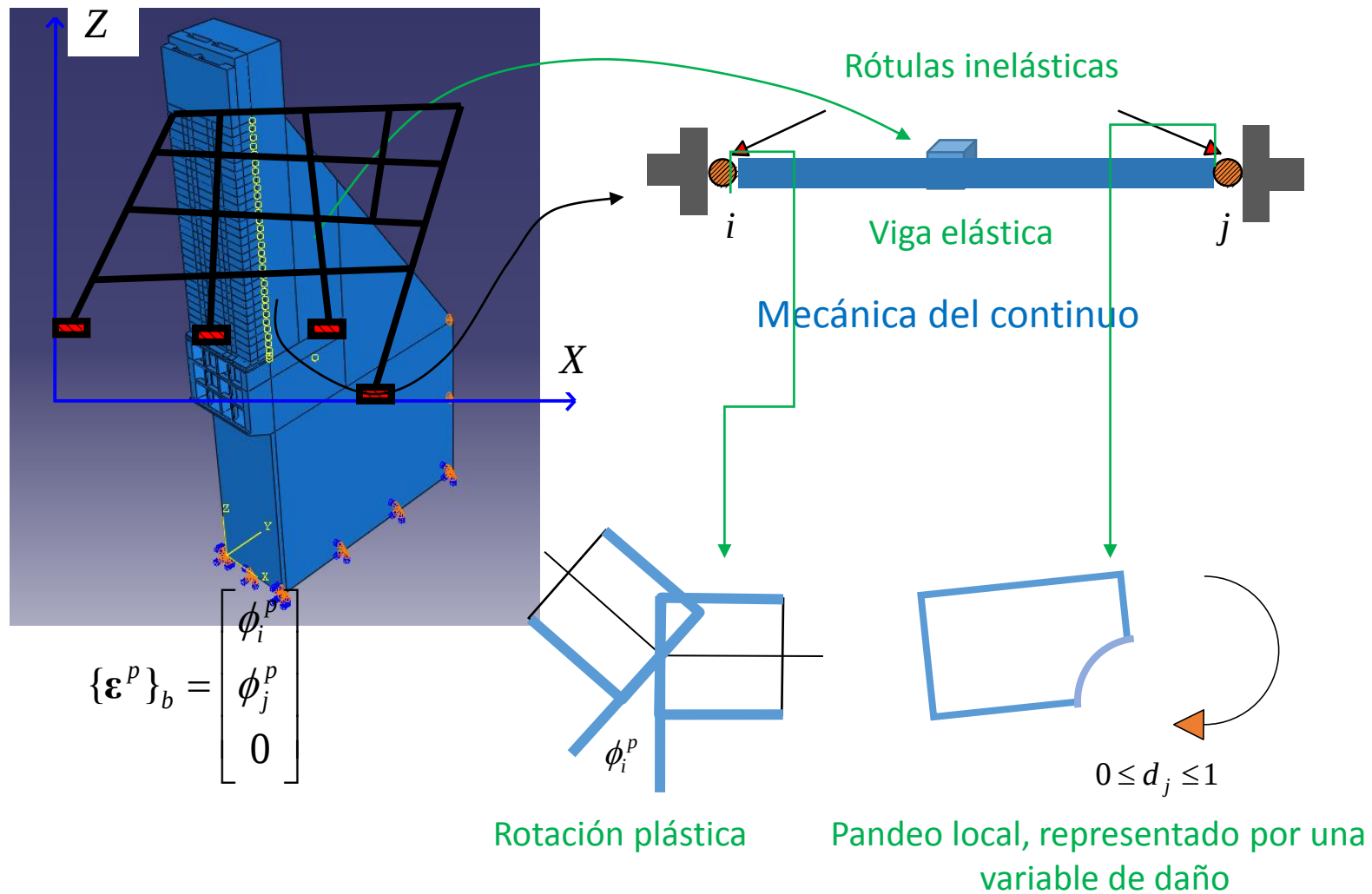
Modelado del pandeo local bajo solicitaciones monotónicas

Modelado del pandeo local bajo cargas cíclicas

Modelado de la propagación de fisuras bajo solicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

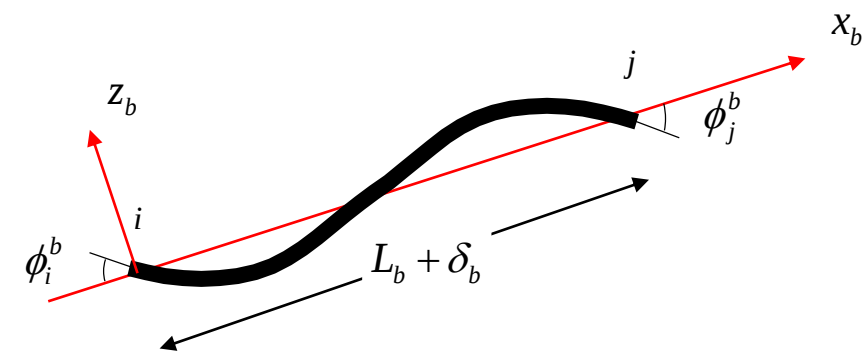
Observaciones finales



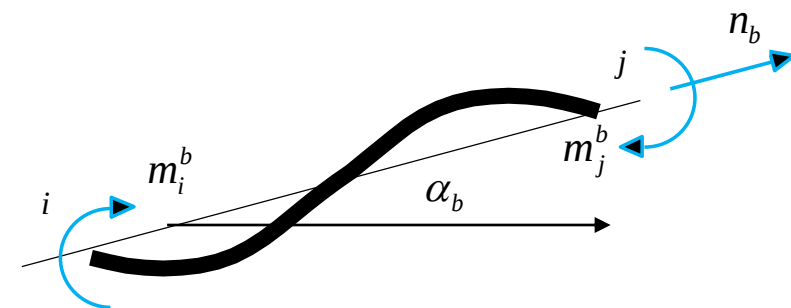


$$\{\boldsymbol{\varepsilon}^p\}_b = \begin{bmatrix} \phi_i^p \\ \phi_j^p \\ 0 \end{bmatrix}$$

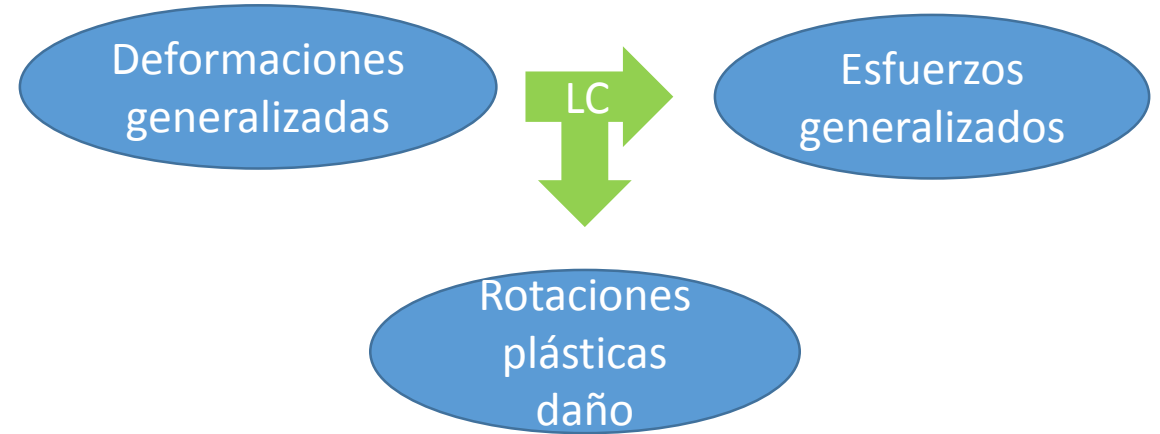
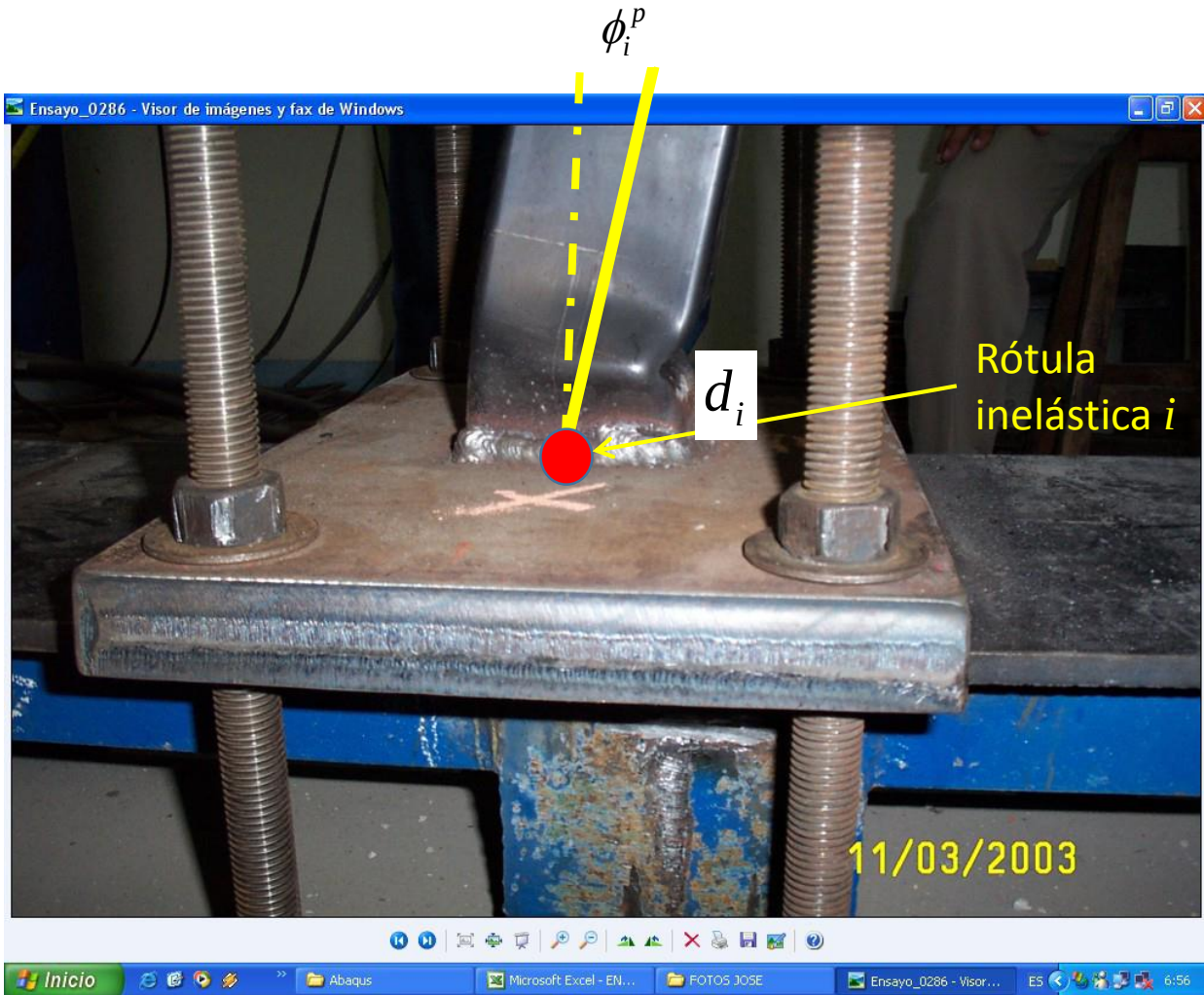
$$(\mathbf{D})_b = (d_i, d_j)$$



$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\}_b = \begin{bmatrix} \phi_i^b \\ \phi_j^b \\ \delta_b \end{bmatrix}$$



$$\{\boldsymbol{\sigma}\}_b = \begin{bmatrix} m_i^b \\ m_j^b \\ n_b \end{bmatrix}$$



Ley de comportamiento: { Ley de elasticidad
Ley de daño
Ley de plasticidad

Ley de elasticidad

Unidad estructural

Hipótesis de equivalencia

Deformación elástica

Deformación de daño

Teoría del daño continuo:



$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + \boldsymbol{\varepsilon}^d + \boldsymbol{\varepsilon}^p$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^e = \frac{1}{E} \boldsymbol{\sigma}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^d = \frac{\omega}{E(1-\omega)} \boldsymbol{\sigma}$$

Teoría del daño concentrado:



$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\}_b = \{\boldsymbol{\varepsilon}^e\}_b + \{\boldsymbol{\varepsilon}^p\}_b + \{\boldsymbol{\varepsilon}^d\}_b$$

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}^e\}_b = [\mathbf{F}_e]_b \{\boldsymbol{\sigma}\}_b$$

$$\phi_i^d = \frac{d_i F_{11}^0}{(1-d_i)} m_i$$

$$\phi_j^d = \frac{d_j F_{22}^0}{(1-d_j)} m_j$$

Teoría del
daño
continuo :

$$\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^p = \frac{1}{E(1-\omega)} \boldsymbol{\sigma}$$

Teoría del
daño
concentrado :

$$\begin{bmatrix} \phi_i - \phi_i^p \\ \phi_j - \phi_j^p \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_{11}^0}{(1-d_i)} & F_{12}^0 & F_{13}^0 \\ F_{21}^0 & \frac{F_{22}^0}{(1-d_j)} & F_{23}^0 \\ F_{31}^0 & F_{32}^0 & F_{33}^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_i \\ m_j \\ n_i \end{bmatrix}$$

Ley de plasticidad

Unidad estructural

Esfuerzo efectivo

Función de fluencia sin daño

Hipótesis de equivalencia

Teoría del daño continuo:



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

$$f = |\sigma| - \sigma_y$$

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

Teoría del daño concentrado:



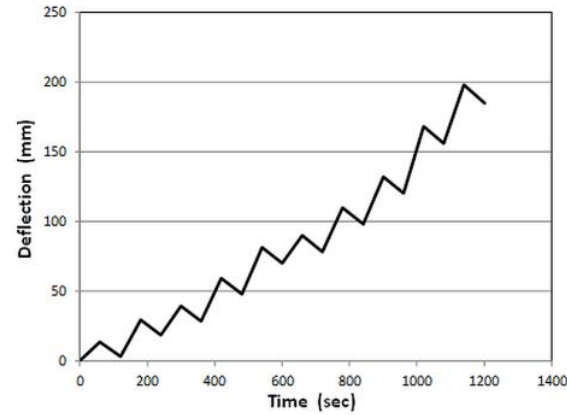
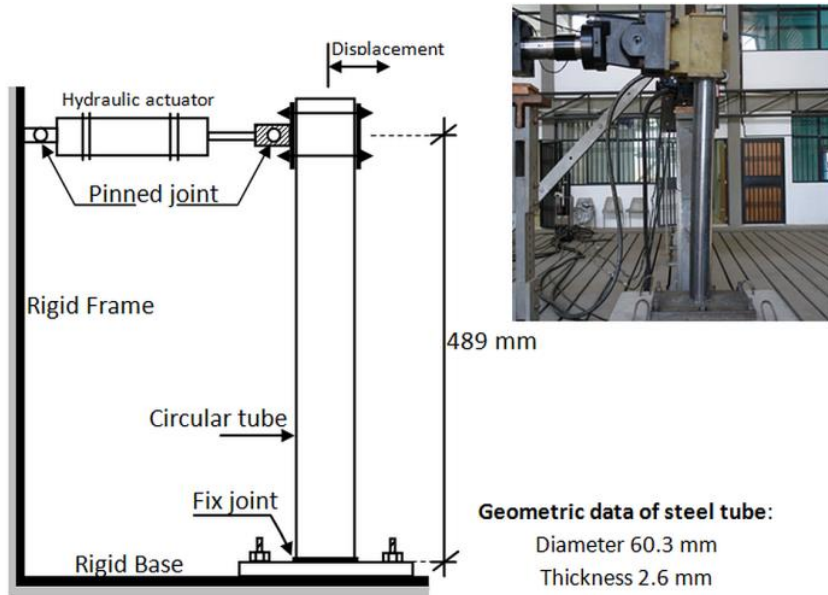
$$\bar{m}_i = \frac{m_i}{1 - d_i}$$

$$f_i = |m_i - c \phi_i^p| - M_u \leq 0$$

$$f_i = \left| \frac{m_i}{1 - d_i} - c \phi_i^p \right| - M_u \leq 0$$

$$\begin{cases} d\phi_i^p = 0 & \text{if } f_i(m_i, d_i) < 0 \text{ (rótula } i \text{ bloqueada)} \\ f_i(m_i, d_i) = 0 & \text{if } d\phi_i^p \neq 0 \text{ (rótula } i \text{ activa)} \end{cases}$$

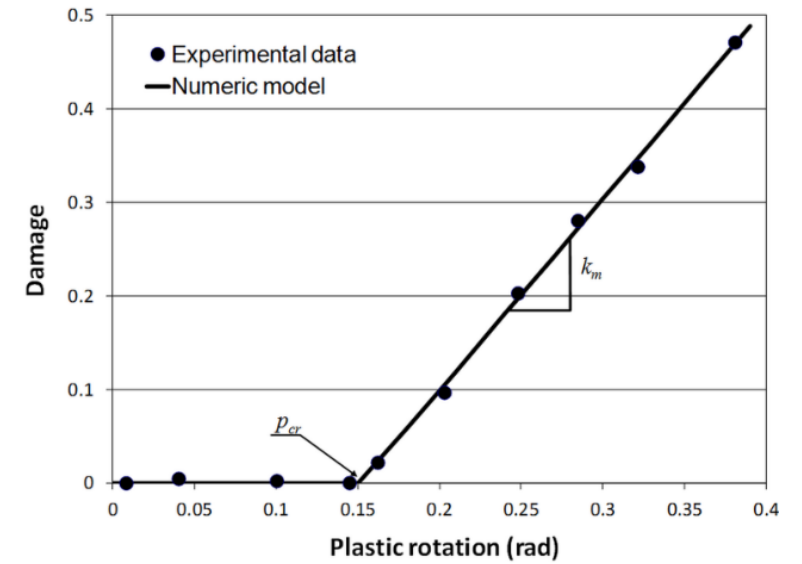
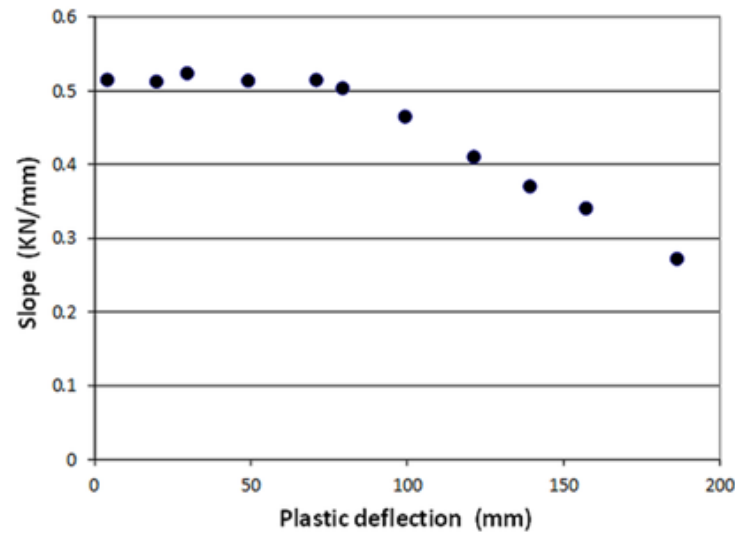
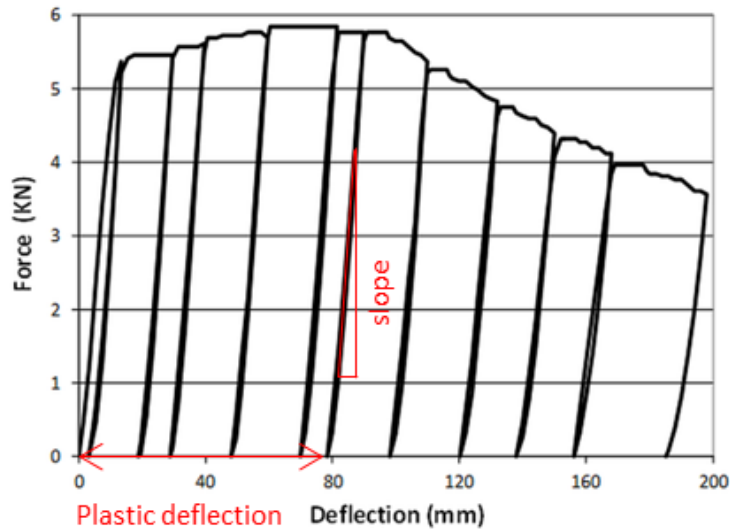
Ley de daño por pandeo local



$$\begin{bmatrix} \frac{F_{11}^0}{(1-d_i)} & F_{12}^0 & F_{13}^0 \\ F_{21}^0 & \frac{F_{22}^0}{(1-d_j)} & F_{23}^0 \\ F_{31}^0 & F_{32}^0 & F_{33}^0 \end{bmatrix}$$



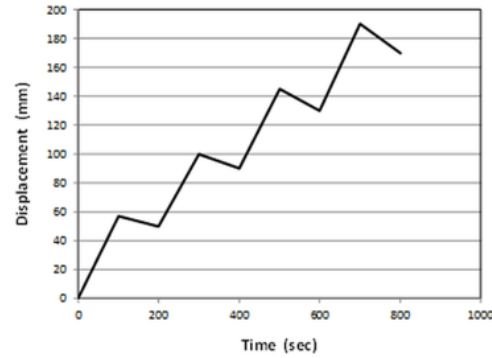
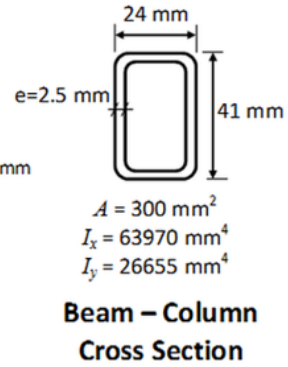
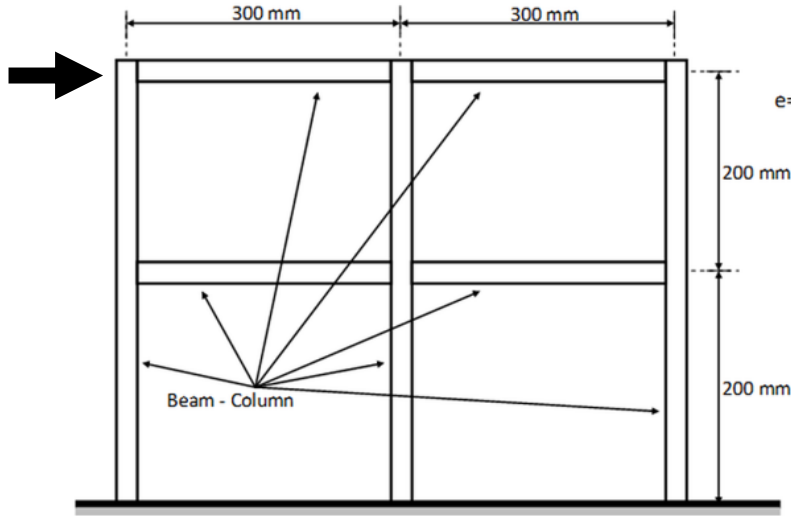
$$\text{Damage} = 1 - \frac{\text{Damaged slope}}{\text{Initial slope}}$$



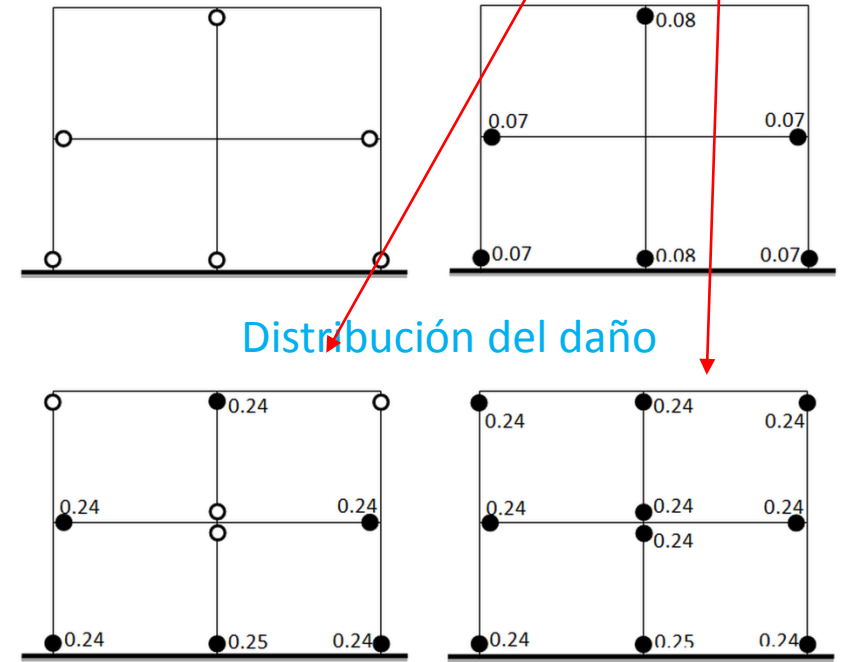
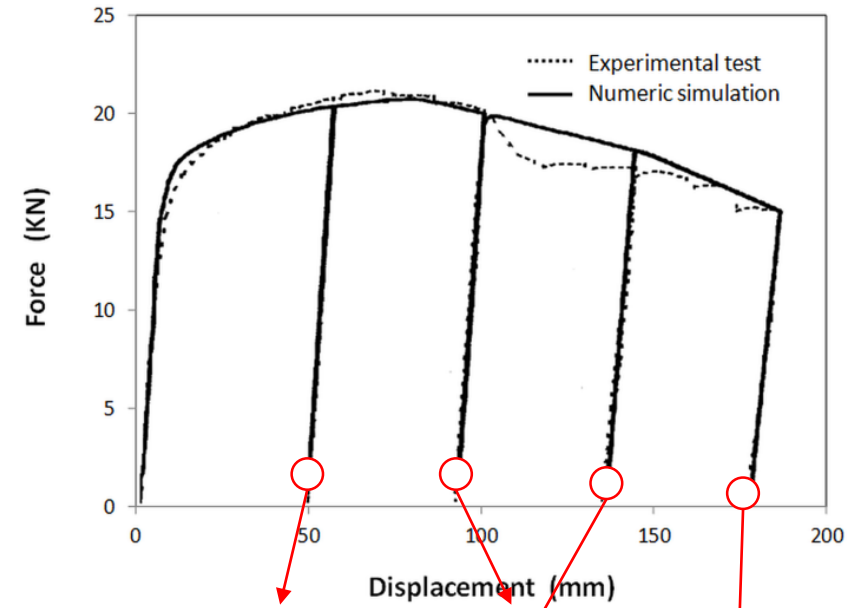
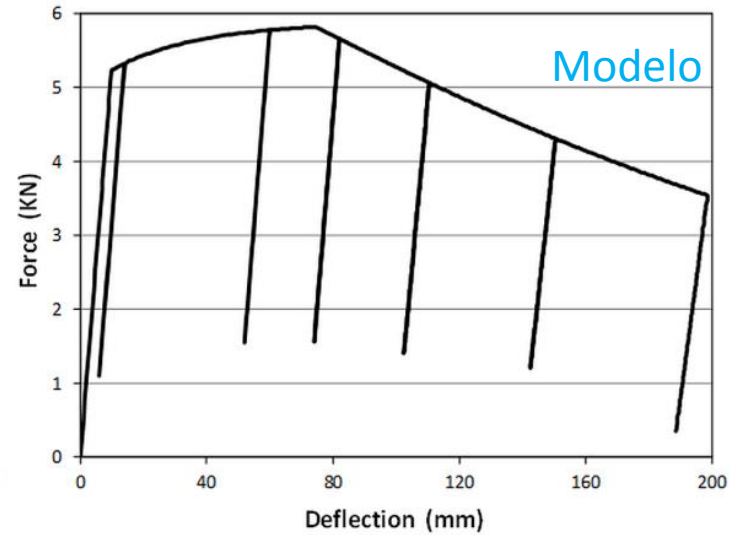
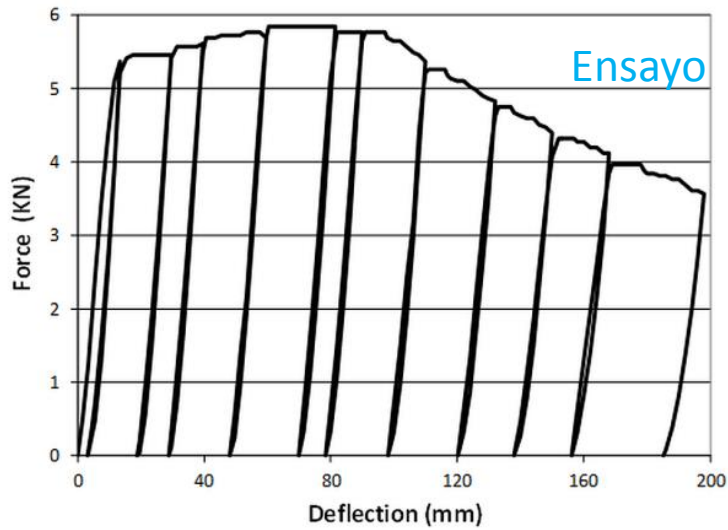
$$d_i = \kappa_m \langle p_i - p_{cr} \rangle$$

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

Simulaciones numéricas

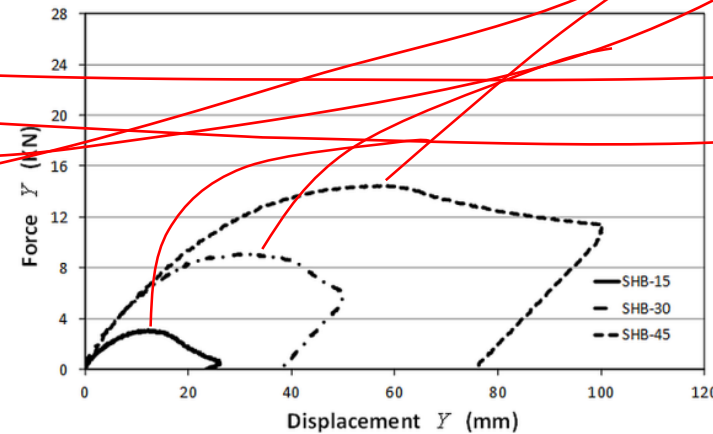
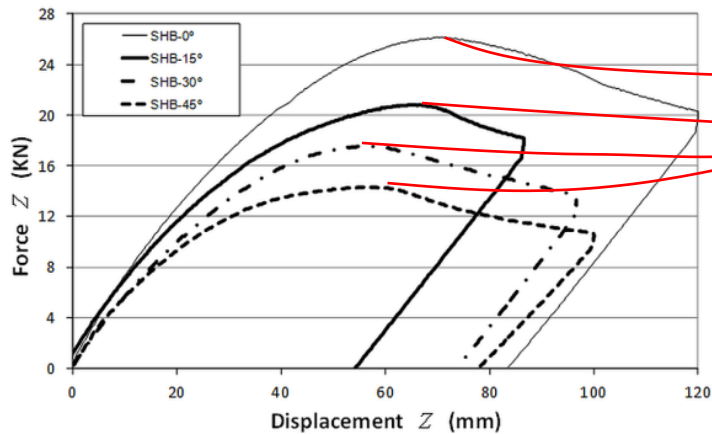
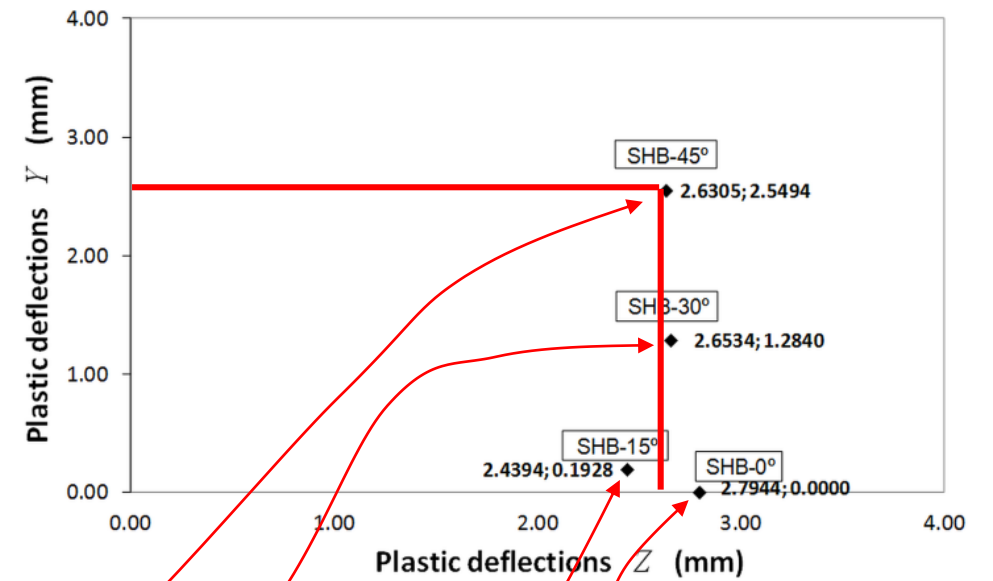
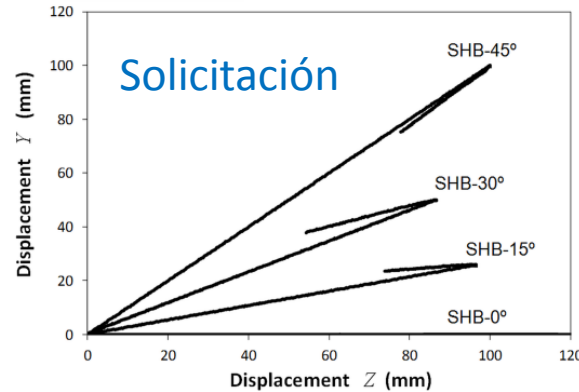
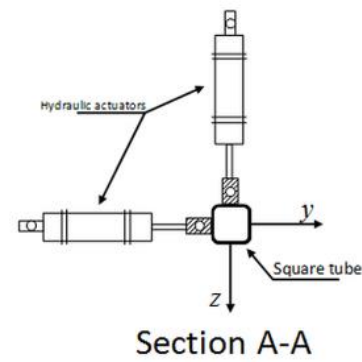
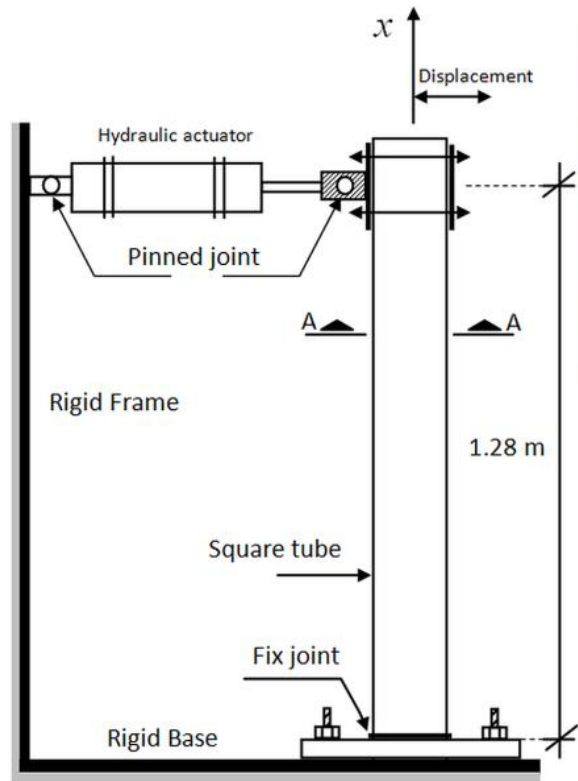


Solicitud

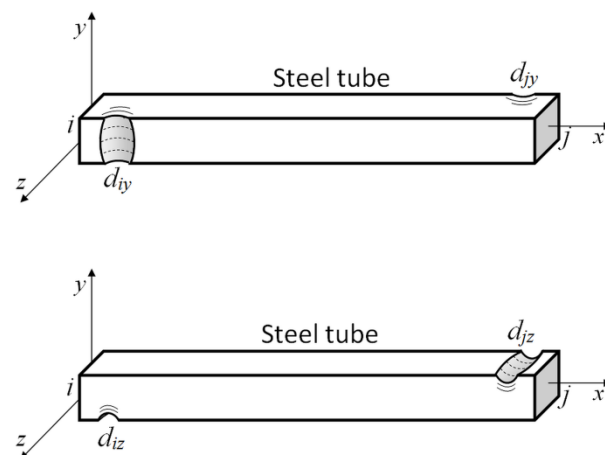
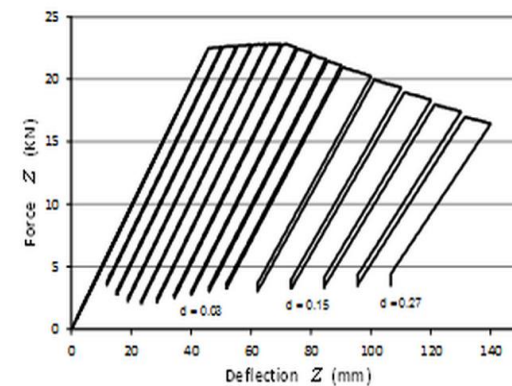
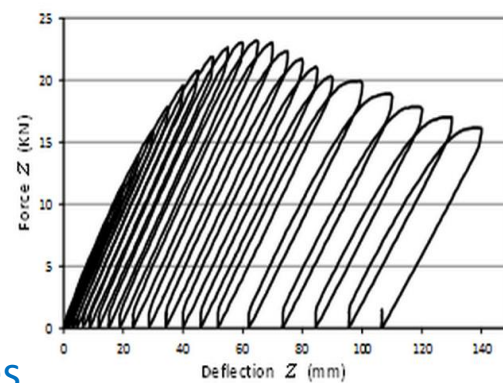
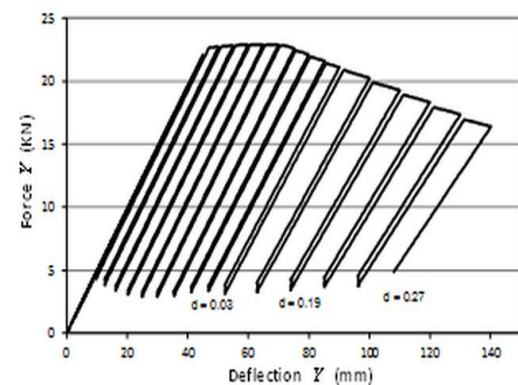
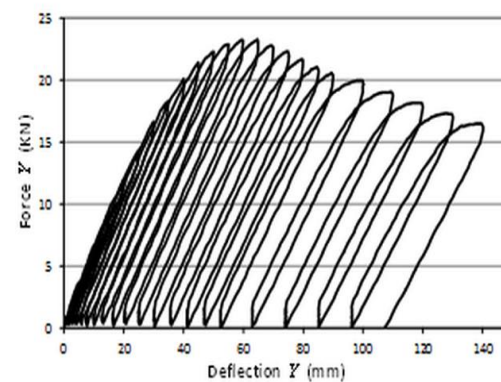
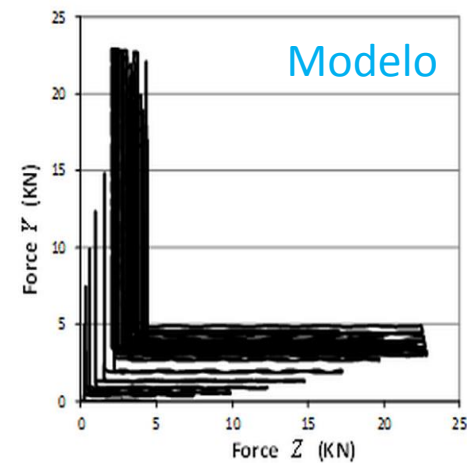
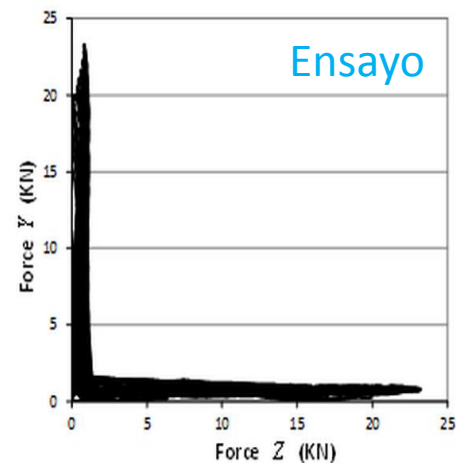
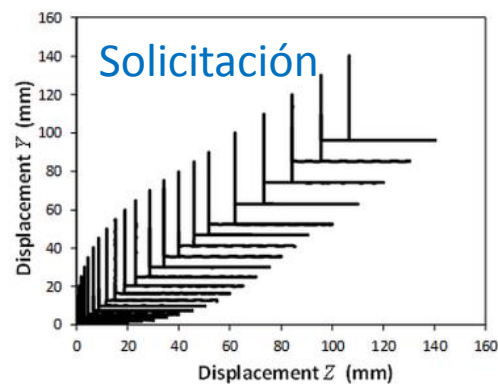
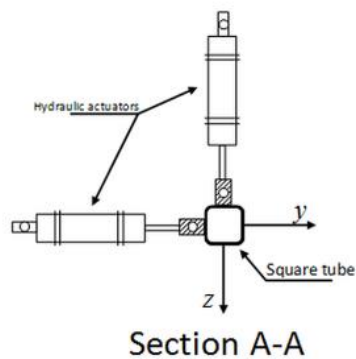
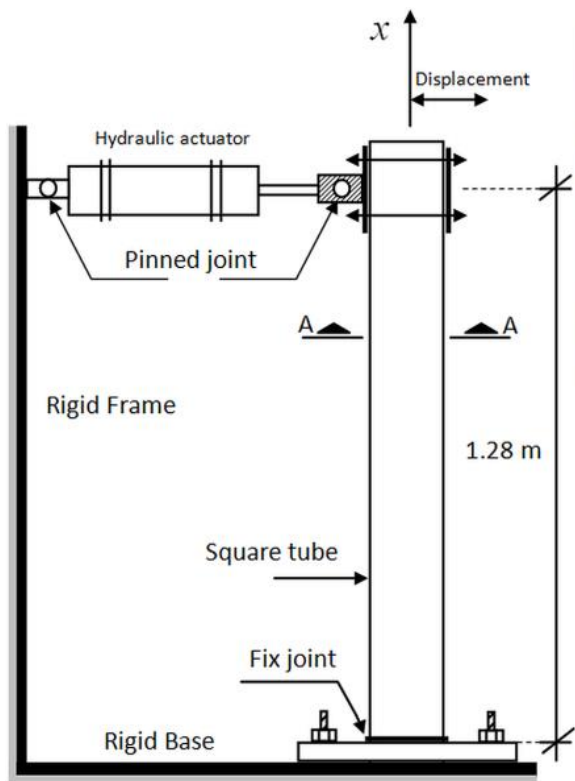


- Plastic hinges with no damage
- Plastic hinges with local buckling

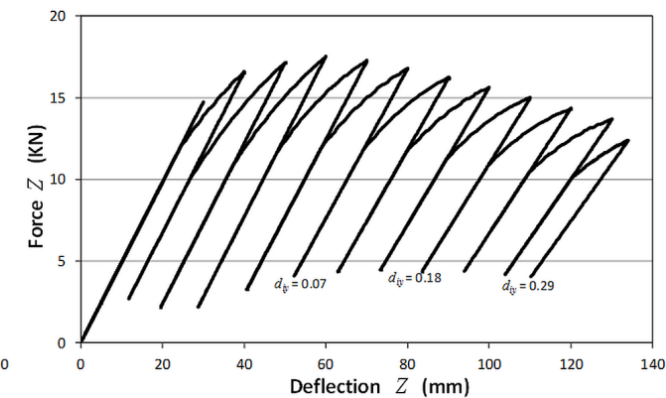
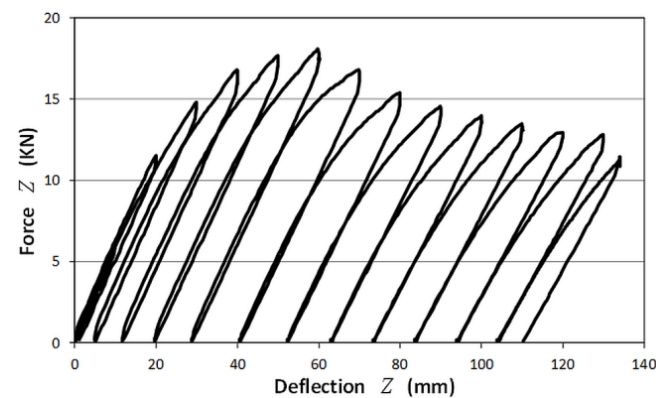
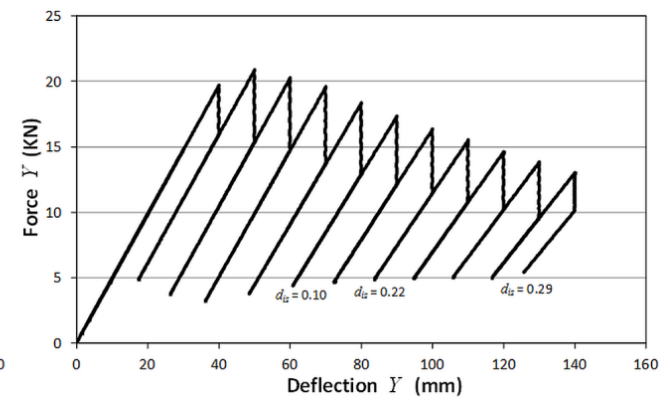
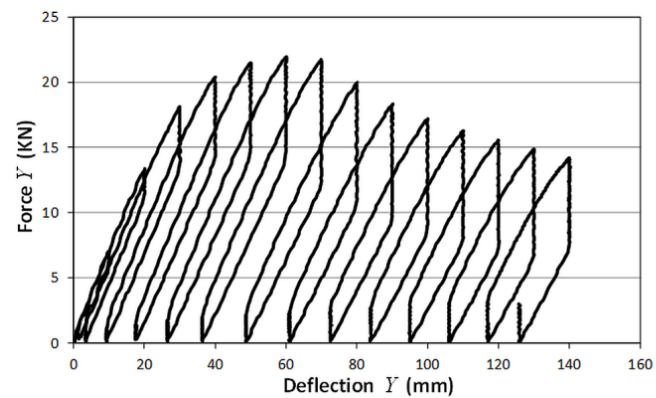
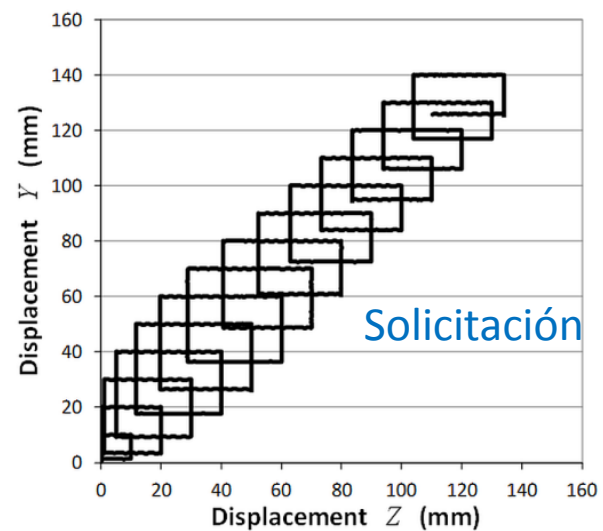
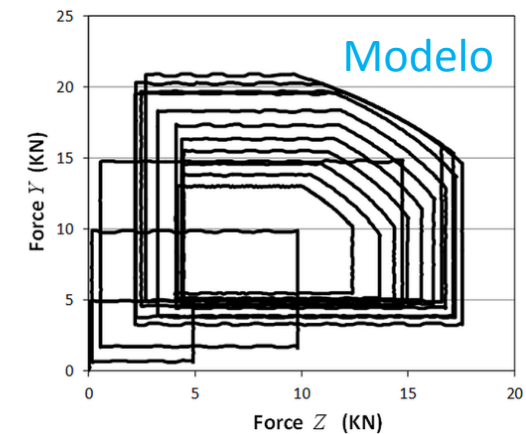
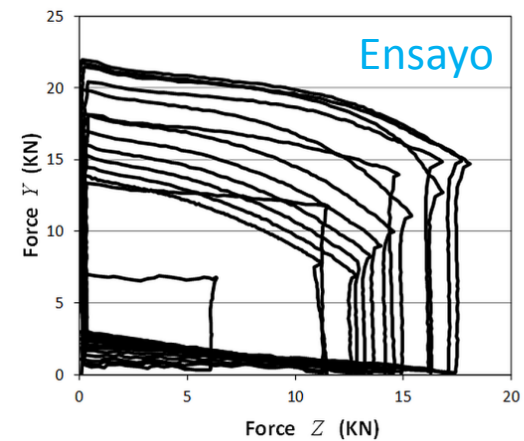
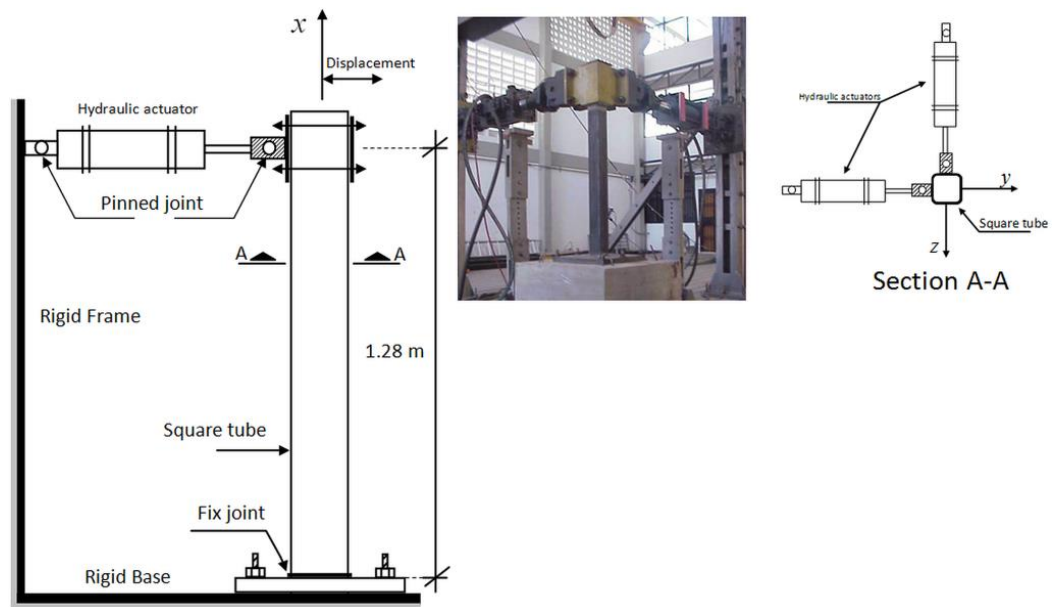
Modelado del pandeo local bajo cargas biaxiales: influencia de la fuerza perpendicular en la evolución del daño



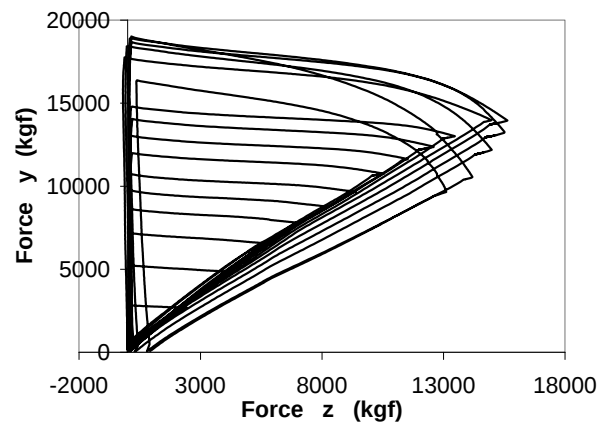
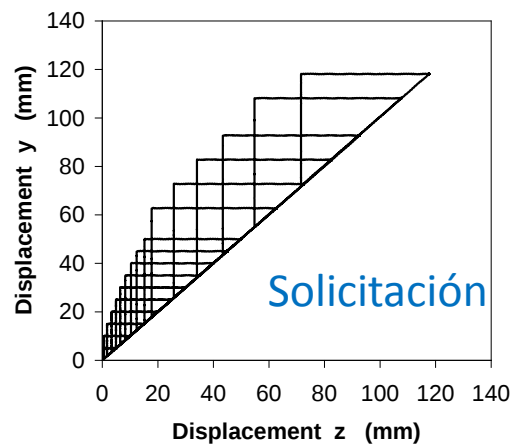
$$d_{iz} = \kappa \langle p_{iz} - p_{cr} \rangle$$



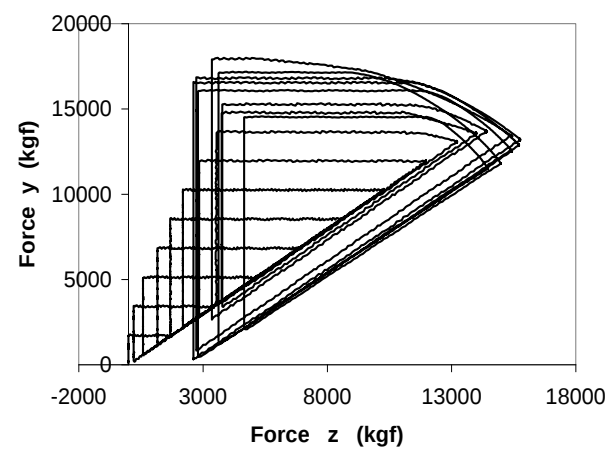
Modelado bajo solicitaciones biaxiales



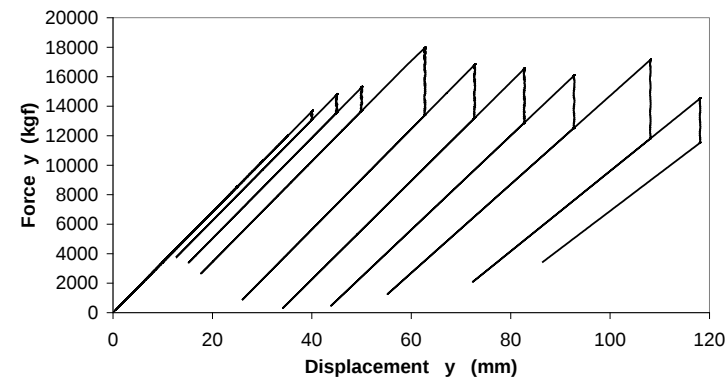
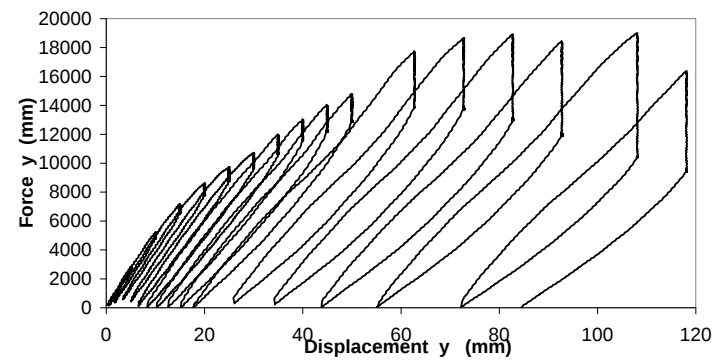
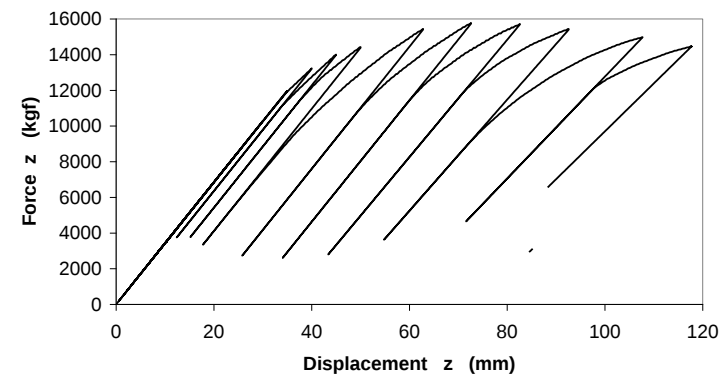
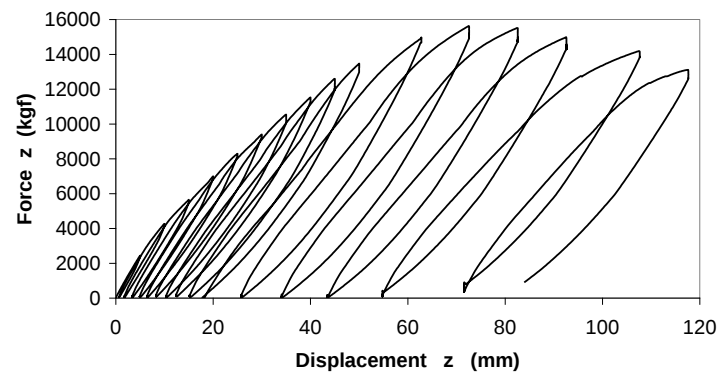


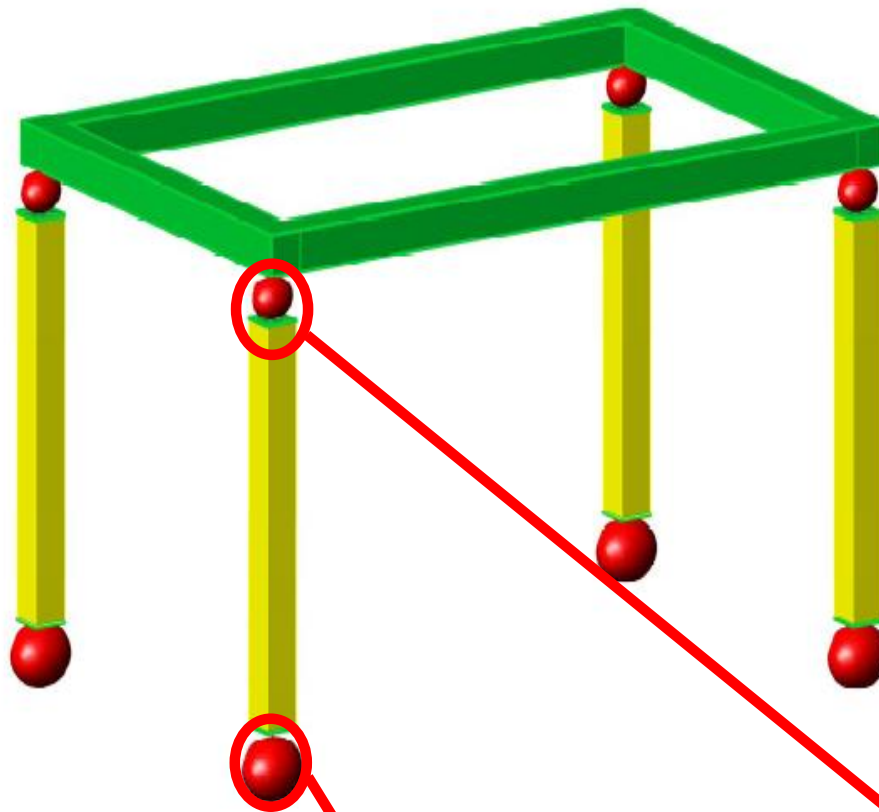


Ensayo



Modelo





$$0.10 < d_z < 0.15$$



$$0.15 < d_y < 0.20$$

$$0.05 < d_z < 0.10$$



$$0.10 < d_y < 0.15$$

$$0.03 < d_z < 0.05$$

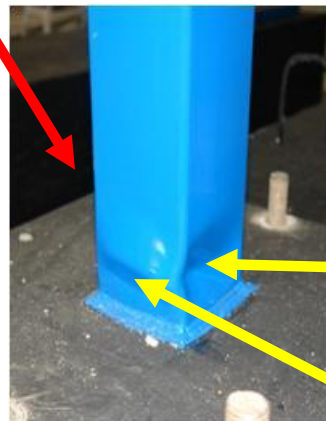


$$0.05 < d_y < 0.10$$

$$d_z < 0.03$$



$$d_y < 0.05$$



$$d_{iy} = 0.15$$

$$d_{iz} = 0.19$$



$$d_{jy} = 0.10$$

$$d_{jz} = 0.12$$

Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

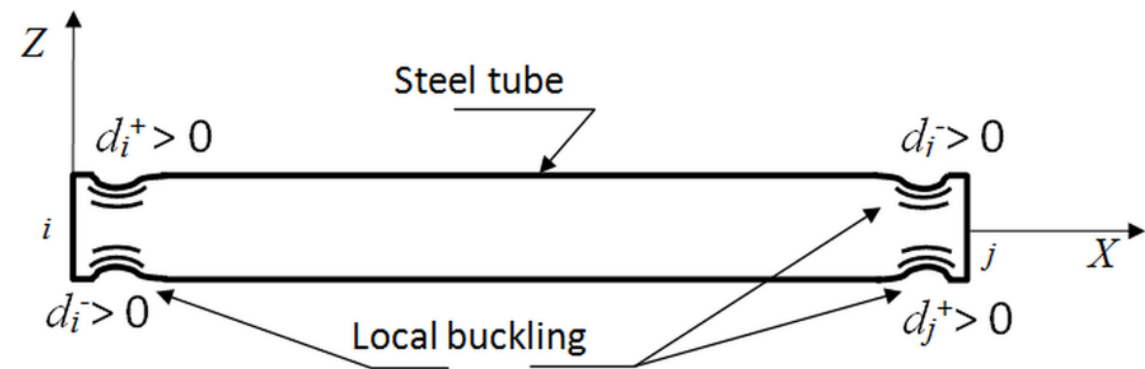
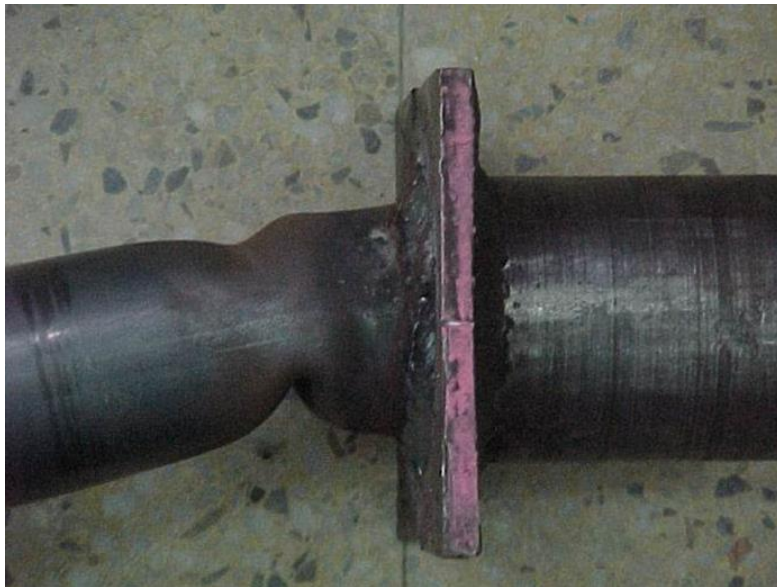
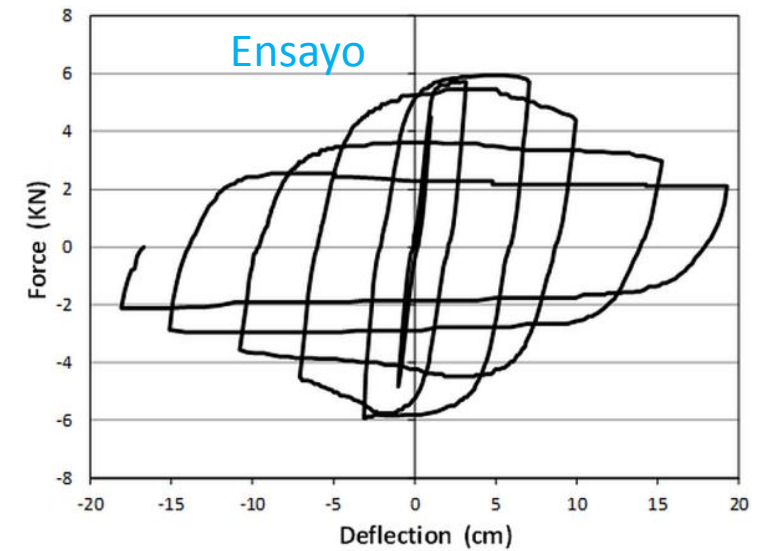
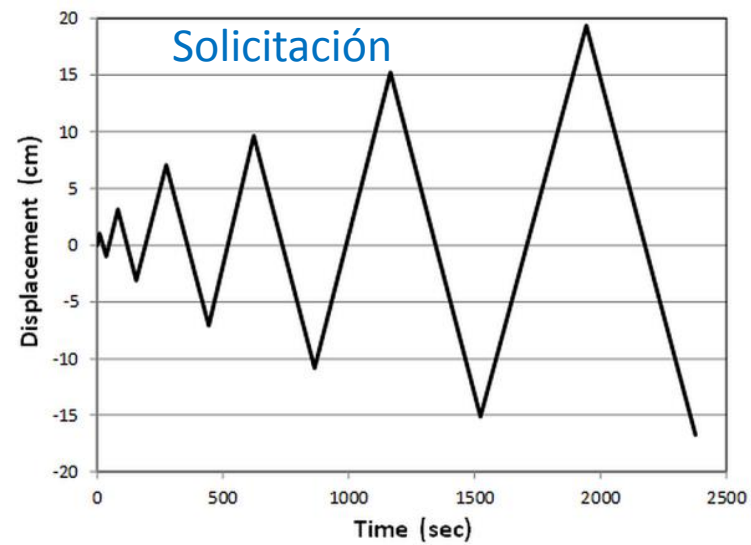
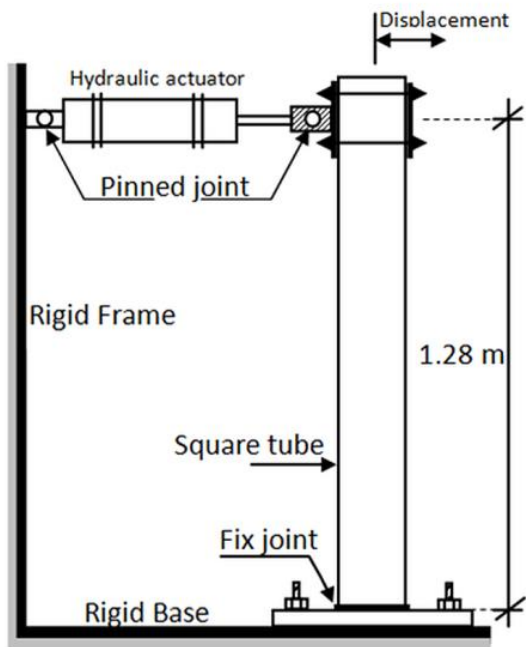
Conceptos fundamentales de teoría del daño continuo

Modelado del pandeo local bajo solicitaciones monotónicas

Modelado del pandeo local bajo cargas cíclicas

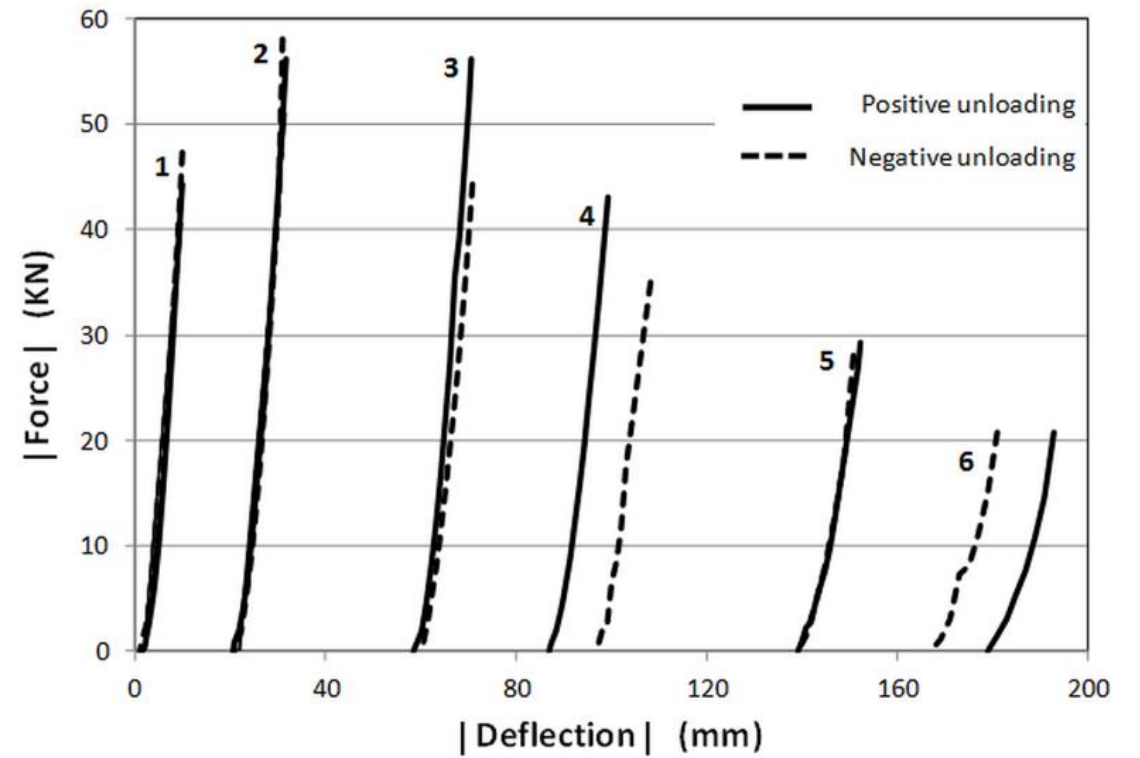
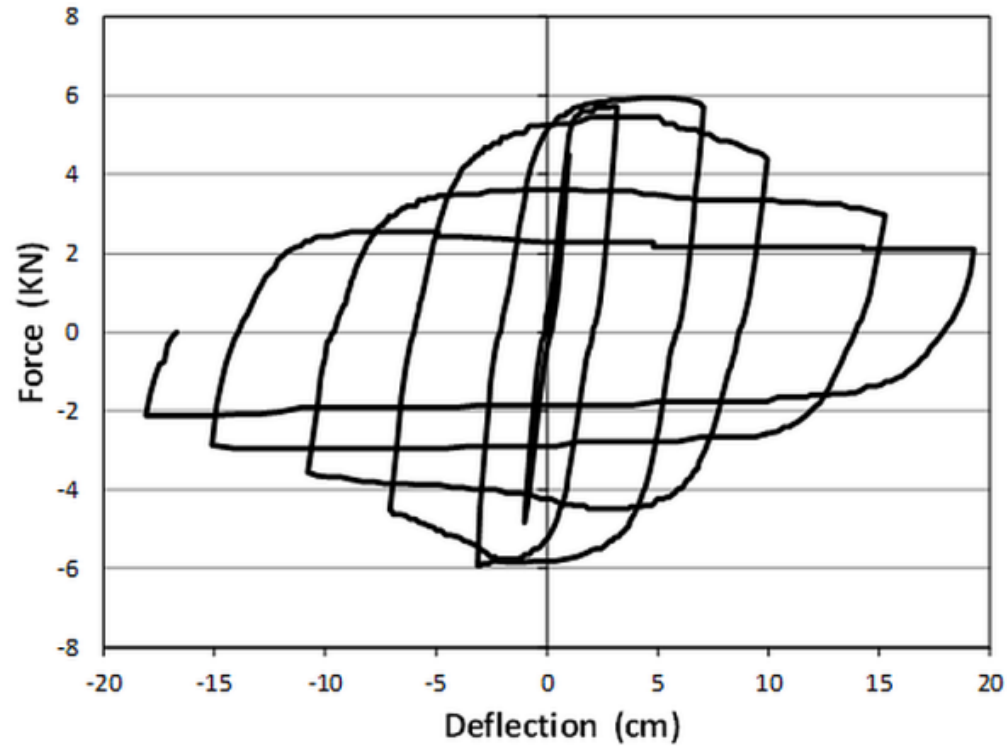
Modelado de la propagación de fisuras bajo solicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

Observaciones finales



$$(\mathbf{D}^+)_b = (d_i^+, d_j^+) \quad (\mathbf{D}^-)_b = (d_i^-, d_j^-)$$

Ley de elasticidad



$$\{\Phi\}_b - \{\Phi^p\}_b = [\mathbf{F}(\mathbf{D}^+)] \langle \mathbf{M} \rangle_b^+ + [\mathbf{F}(\mathbf{D}^-)] \langle \mathbf{M} \rangle_b^-$$

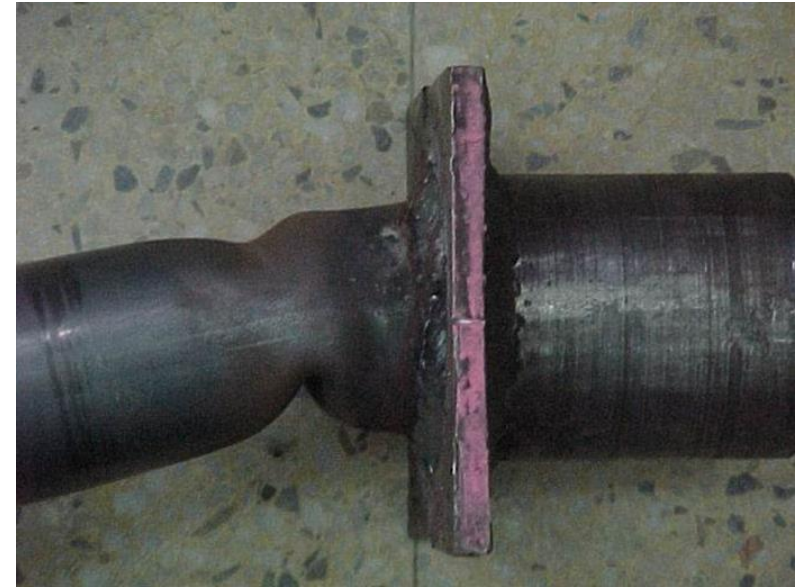
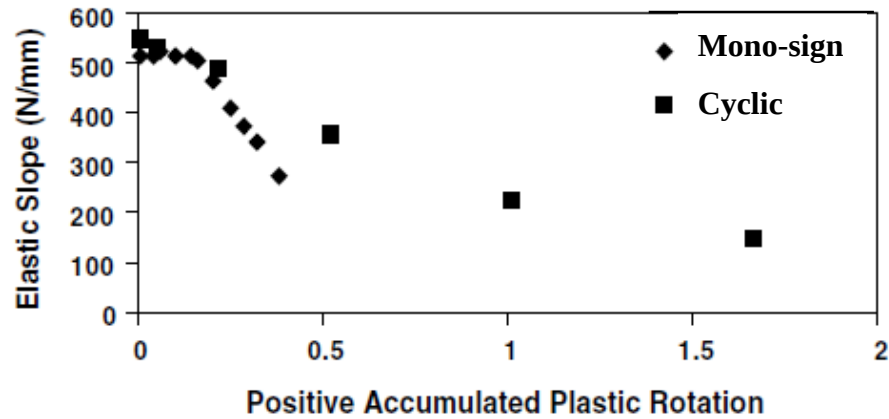
$$[\mathbf{F}(\mathbf{D}^{+/-})] = \begin{bmatrix} \frac{L_b}{3EI_b(1-d_i^{+/-})} & -\frac{L_b}{6EI_b} & 0 \\ -\frac{L_b}{6EI_b} & \frac{L_b}{3EI_b(1-d_j^{+/-})} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L_b}{EA_b} \end{bmatrix}$$

Ley de plasticidad

$$\begin{cases} d\phi_i^p = 0 & \text{if } f_i < 0 \text{ (hinge } i \text{ locked)} \\ f_i = 0 & \text{if } d\phi_i^p \neq 0 \text{ (hinge } i \text{ active)} \end{cases}$$

$$f_i = \text{Max} \left(\frac{m_i}{1-d_i^+} - M_u, -\frac{m_i}{1-d_i^-} - M_u \right) \leq 0$$

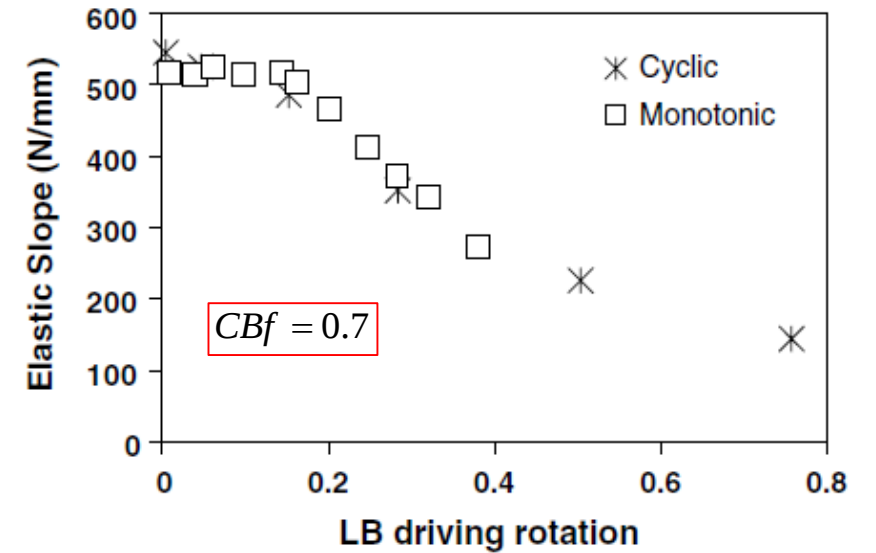
Contra pandear = “planchar la arruga”



Rotación extensora del pandeo local positivo

$$db_i^+ = \langle d\phi_i^p \rangle_+ + CBf \langle d\phi_i^p \rangle_- \quad \text{if } b_i^+ \geq 0; \quad db_i^+ = 0 \quad \text{otherwise}$$

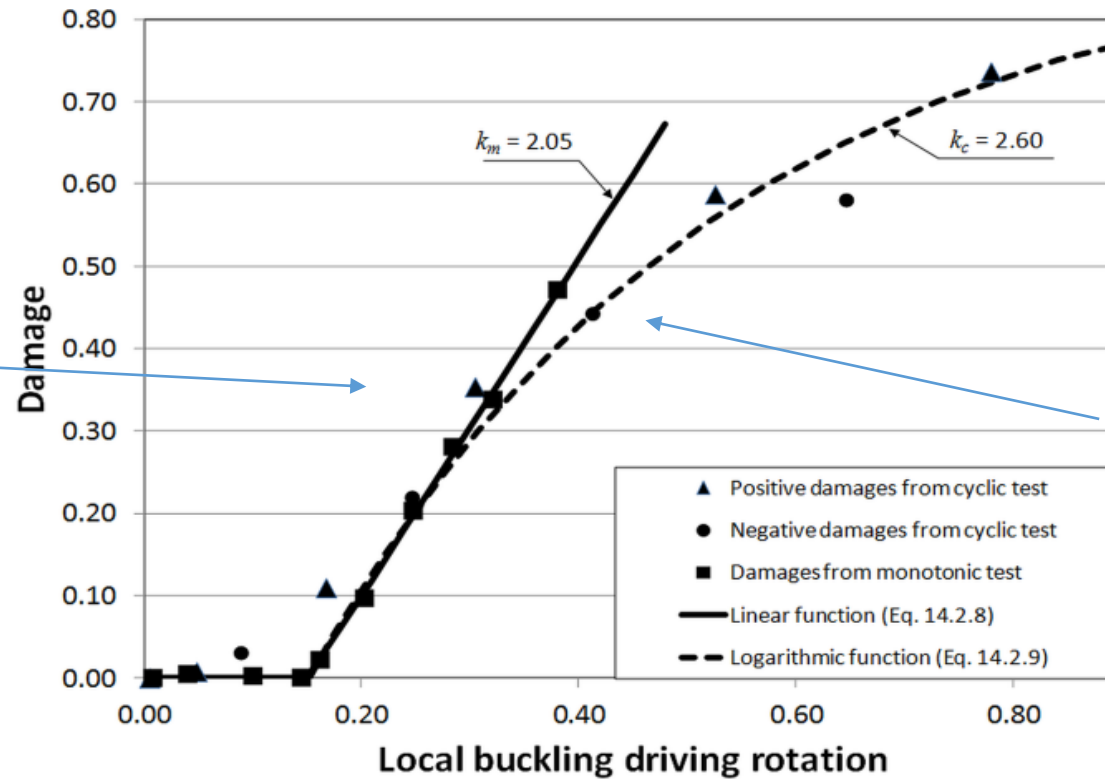
Factor de contra pandeo



Ley de daño

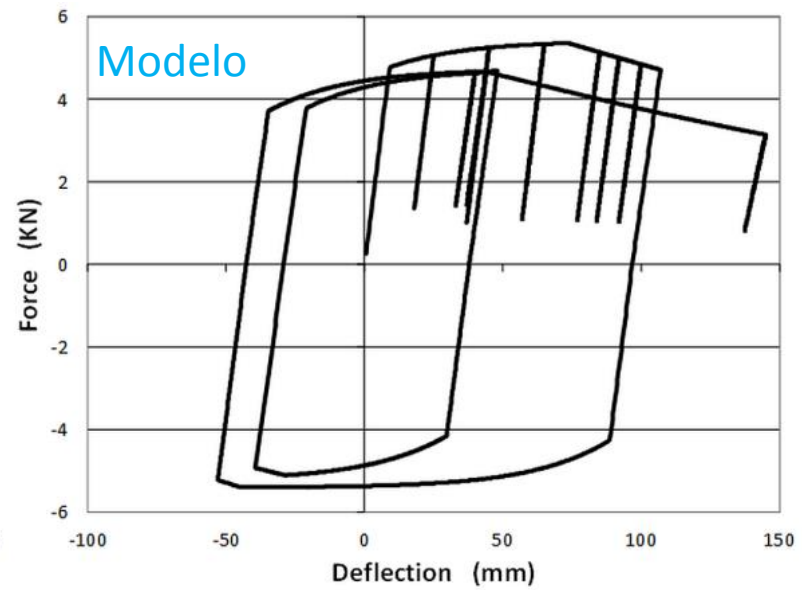
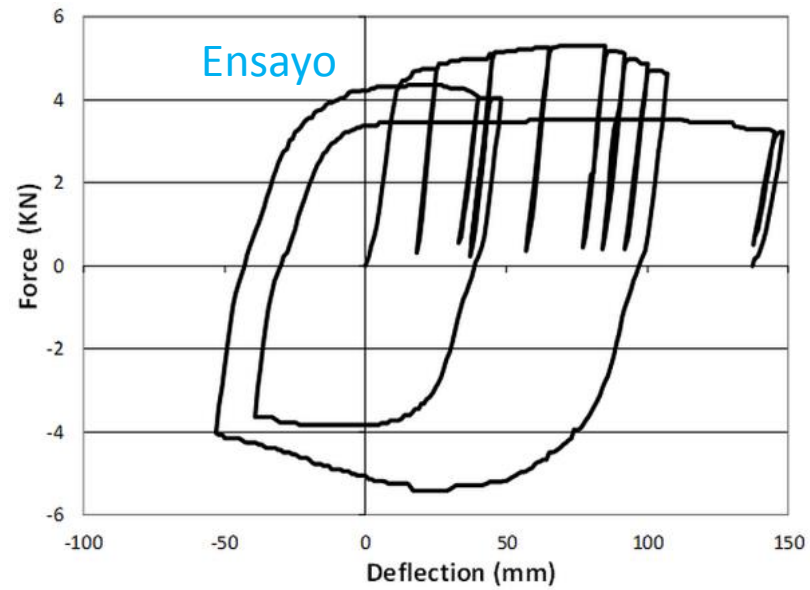
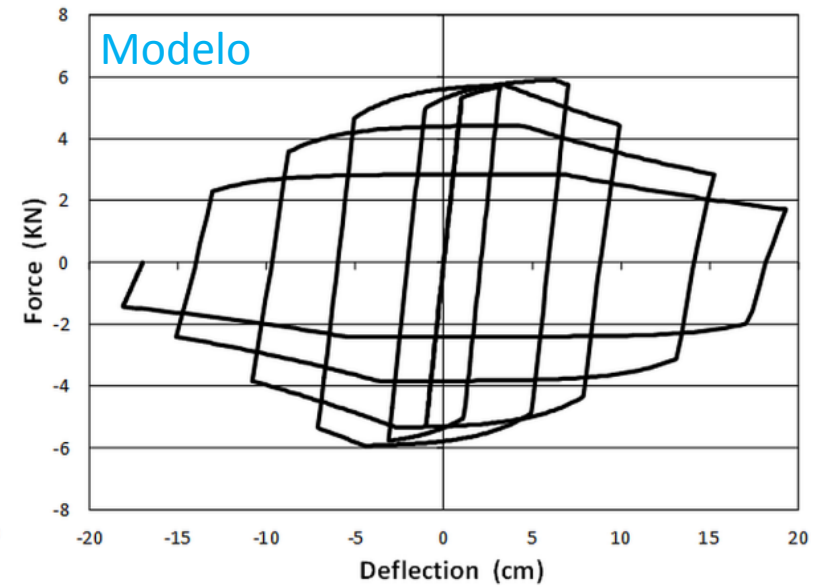
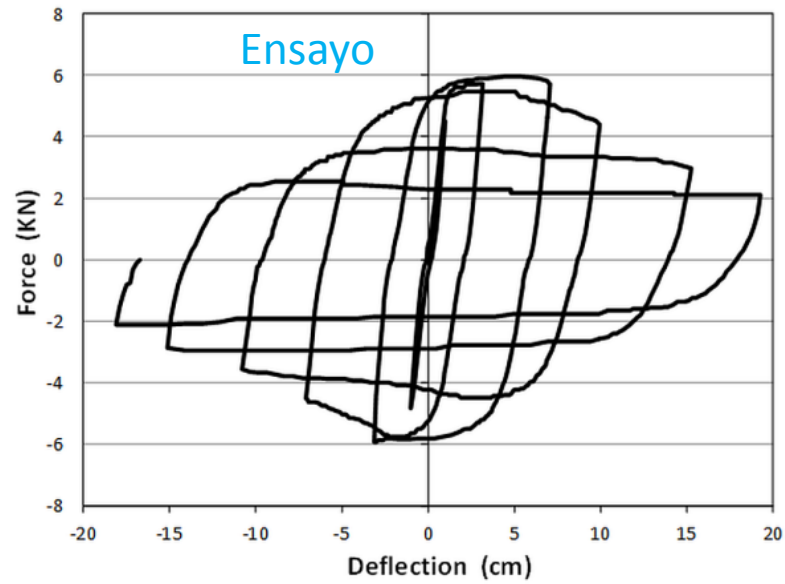
$$\begin{cases} \Delta d_i^+ = 0 & \text{if } b_i^+ < R(d_i^+) \\ b_i^+ = R(d_i^+) & \text{if } \Delta d_i^+ > 0 \end{cases}$$

$$R(d_{i/j}^{+/-}) = p_{cr} + \frac{d_{i/j}^{+/-}}{\kappa_m}$$

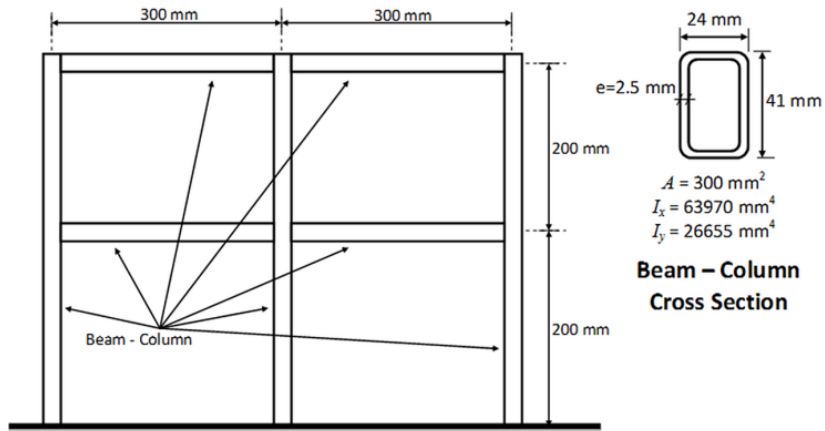


$$R(d_{i/j}^{+/-}) = p_{cr} - \frac{1}{\kappa_c} \ln \left(1 - \frac{d_{i/j}^{+/-}}{0.9} \right)$$

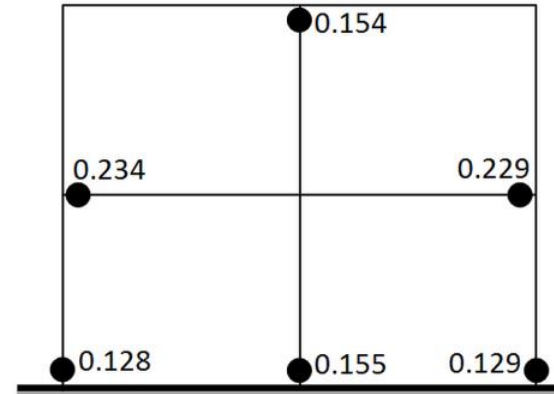
Simulaciones numéricas



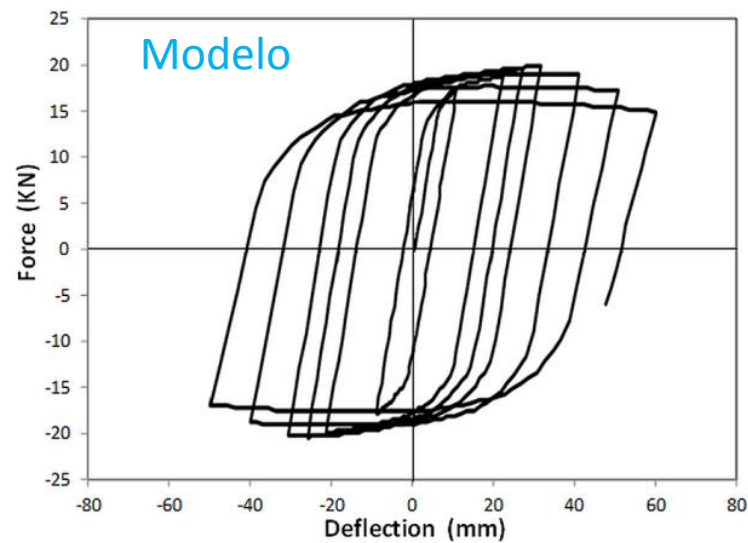
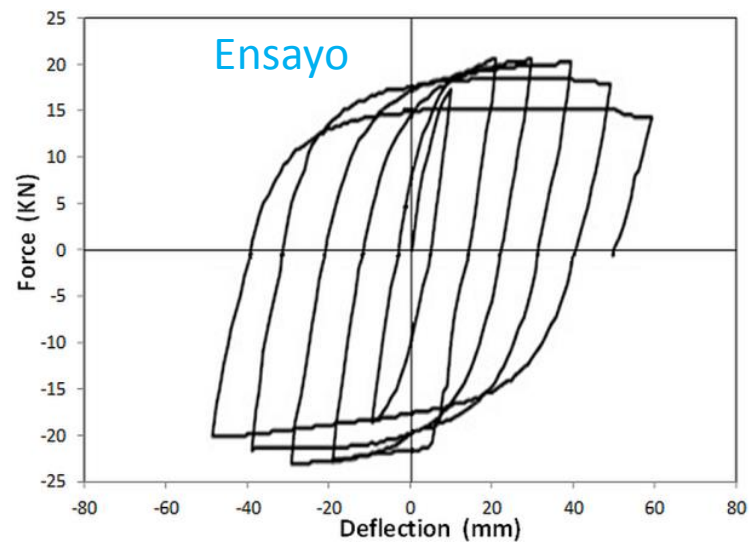
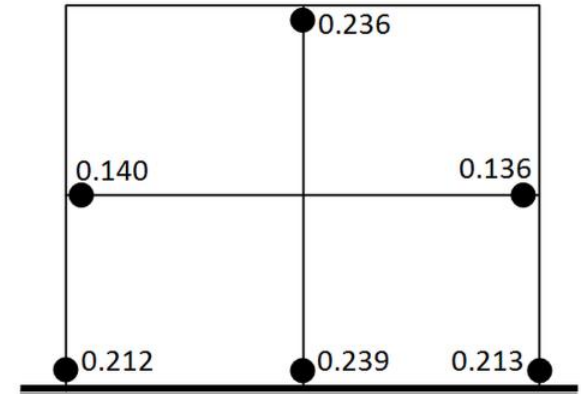
Simulaciones numéricas



Daño positivo



Daño negativo



Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

Modelado de la propagación de fisuras bajo sollicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

- Ley de Coffin-Manson para fatiga de ultra bajo ciclaje

- La regla de Palmgren-Miner

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula plástica

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula inelástica

- Modelo de daño para vigas sometidas a fatiga de ultra bajo ciclaje

- Evolución del daño en ensayos de fatiga con diferentes amplitudes

- Evolución del daño en fatiga no estacionaria

- Fatiga unilateral

Observaciones finales



Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

Modelado de la propagación de fisuras bajo solicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

Ley de Coffin-Manson para fatiga de ultra bajo ciclaje

La regla de Palmgren-Miner

Ley de Coffin-Manson law en una rótula plástica

Ley de Coffin-Manson law en una rótula inelástica

Modelo de daño para vigas sometidas a fatiga de ultra bajo ciclaje

Evolución del daño en ensayos de fatiga con diferentes amplitudes

Evolución del daño en fatiga no estacionaria

Fatiga unilateral

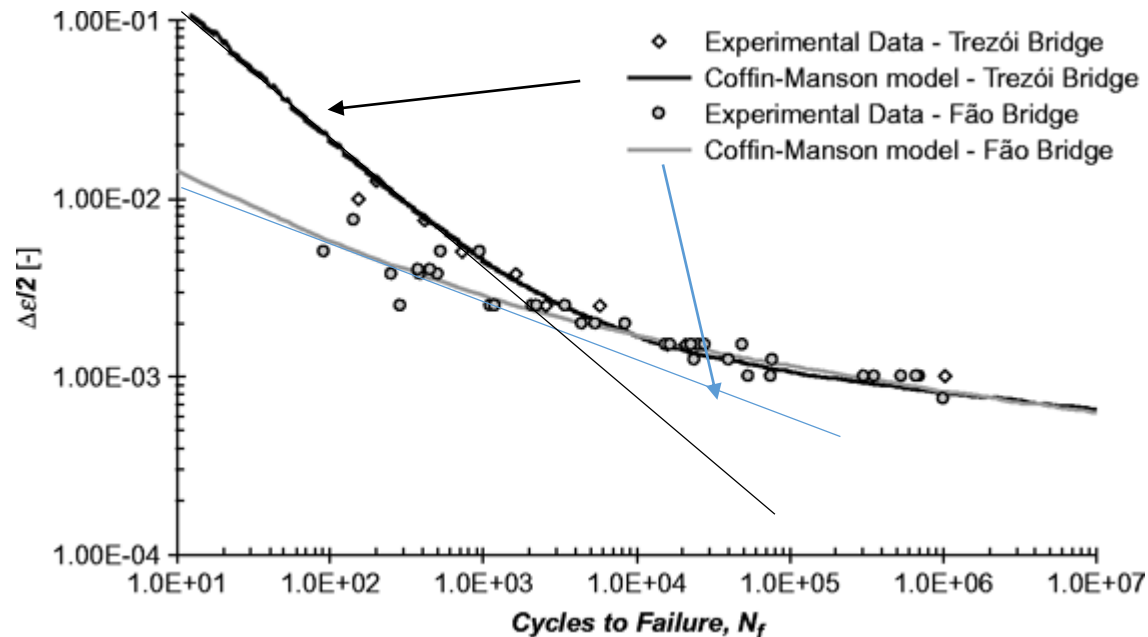
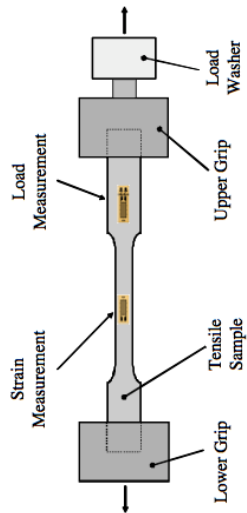
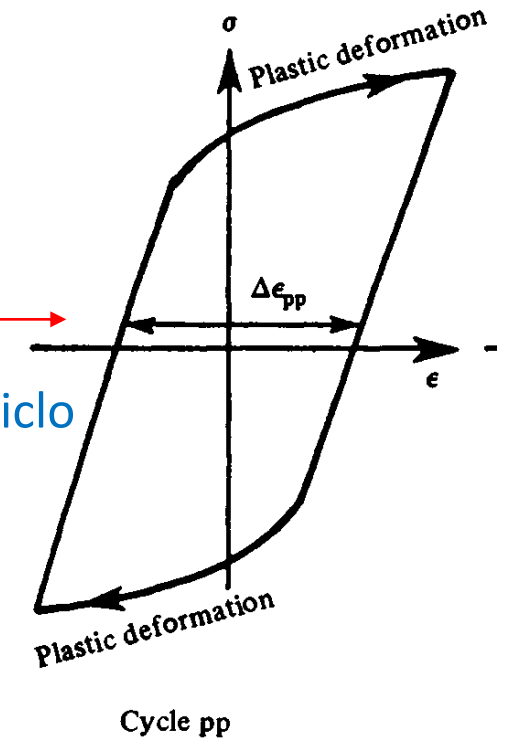
Observaciones finales

Ley de Coffin-Masson:

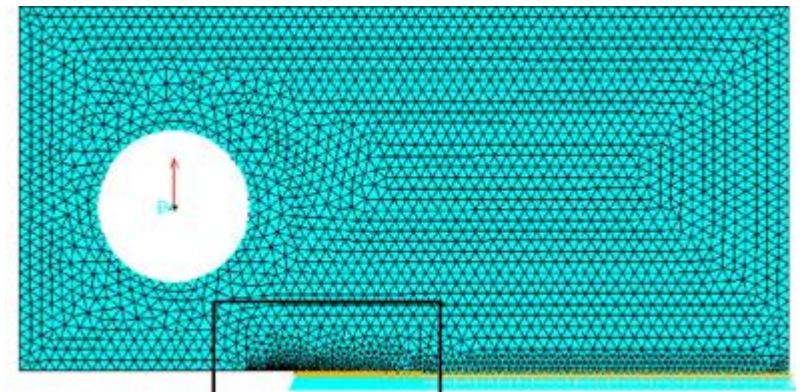
Número de ciclos a fractura:

$$N = \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f} \right)^\beta$$

ε_f y β son constantes empíricas y $2\Delta\varepsilon_p$ el incremento de deformación plástica por ciclo



La ley de Coffin-Masson se utiliza en el contexto de la mecánica del continuo

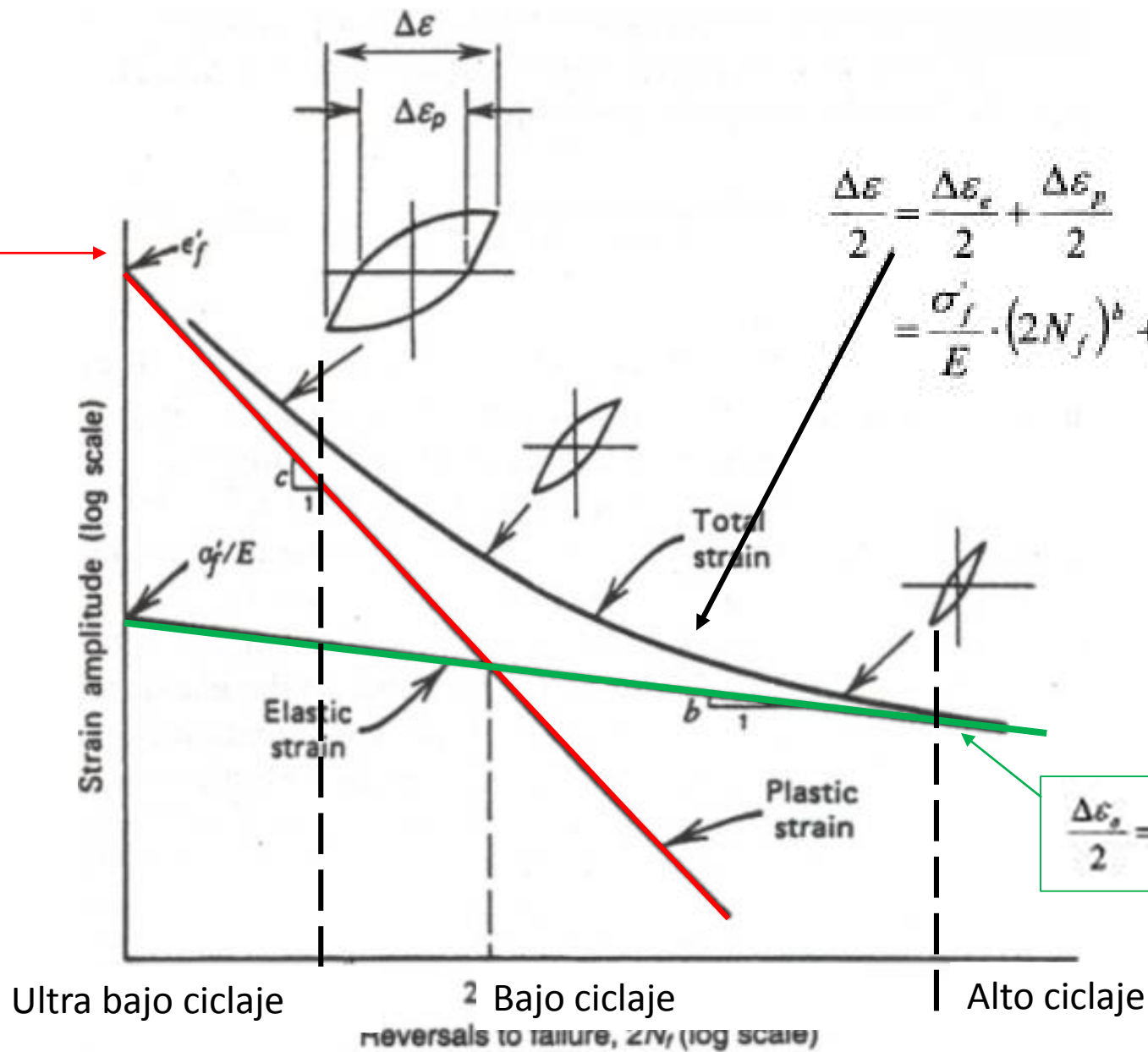


Manson-Coffin

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f \cdot (2N_f)^c$$

Manson-Coffin-Basquin

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \varepsilon}{2} &= \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \\ &= \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \end{aligned}$$



$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2N_f)^b$$

Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

Modelado de la propagación de fisuras bajo sollicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

- Ley de Coffin-Manson para fatiga de ultra bajo ciclaje

- La regla de Palmgren-Miner

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula plástica

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula inelástica

- Modelo de daño para vigas sometidas a fatiga de ultra bajo ciclaje

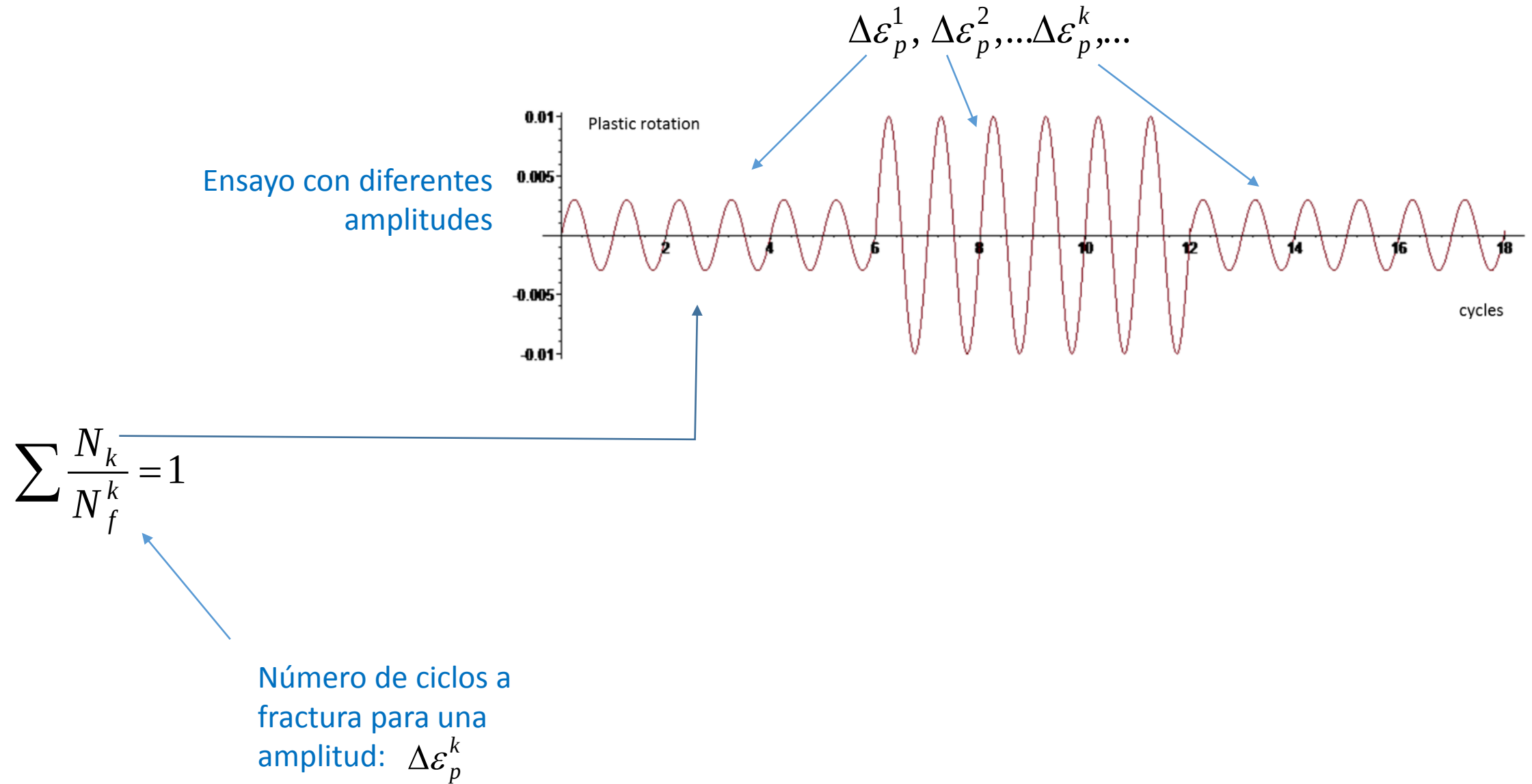
- Evolución del daño en ensayos de fatiga con diferentes amplitudes

- Evolución del daño en fatiga no estacionaria

- Fatiga unilateral

Observaciones finales

Regla de Palmgren-Miner



Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

Modelado de la propagación de fisuras bajo sollicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

- Ley de Coffin-Manson para fatiga de ultra bajo ciclaje

- La regla de Palmgren-Miner

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula plástica

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula inelástica

- Modelo de daño para vigas sometidas a fatiga de ultra bajo ciclaje

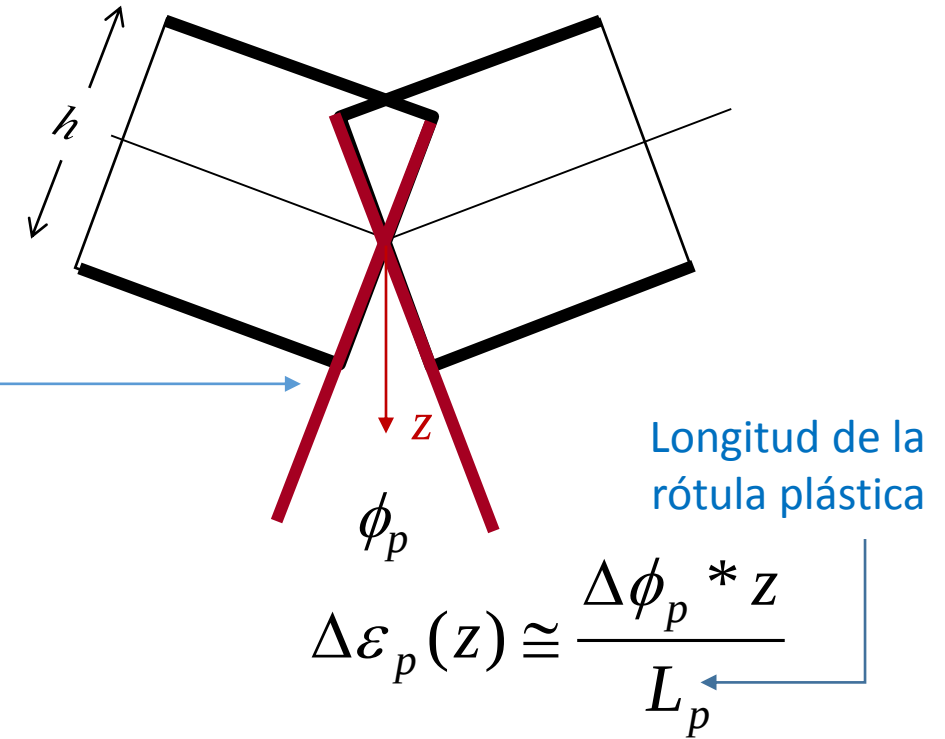
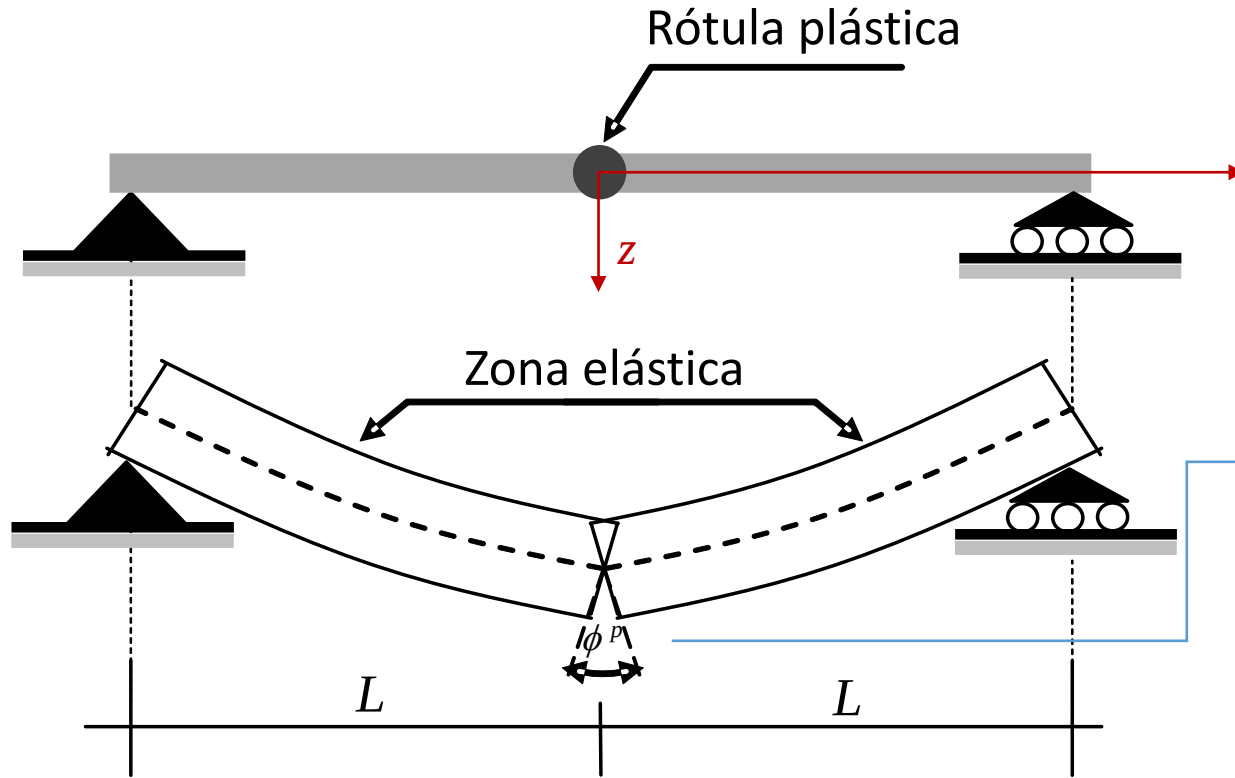
- Evolución del daño en ensayos de fatiga con diferentes amplitudes

- Evolución del daño en fatiga no estacionaria

- Fatiga unilateral

Observaciones finales

Ley de Coffin-Manson en una rótula plástica



$$N = \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_f} \right)^\beta$$

$$N(z) \cong \left(\frac{z \Delta \phi_p}{L_p \varepsilon_f} \right)^\beta$$

$$N_{cr} \cong \left(\frac{h \Delta \phi_p}{2 L_p \varepsilon_f} \right)^\beta = \left(\frac{\Delta \phi_p}{\phi_{cr}} \right)^\beta$$

Número de ciclos para iniciar la grieta

Rotación plástica para iniciar la grieta en un ciclo

Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

Modelado de la propagación de fisuras bajo sollicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

- Ley de Coffin-Manson para fatiga de ultra bajo ciclaje

- La regla de Palmgren-Miner

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula plástica

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula inelástica

- Modelo de daño para vigas sometidas a fatiga de ultra bajo ciclaje

- Evolución del daño en ensayos de fatiga con diferentes amplitudes

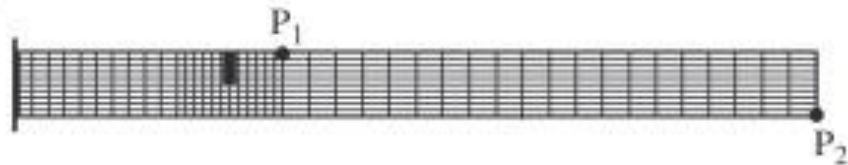
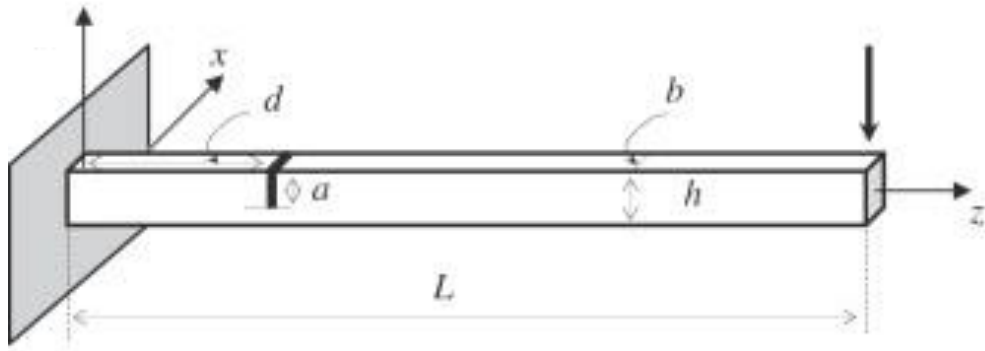
- Evolución del daño en fatiga no estacionaria

- Fatiga unilateral

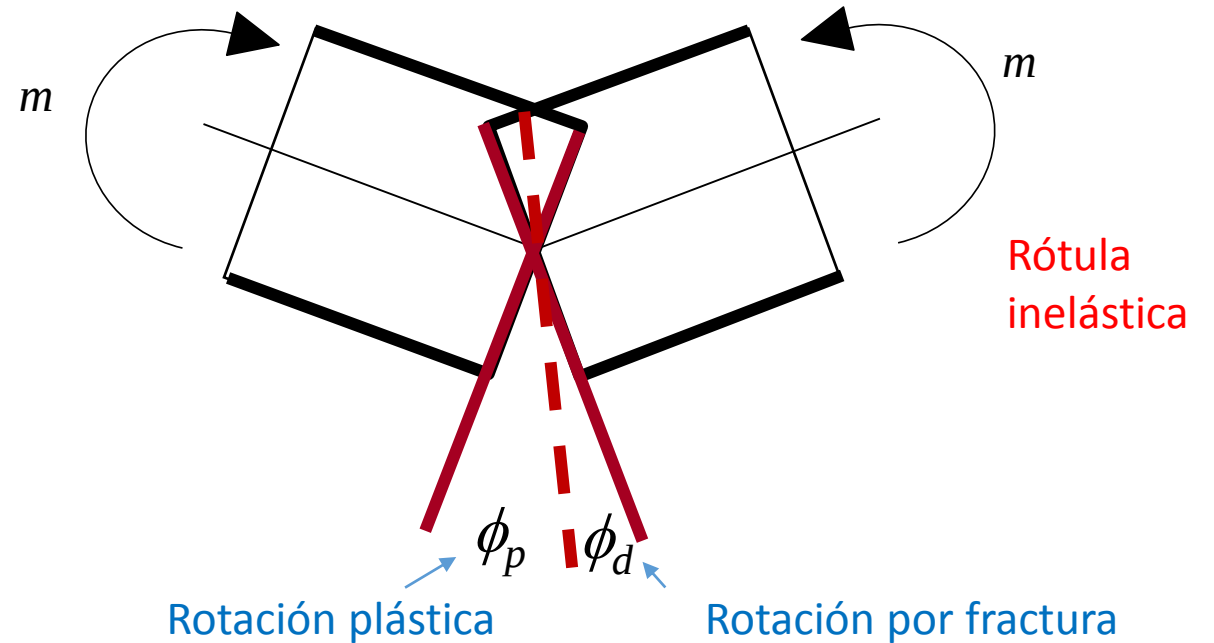
Observaciones finales

Después de N_{cr} la rótula no es plástica sino inelástica

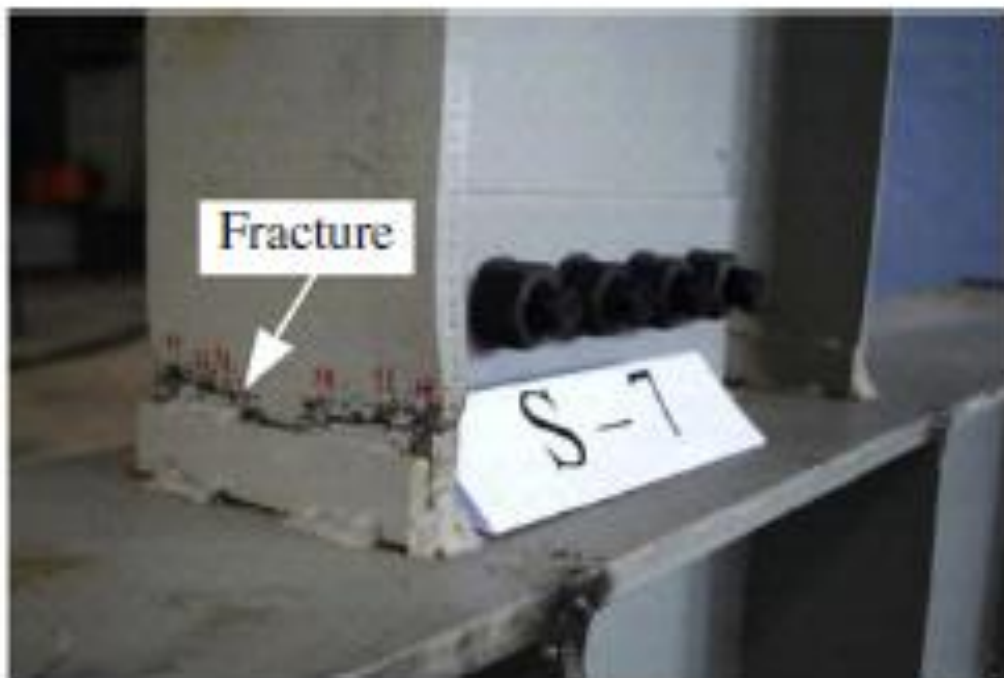
TCD: alternativa para el modelado



Rótula inelástica (ϕ_p and d)

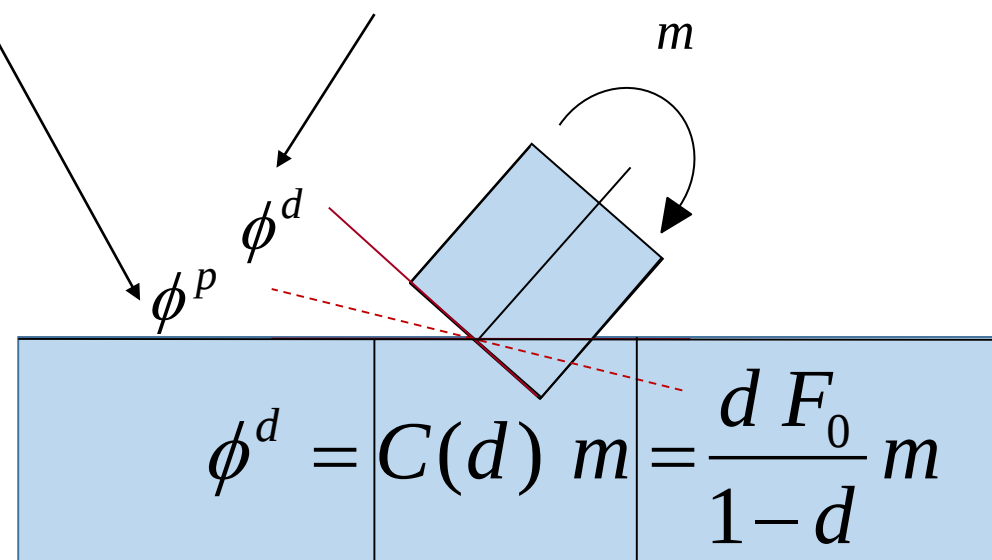


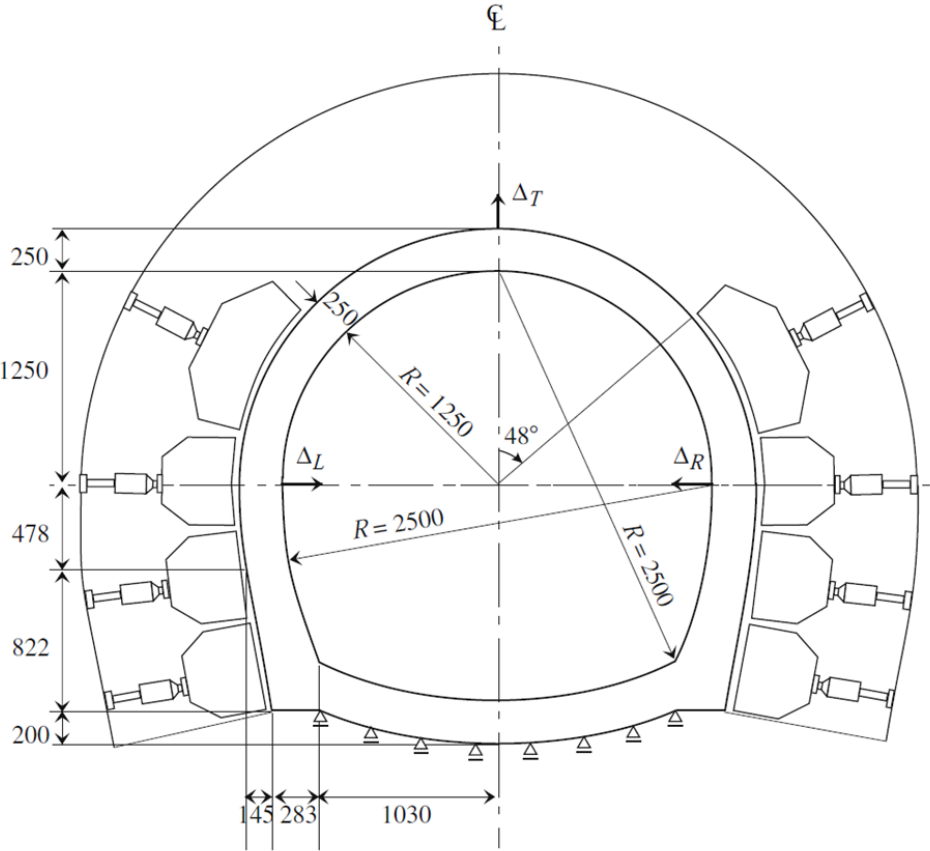
$$\phi_d = \frac{d L}{3EI(1-d)} m$$



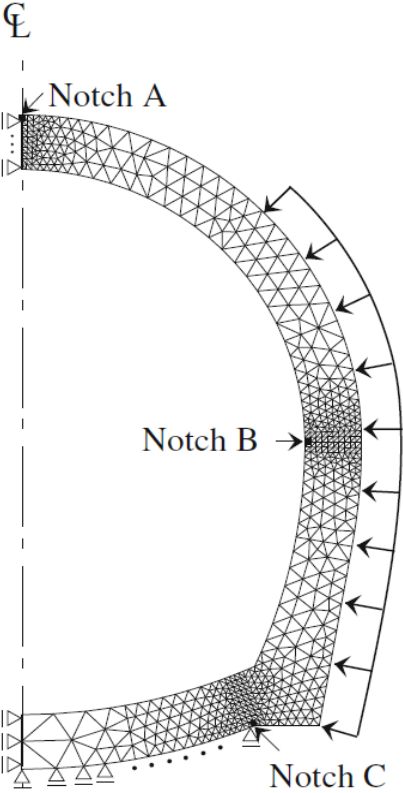
Rotación plástica

Rotación por fractura

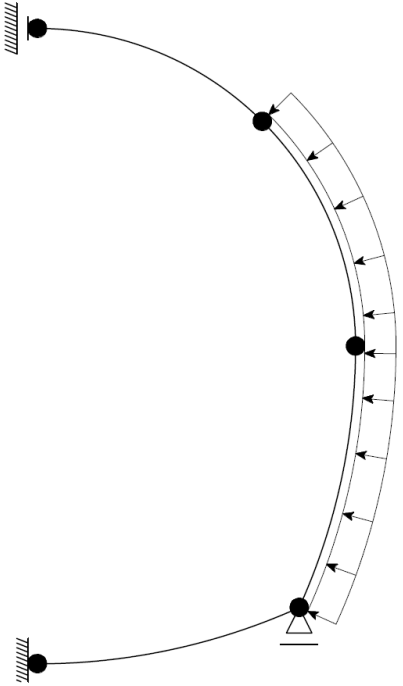




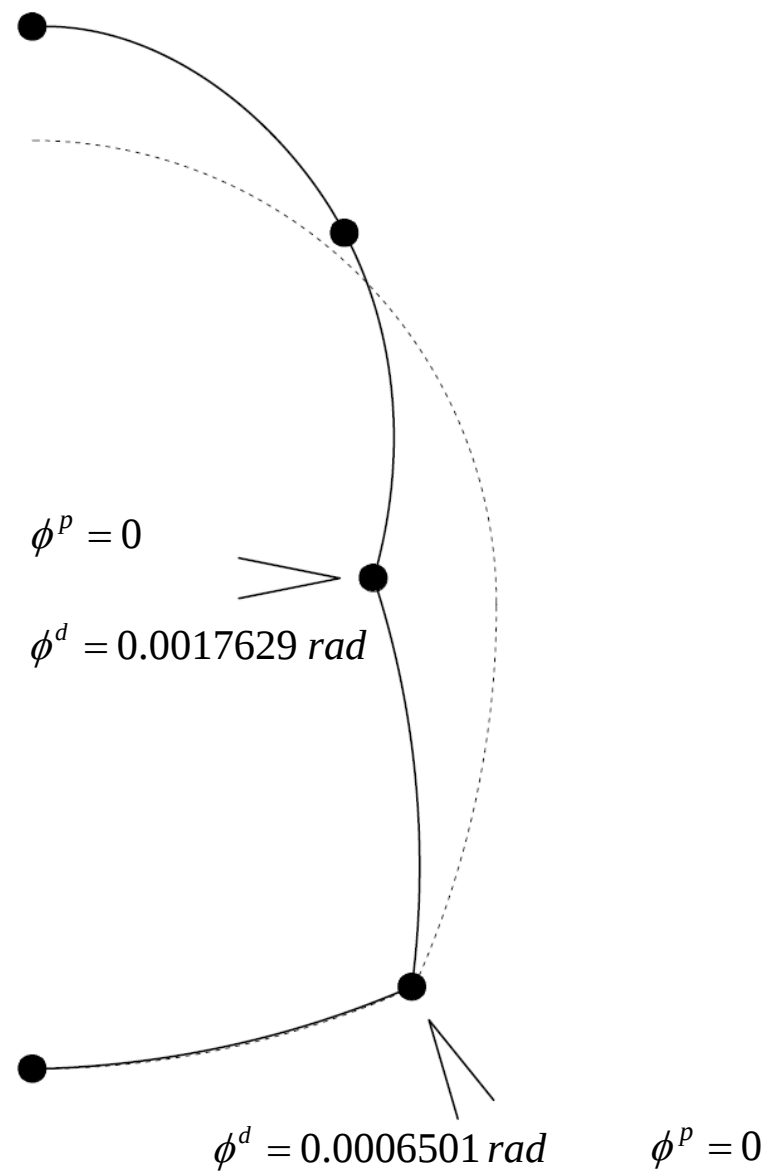
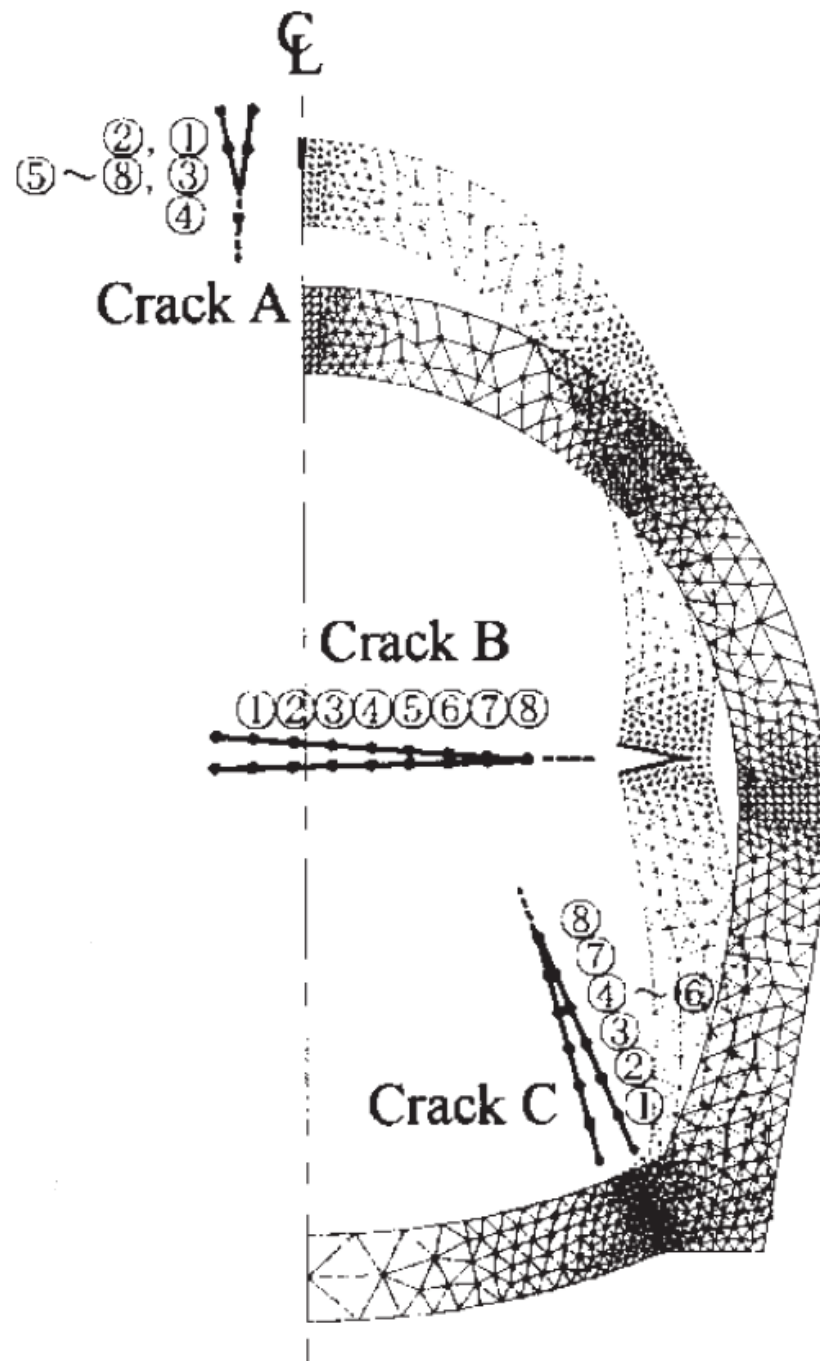
Shi et al

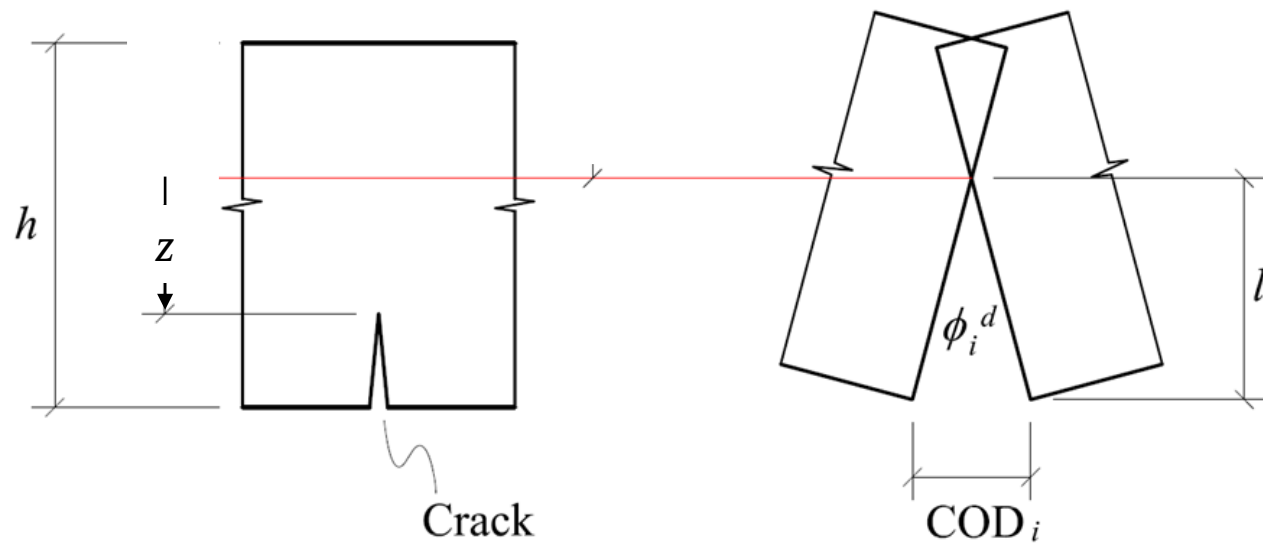


Finite element mesh

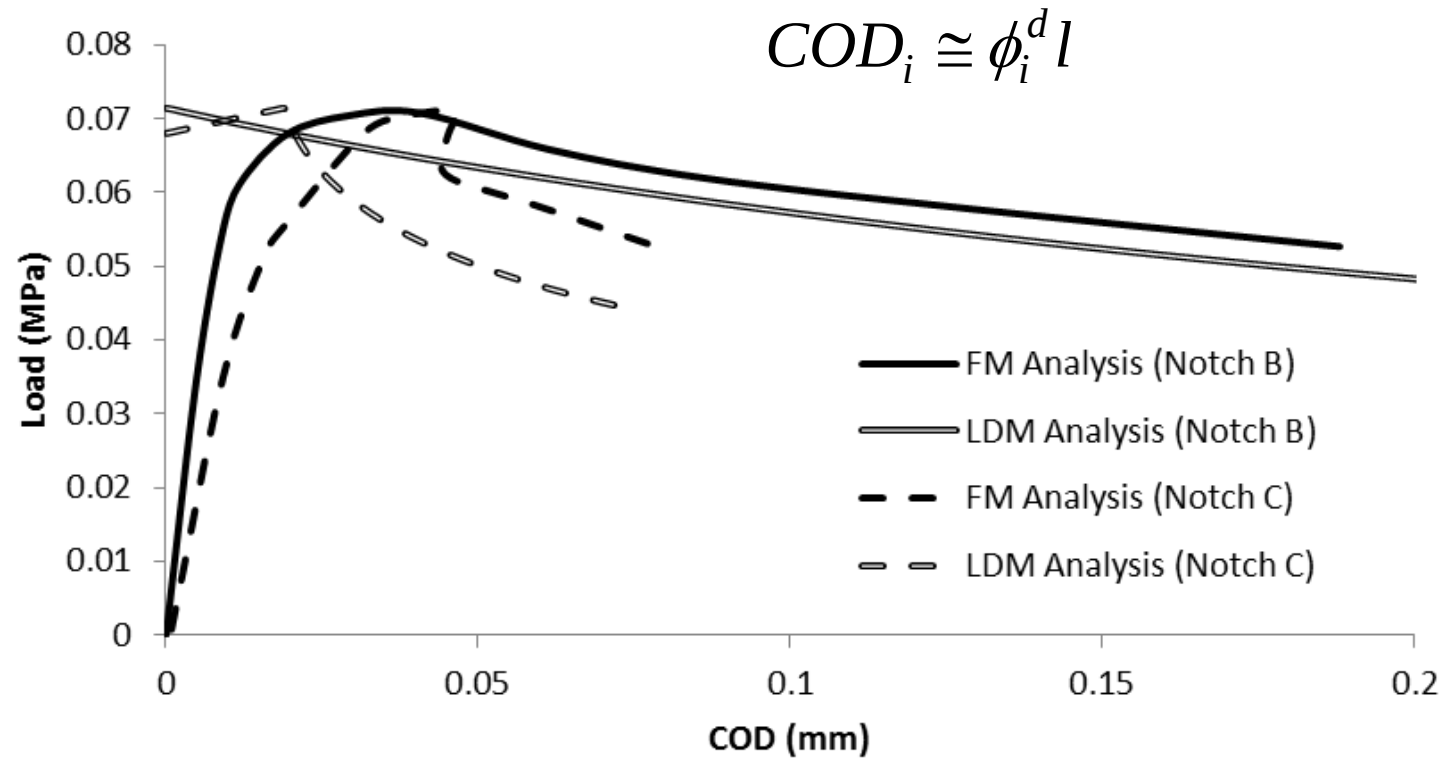


LDM mesh





Cálculo de la abertura de fisura COD



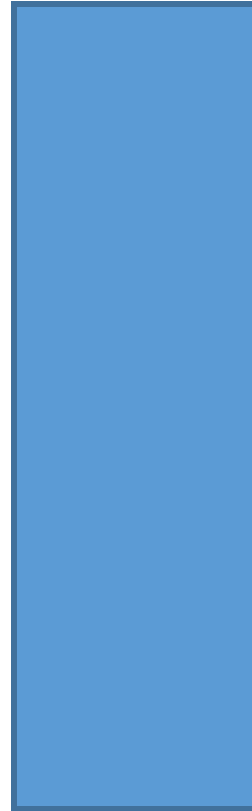
$$COD_i \cong \phi_i^d l$$

Sección
rectangular

$$z \cong \frac{h}{2} \sqrt[3]{1 - d_i}$$

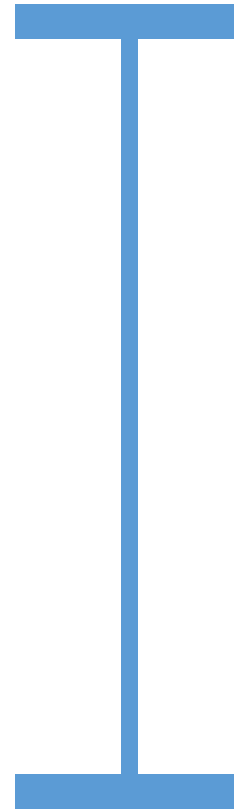
Rectangular
cross-section

$$z \cong \frac{h}{2} (1 - d_i)^{\frac{1}{3}}$$



Arbitrary
cross-section

$$z \cong \frac{h}{2} (1 - d_i)^{\alpha}$$



Ley de Coffin-Manson law en una rótula inelástica

$$N(z) \cong \left(\frac{z \Delta \phi_p}{L_p \varepsilon_f} \right)^\beta$$

Número de ciclos para romper la fibra a una altura z

$$N \cong \left(\frac{(1-d)^\alpha \Delta \phi_p}{\phi_{cr}} \right)^\beta$$

Relación entre daño y número de ciclos

$$\text{si } N < N_{cr} \quad d = 0 \quad \text{en caso contrario } N \cong \left(\frac{(1-d)^\alpha \Delta \phi_p}{\phi_{cr}} \right)^\beta$$

Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

Modelado de la propagación de fisuras bajo sollicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

- Ley de Coffin-Manson para fatiga de ultra bajo ciclaje

- La regla de Palmgren-Miner

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula plástica

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula inelástica

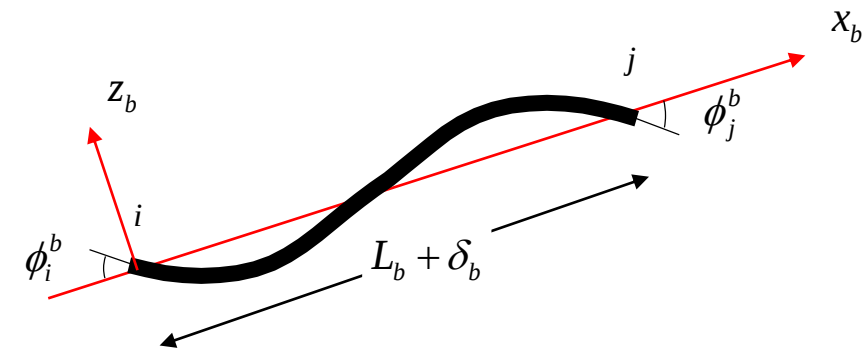
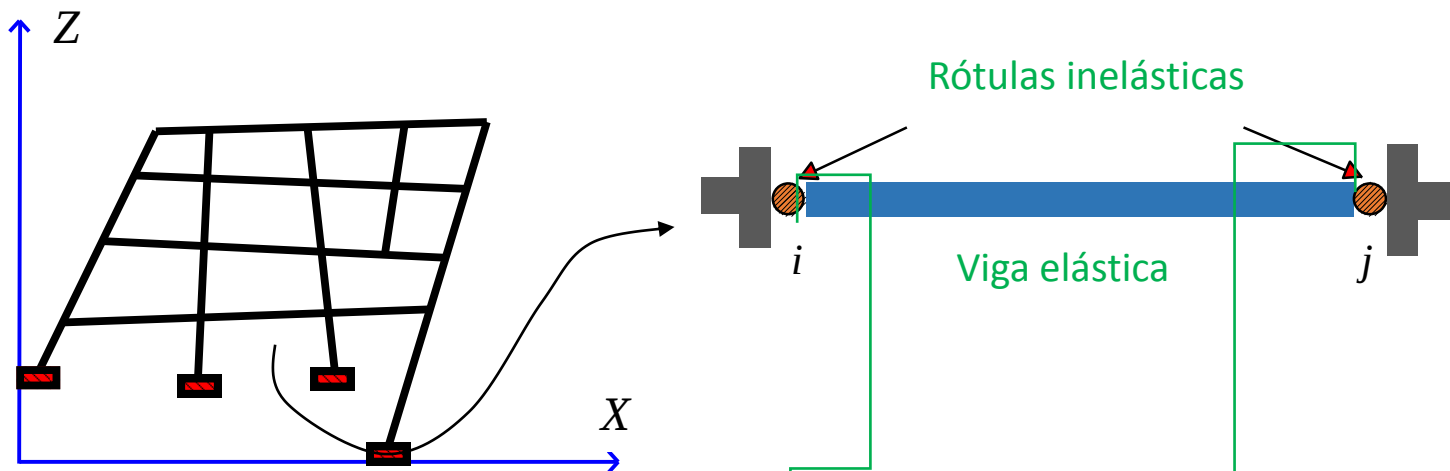
- Modelo de daño para vigas sometidas a fatiga de ultra bajo ciclaje

- Evolución del daño en ensayos de fatiga con diferentes amplitudes

- Evolución del daño en fatiga no estacionaria

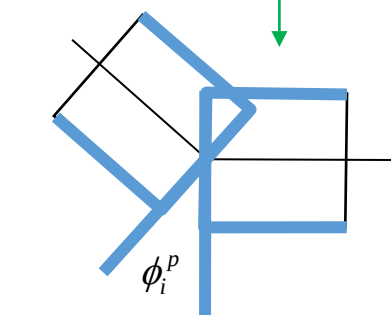
- Fatiga unilateral

Observaciones finales

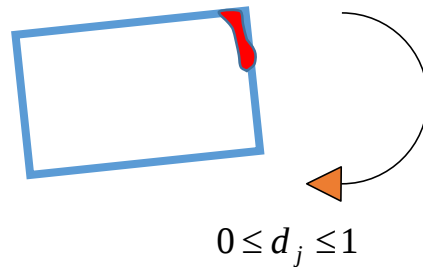


$$\{\boldsymbol{\varepsilon}^p\}_b = \begin{bmatrix} \phi_i^p \\ \phi_j^p \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\}_b = \begin{bmatrix} \phi_i^b \\ \phi_j^b \\ \delta_b \end{bmatrix}$$



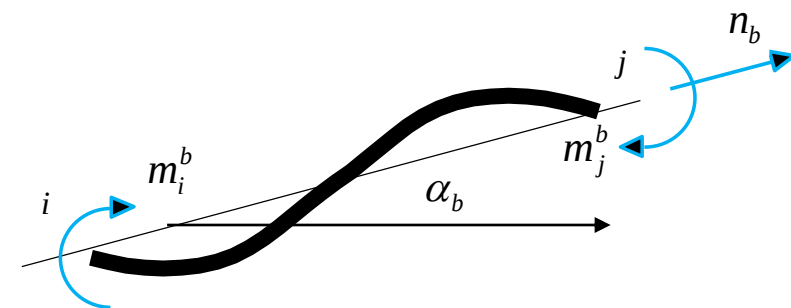
Rotación plástica



fisura representada por una variable de daño

$$(\mathbf{D})_b = (d_i, d_j)$$

Mecánica estructural



$$\{\boldsymbol{\sigma}\}_b = \begin{bmatrix} m_i^b \\ m_j^b \\ n_b \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \phi_i - \phi_i^p \\ \phi_j - \phi_j^p \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L}{3EI(1-d_i)} & \frac{-L}{6EI} & 0 \\ \frac{-L}{6EI} & \frac{L}{3EI(1-d_j)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L}{AE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_i \\ m_j \\ n_i \end{bmatrix}$$

Ley de elasticidad

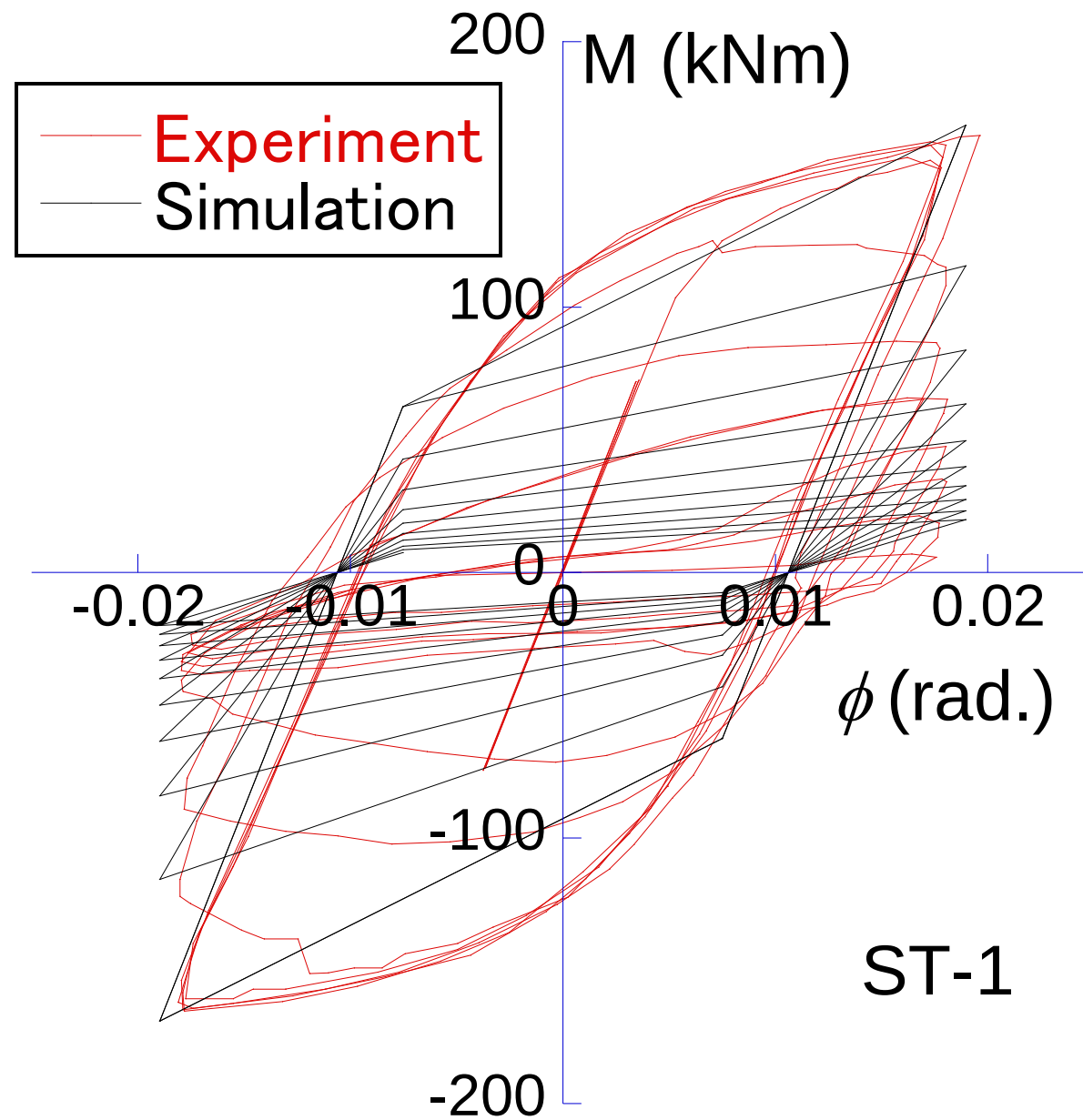
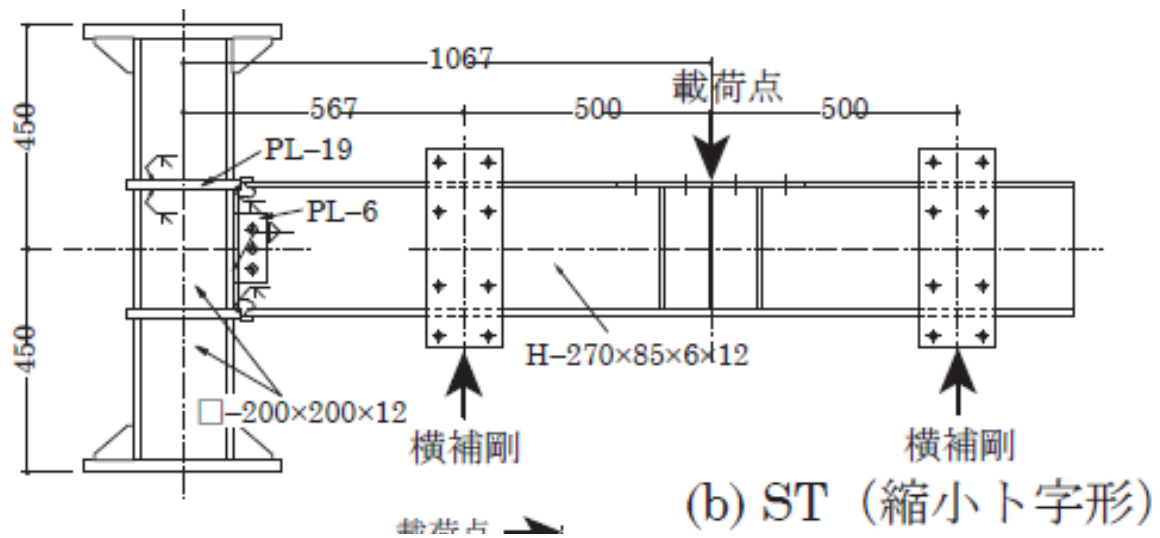
$$f_i = \left| \frac{m_i}{1-d_i} - C\phi_i^p \right| - M_p \leq 0$$

Función de fluencia, rótula i

$$\begin{cases} d\phi_i^p = 0 & \text{if } f_i(m_i, d_i) < 0 \text{ (hinge } i \text{ locked)} \\ f_i(m_i, d_i) = 0 & \text{if } d\phi_i^p \neq 0 \text{ (hinge } i \text{ active)} \end{cases}$$

$$\text{si } N < N_{cr} \quad d = 0 \text{ en caso contrario } N = \left(\frac{(1-d)^\alpha \Delta\phi_p}{\phi_{cr}} \right)^\beta$$

Ley de daño, rótula i



Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

Modelado de la propagación de fisuras bajo solicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

- Ley de Coffin-Manson para fatiga de ultra bajo ciclaje

- La regla de Palmgren-Miner

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula plástica

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula inelástica

- Modelo de daño para vigas sometidas a fatiga de ultra bajo ciclaje

- Evolución del daño en ensayos de fatiga con diferentes amplitudes

- Evolución del daño en fatiga no estacionaria

- Fatiga unilateral

Observaciones finales

Ley de daño por fatiga, diferentes amplitudes

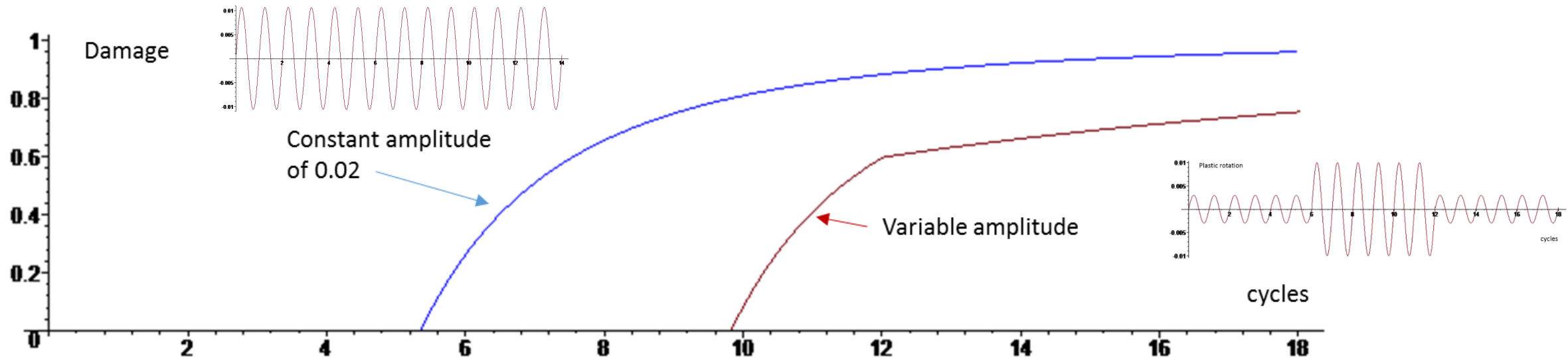
Ley de Coffin-Manson, amplitud constante : Si $N < N_{cr}$ $d = 0$ en caso contrario $N = \left(\frac{(1-d)^\alpha \Delta\phi^p}{\phi_{cr}} \right)^\beta$

Ley de daño, amplitudes diferentes
(Palmgren-Miner rule):

$$\sum \frac{N_k}{N_{cr}^k} = 1$$

Número de ciclos de amplitud $\Delta\phi_k^p$
Número de ciclos necesarios para romper la fibra representada por d

$$\sum N_k \left(\frac{(1-d)^\alpha \Delta\phi_k^p}{\phi_{cr}} \right)^{-\beta} = 1$$



Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

Modelado de la propagación de fisuras bajo solicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

- Ley de Coffin-Manson para fatiga de ultra bajo ciclaje

- La regla de Palmgren-Miner

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula plástica

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula inelástica

- Modelo de daño para vigas sometidas a fatiga de ultra bajo ciclaje

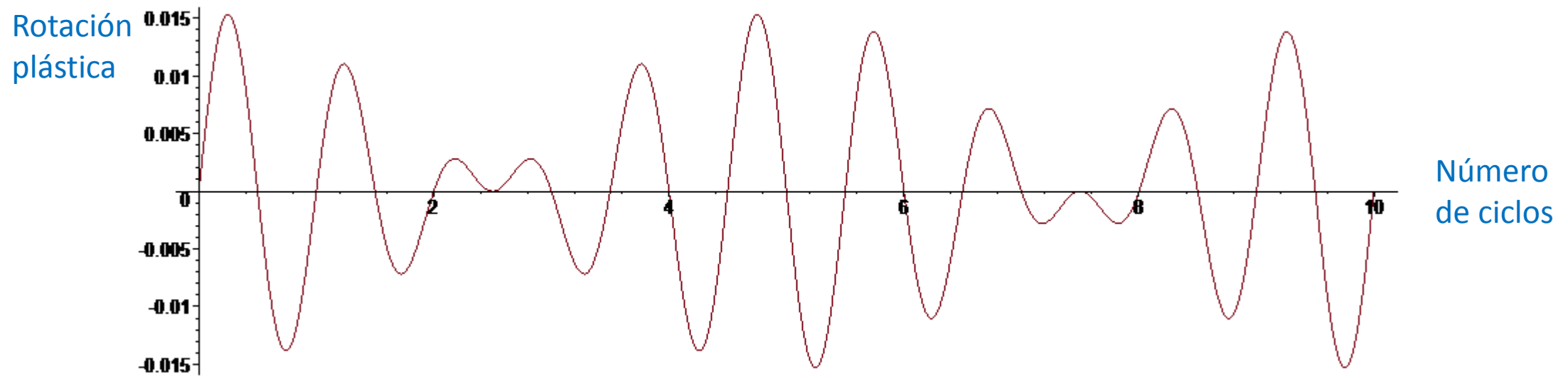
- Evolución del daño en ensayos de fatiga con diferentes amplitudes

- Evolución del daño en fatiga no estacionaria

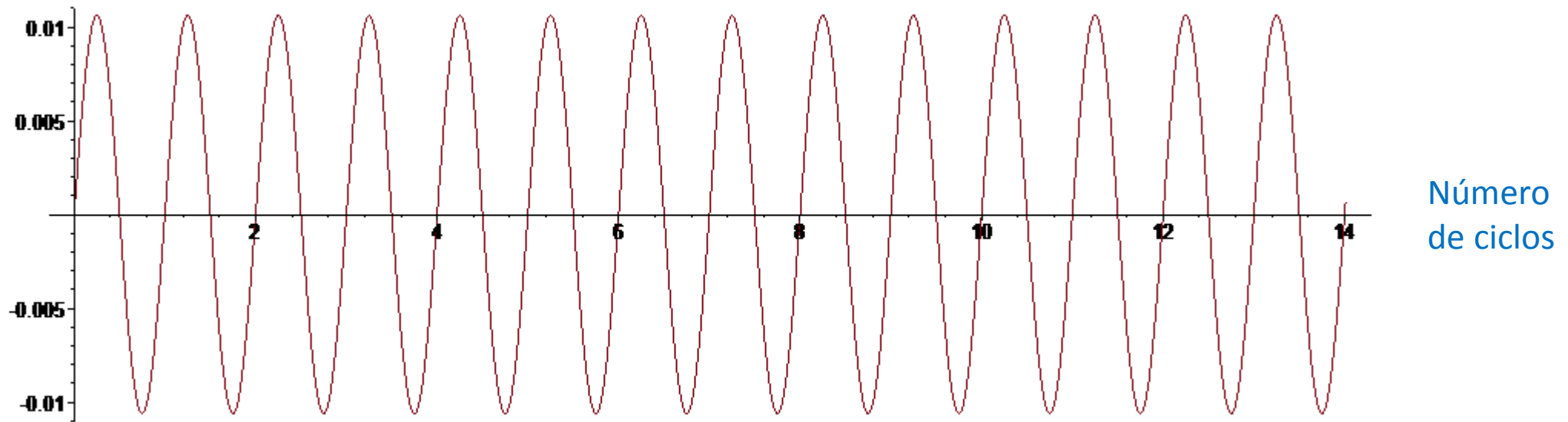
- Fatiga unilateral

Observaciones finales

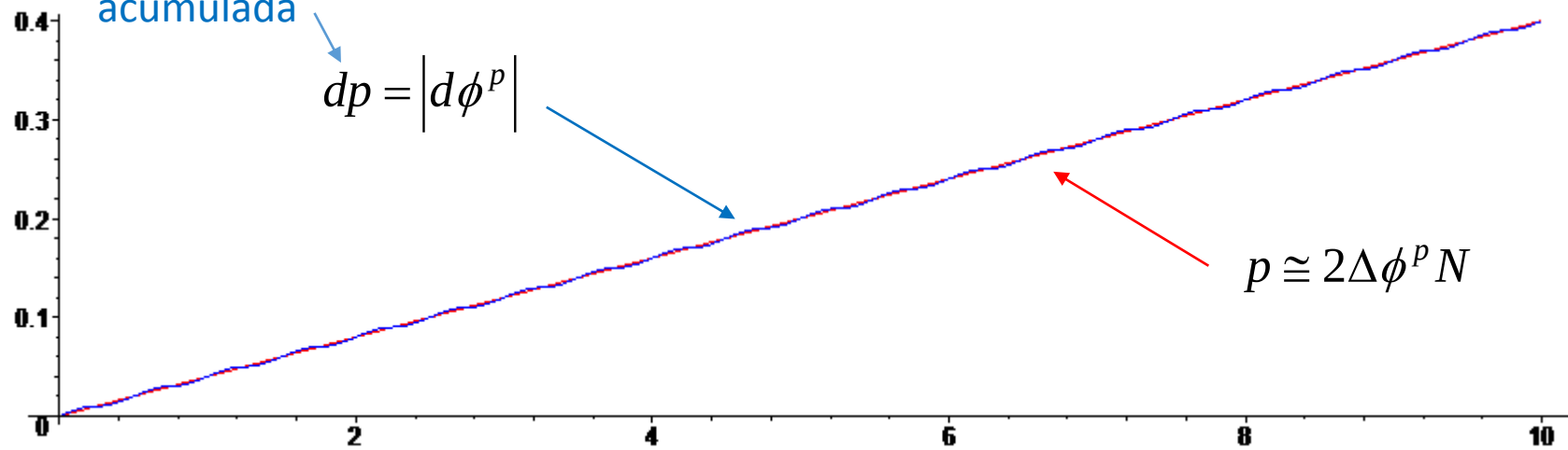
Un modelo de daño para fatiga no estacionaria



Rotación
plástica



Rotación plástica
acumulada

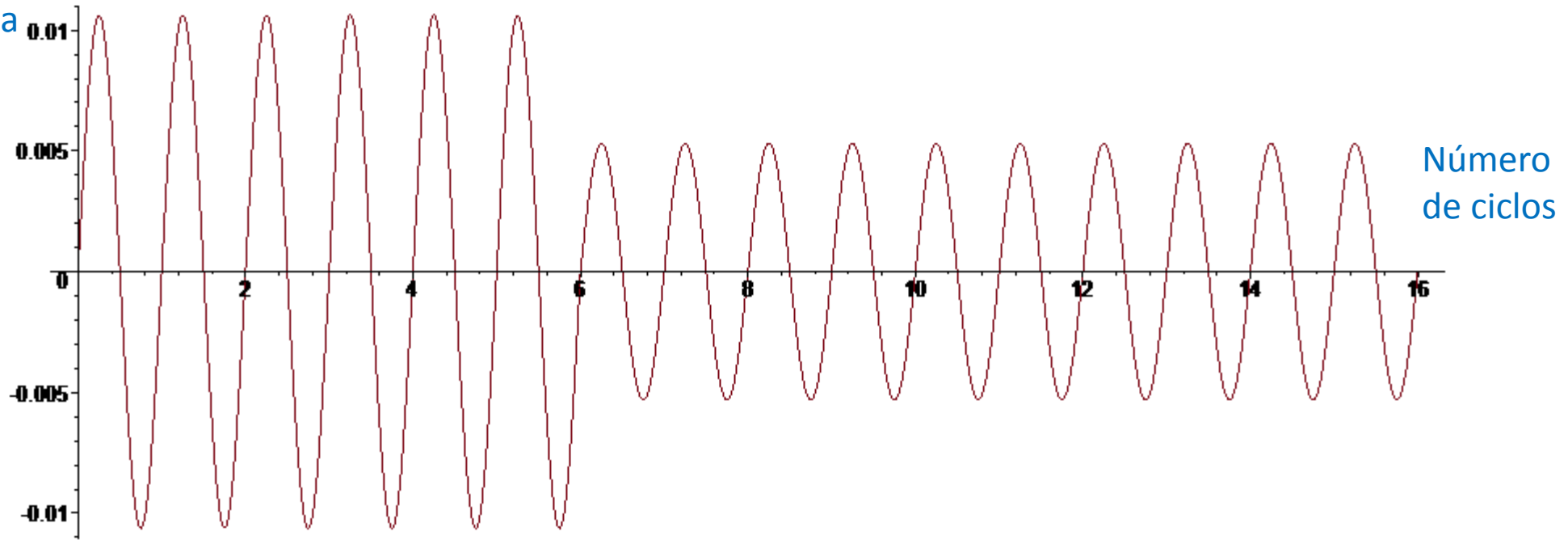


Amplitud
instantánea

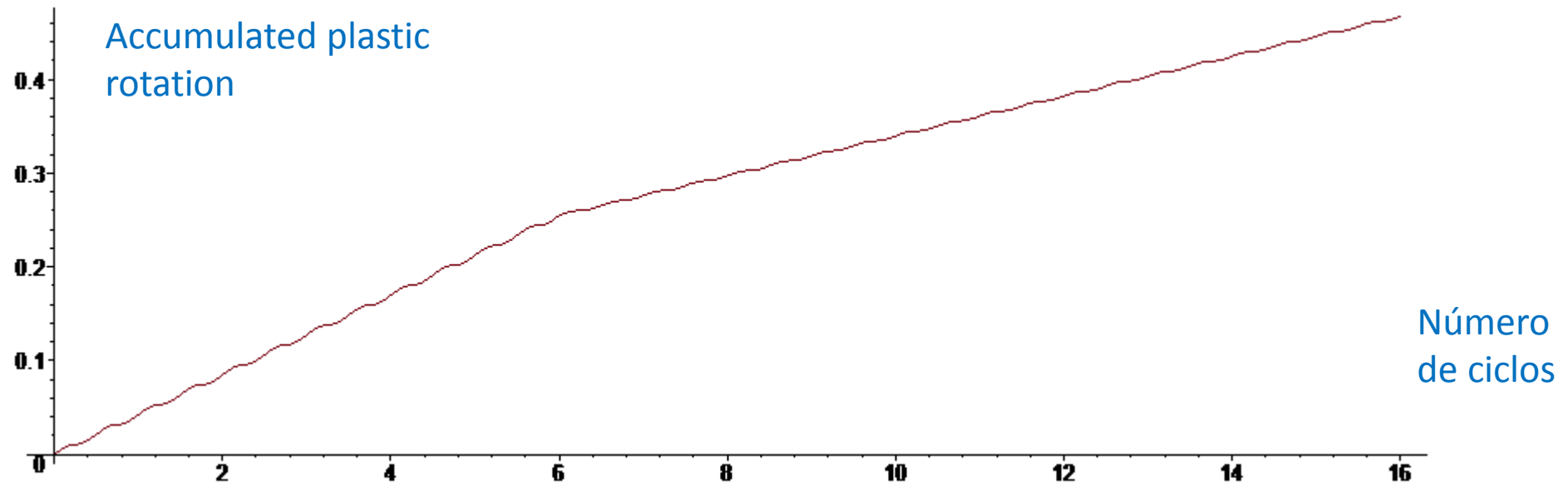
$$\Delta\phi^p \cong \left(\frac{\dot{p}}{2}\right); \quad \dot{p} = \frac{dp}{dN}$$

Número
de ciclos

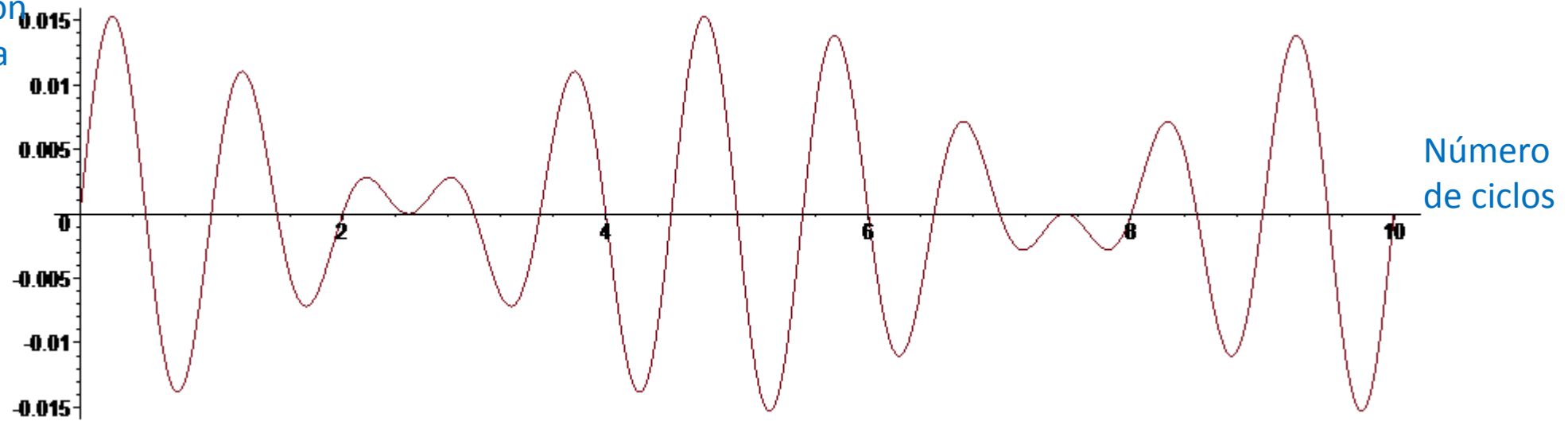
Rotación
plástica



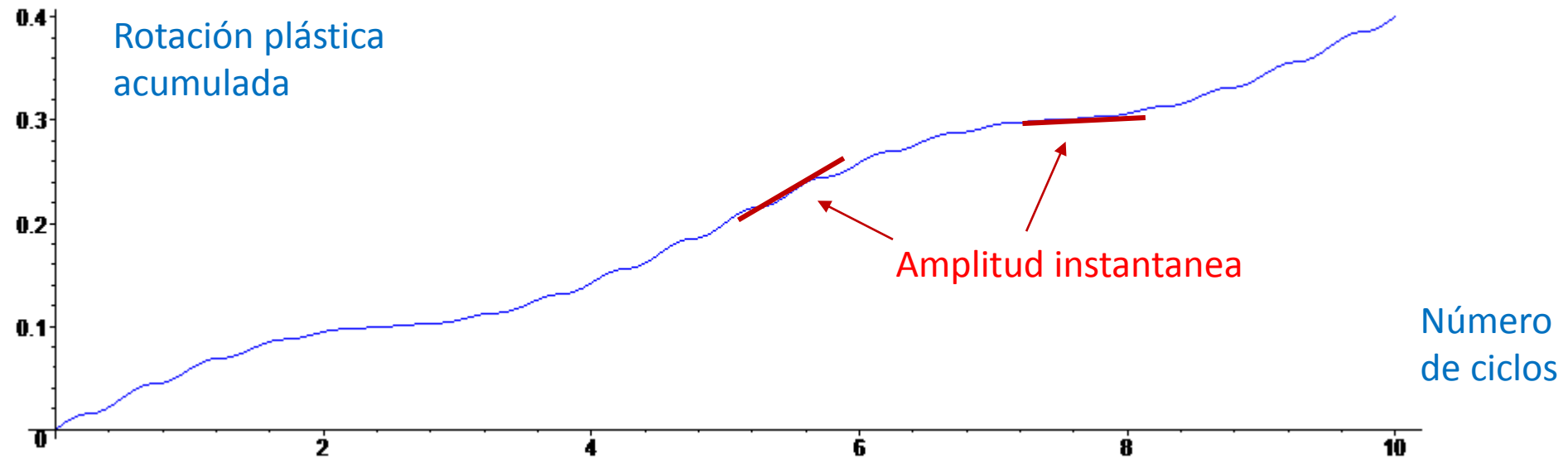
Accumulated plastic
rotation



Rotación
plástica



Rotación plástica
acumulada



$$\sum N_k \left(\frac{(1-d)^\alpha \Delta \phi_k^p}{\phi_{cr}} \right)^{-\beta} = 1$$



$$(1-d(N))^{-\alpha\beta} \int_0^N \left(\frac{\dot{p}(t)}{2\phi_{cr}} \right)^{-\beta} dt = 1$$

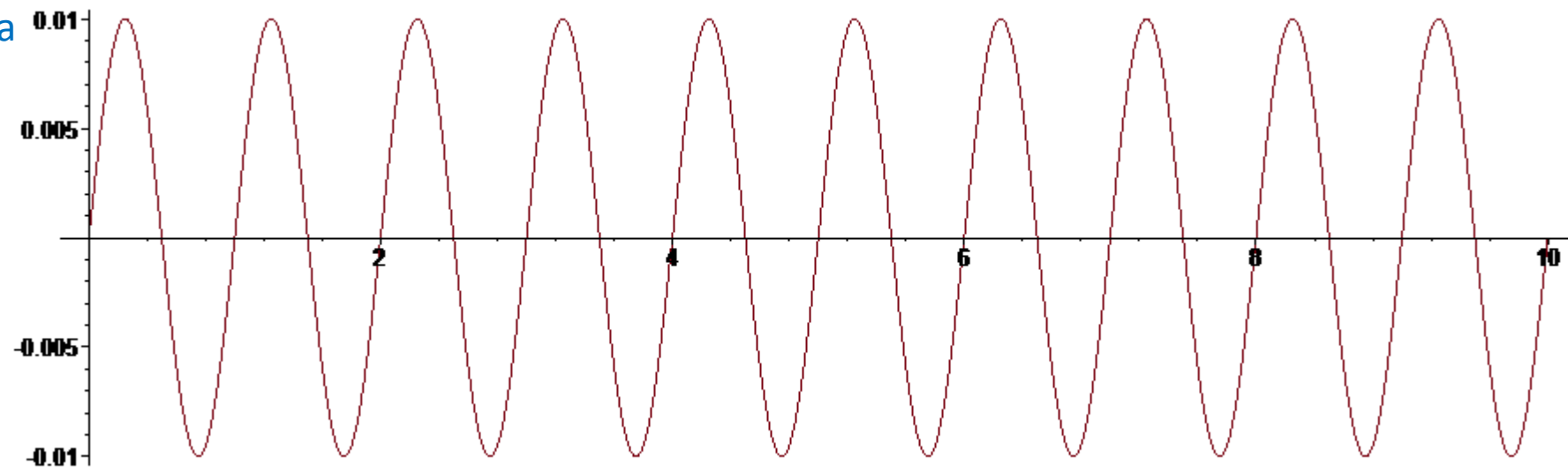
Ley de daño de fatiga no estacionaria

$$d_i(N) = \text{Max}(1 - \exp(\ln(S_i)/\alpha\beta)) \quad d_i(0) = 0$$

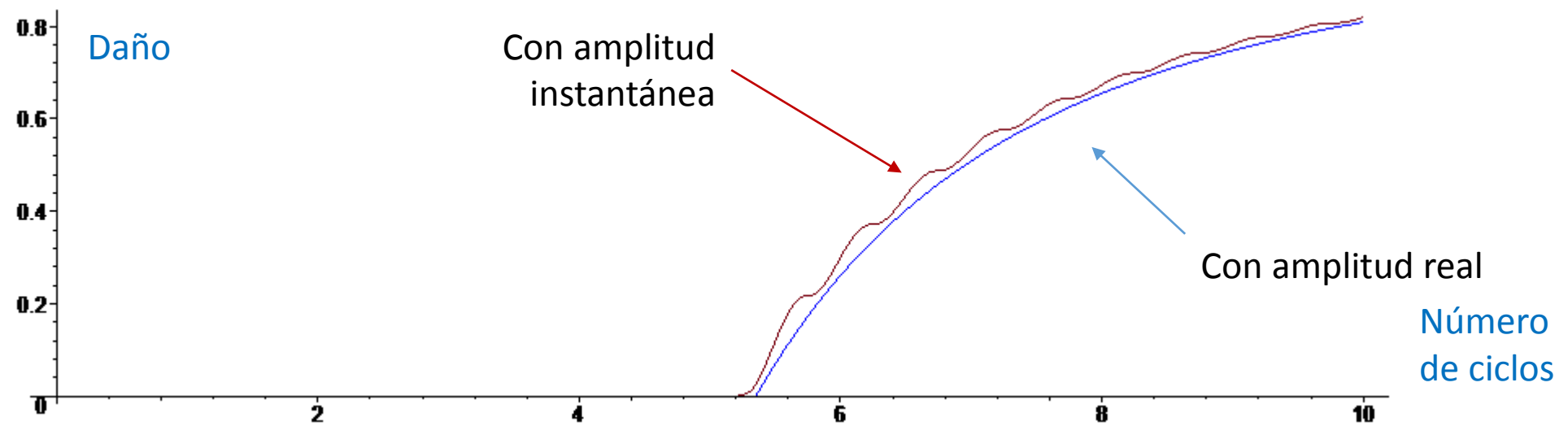
Variable extensora de la fisura

$$S_i(N) = \int_0^N \left(\frac{\dot{p}_i(t)}{2\phi_{cr}} \right)^{-\beta} dt$$

Rotación
plástica



Número
de ciclos



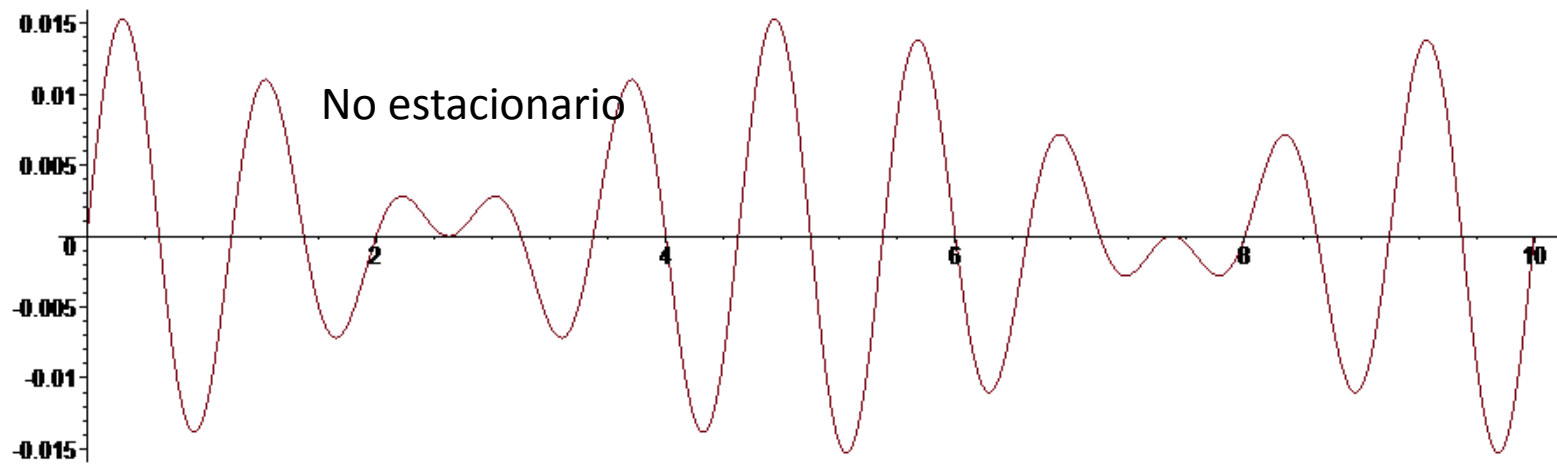
Daño

Con amplitud
instantánea

Con amplitud real

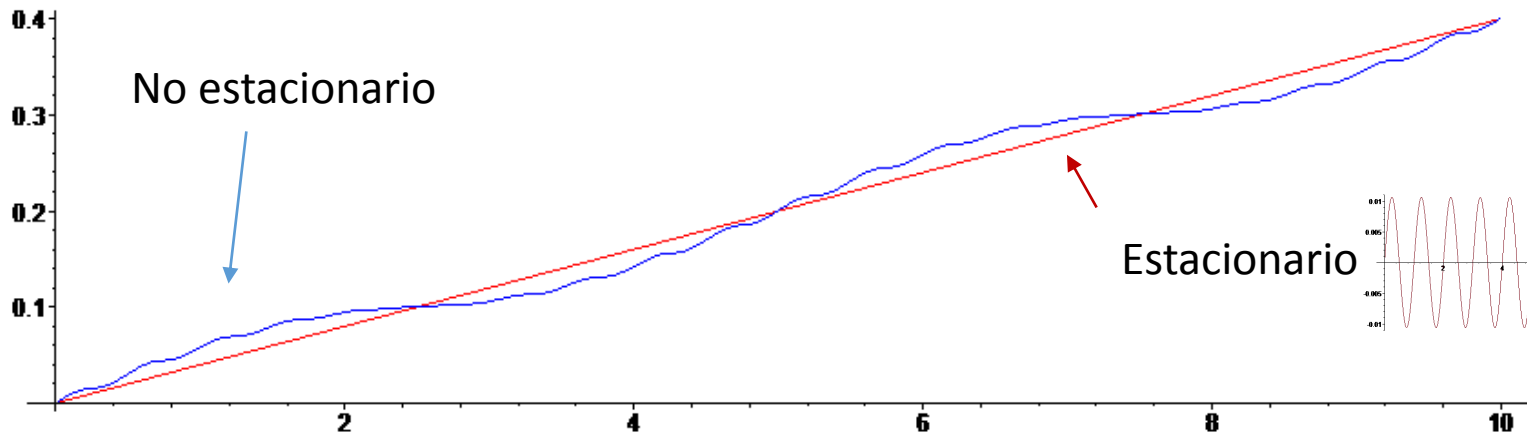
Número
de ciclos

Rotación
plástica



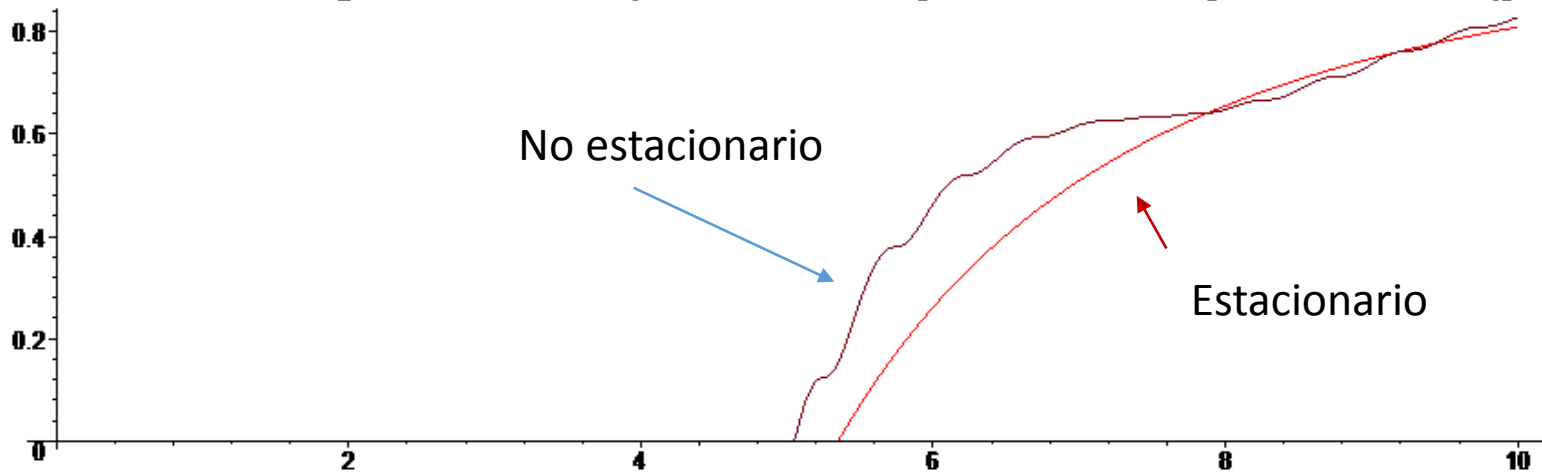
Número
de ciclos

Rotación plástica
acumulada



Número
de ciclos

Daño



Número
de ciclos

Resumen

1. Ley de Coffin-Masson + Rotación plástica  Inicio de la fractura en fatiga de ultra bajo ciclaje
2. Ley de Coffin-Masson law + TDC  Propagación de fisura bajo FUBC
3. (2) + regla de Palmgren-Miner  Propagación de fisura bajo FUBC de diferentes amplitudes
4. (3) + amplitud instantánea  Propagación de fisura bajo solicitaciones no estacionarias

Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

Modelado de la propagación de fisuras bajo sollicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

- Ley de Coffin-Manson para fatiga de ultra bajo ciclaje

- La regla de Palmgren-Miner

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula plástica

- Ley de Coffin-Manson law en una rótula inelástica

- Modelo de daño para vigas sometidas a fatiga de ultra bajo ciclaje

- Evolución del daño en ensayos de fatiga con diferentes amplitudes

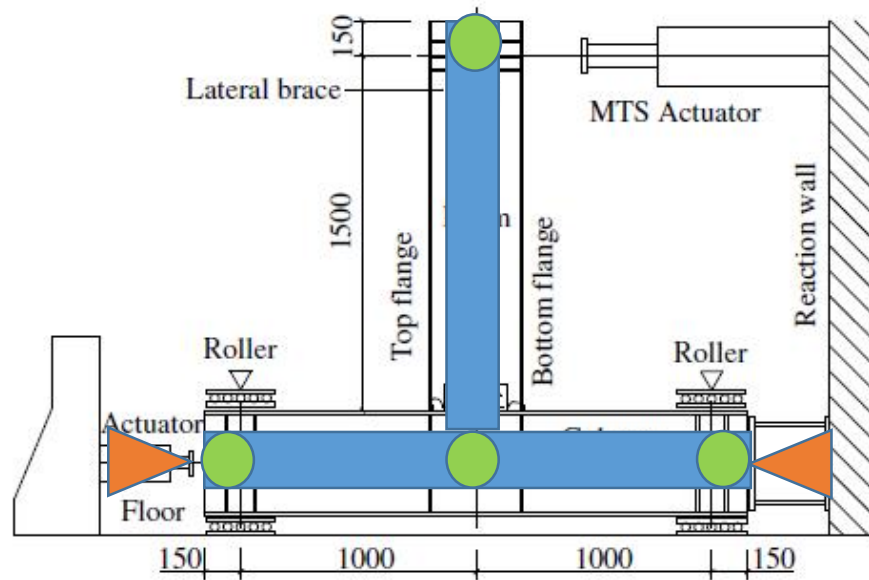
- Evolución del daño en fatiga no estacionaria

- Fatiga unilateral

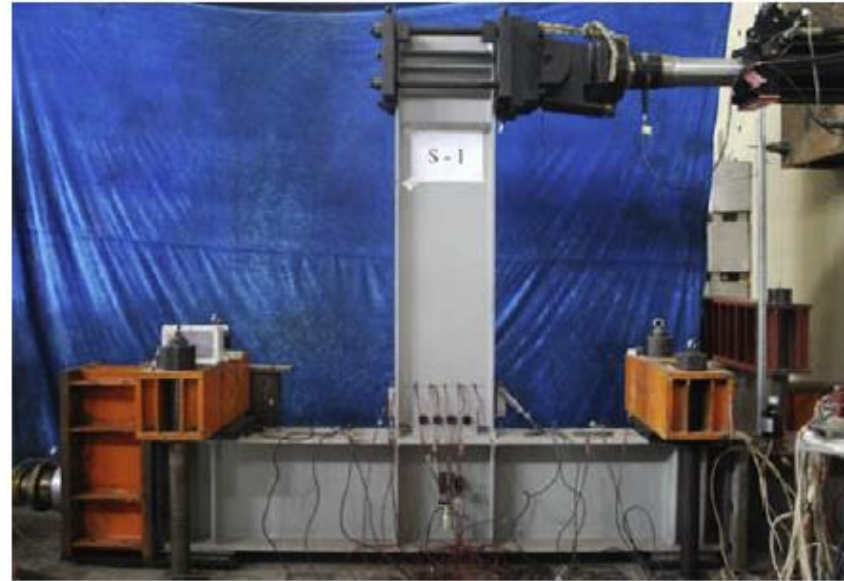
Observaciones finales

Simulaciones numéricas de ensayos con amplitud constante

H. Zhou et al. / International Journal of Fatigue 48 (2013) 90–100



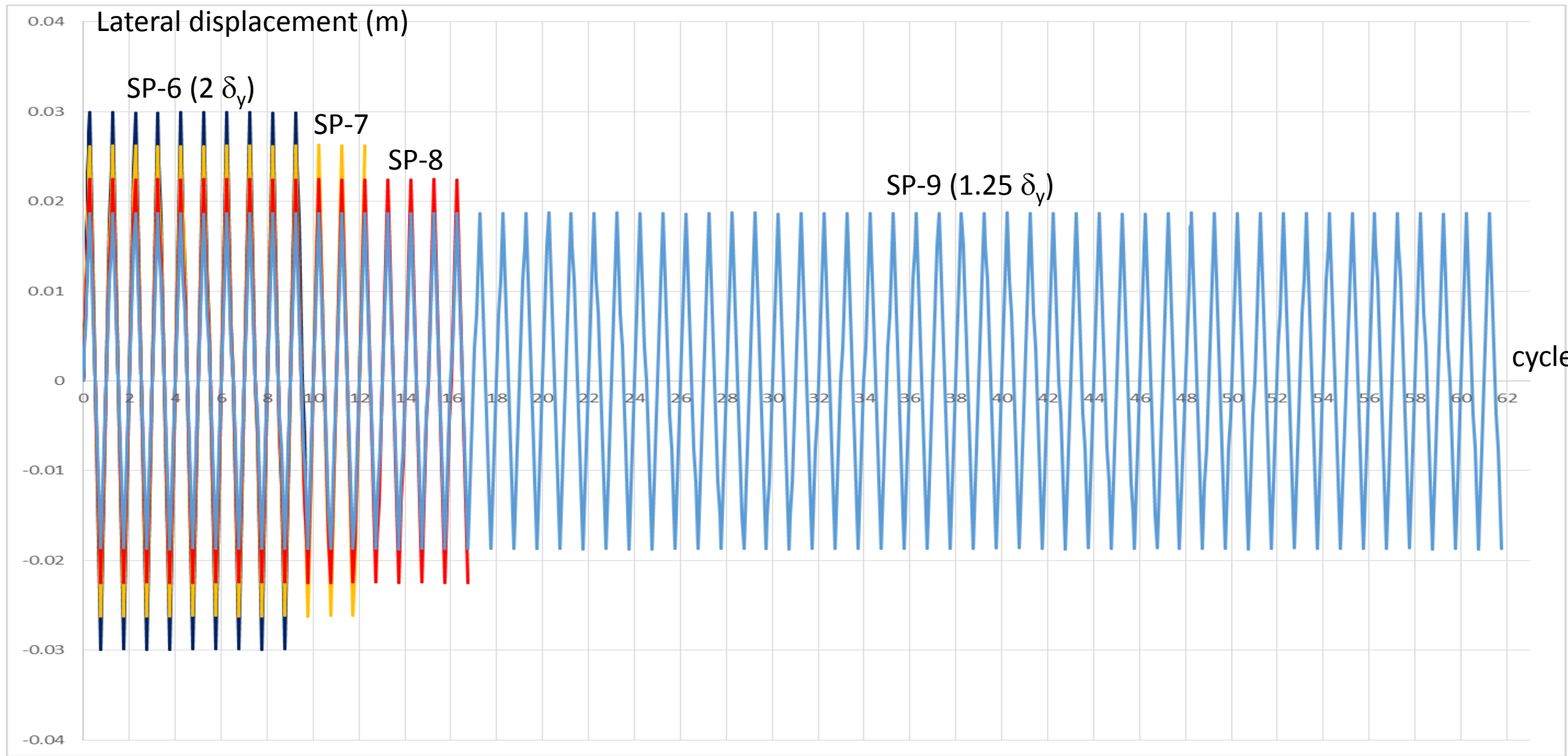
(a) Sketch



(b) General view

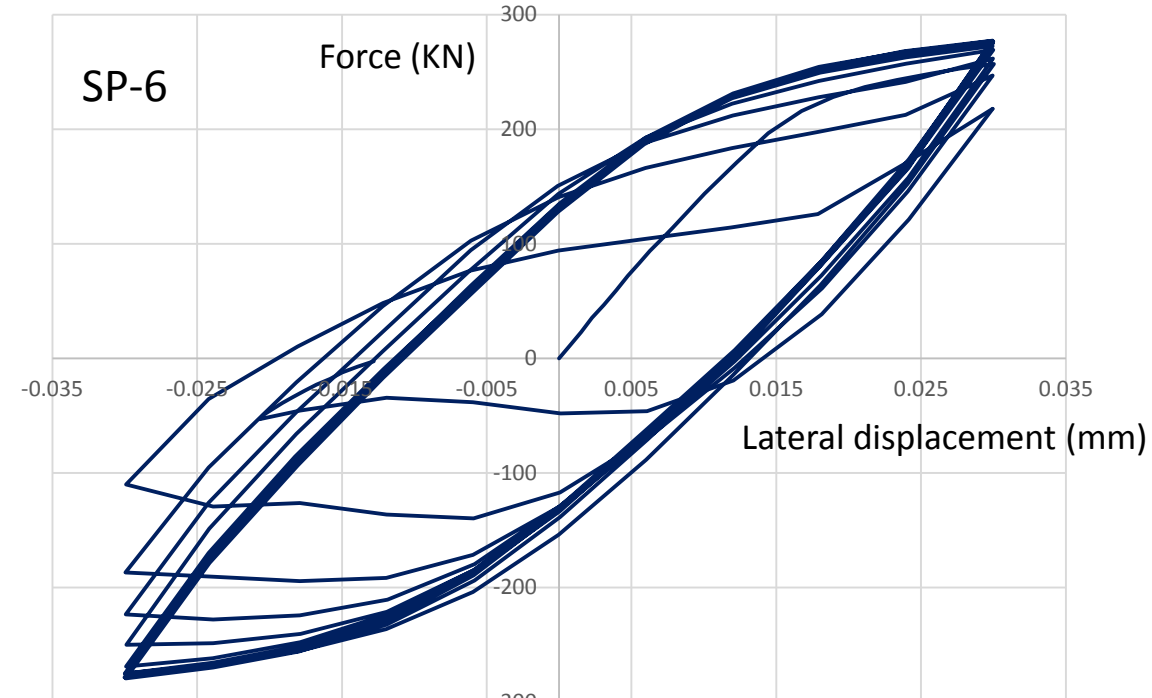
Fig. 2. Sketch and general view of the experimental setup and the specimen.

Ensayos de amplitud constante: sollicitación



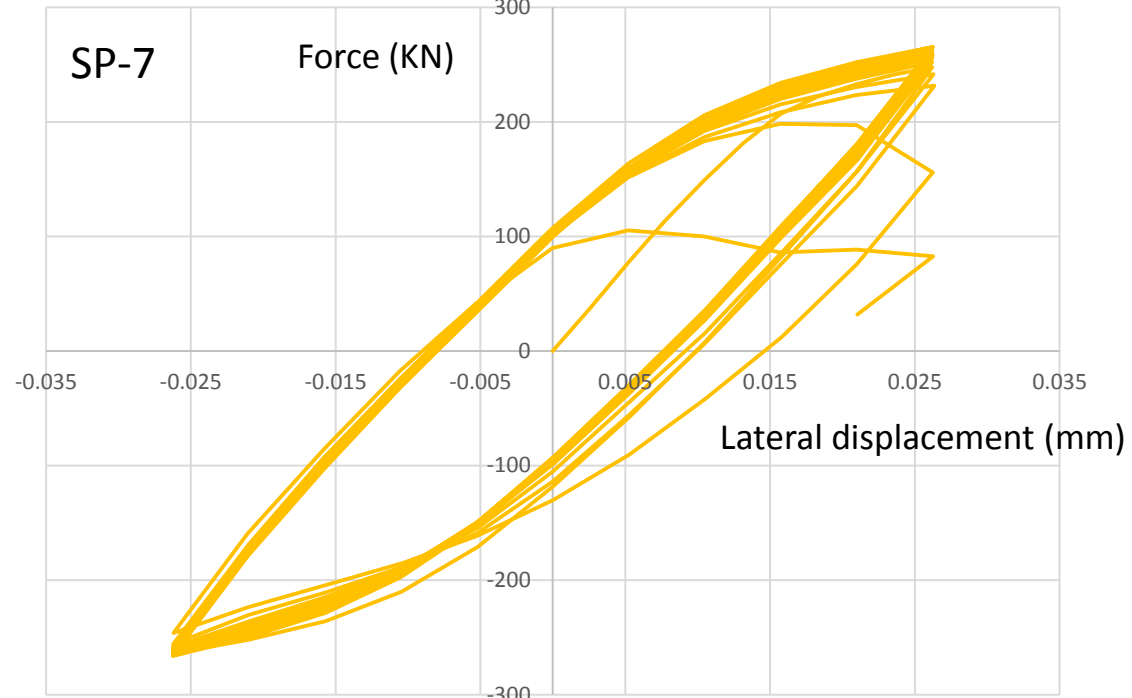
SP-6

Force (KN)



SP-7

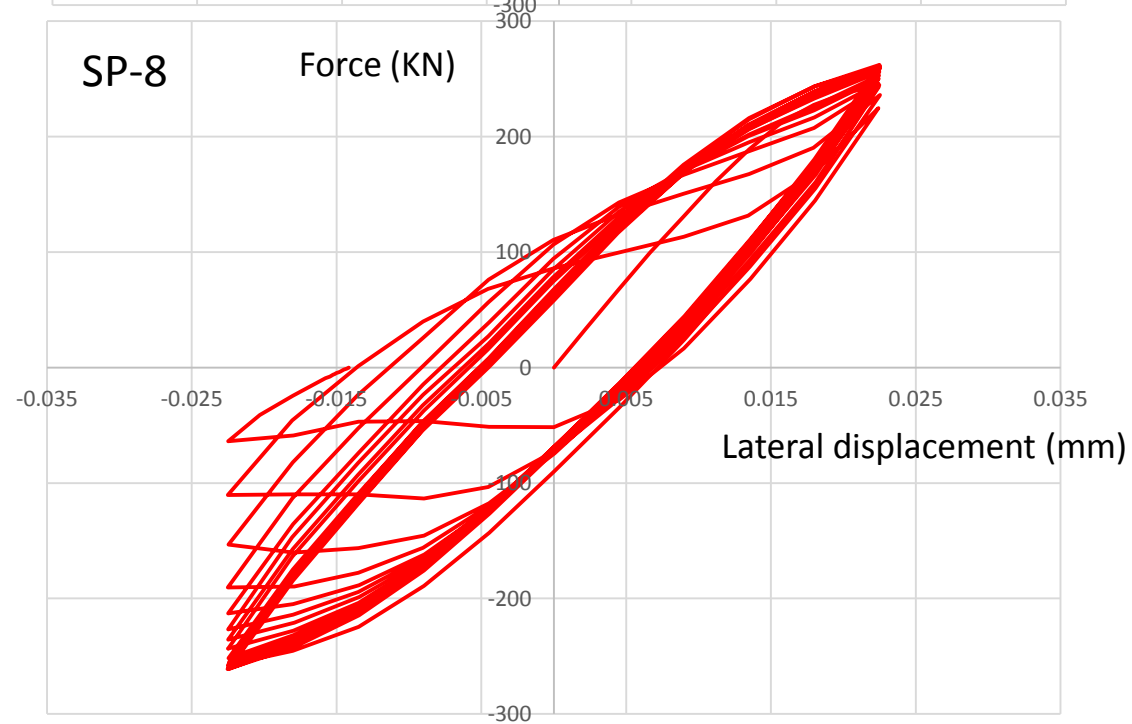
Force (KN)



respuesta

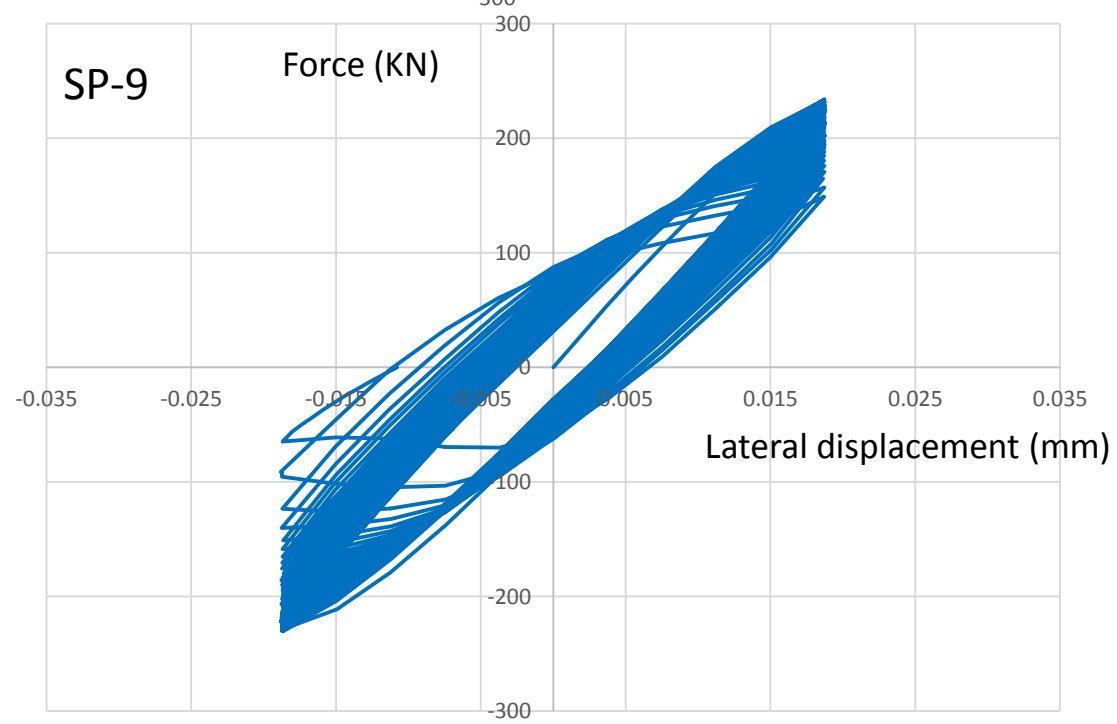
SP-8

Force (KN)



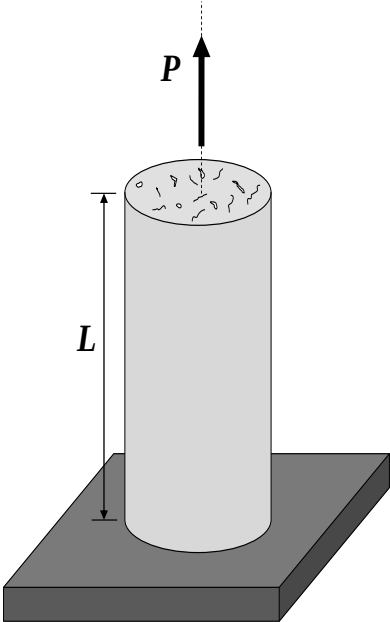
SP-9

Force (KN)





Efecto de cierre de fisura (Ladeveze, Lemaitre)



$$\omega = \frac{A_d}{A}$$

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

Hipótesis de equivalencia en deformación

	Material intacto	Material dañado	
Ley de elasticidad	$\sigma = E(\varepsilon - \varepsilon^p)$	$\bar{\sigma} = E(\varepsilon - \varepsilon^p)$	$\sigma = (1 - \omega)E(\varepsilon - \varepsilon^p)$
Función de fluencia	$f = \sigma - \sigma_y$	$f = \bar{\sigma} - \sigma_y$	$f = \left \frac{\sigma}{1 - \omega} \right - \sigma_y$

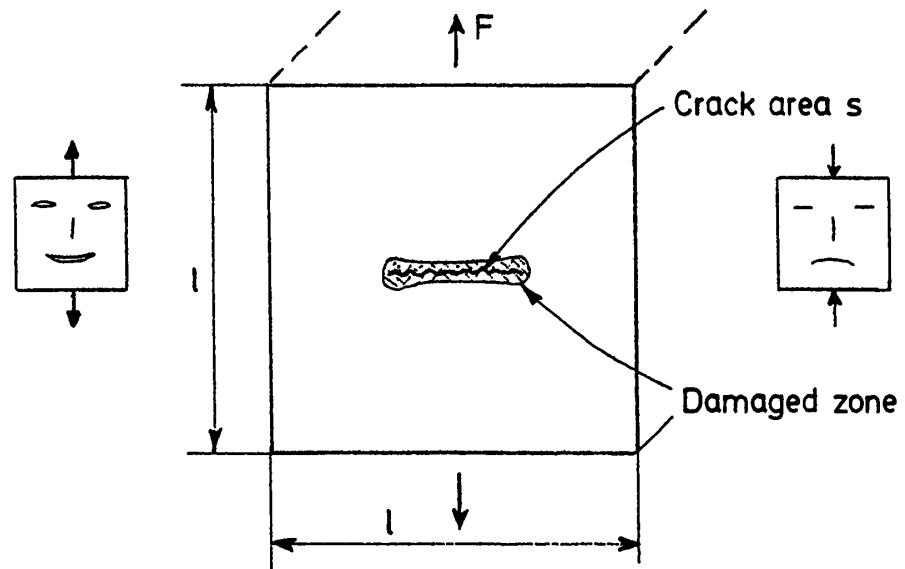


Fig. 2.15. Microcrack in quasi-unilateral condition

$$\bar{\sigma} = \begin{cases} \frac{\sigma}{1-\omega} & \text{if } \sigma \geq 0 \\ \frac{\sigma}{1-h\omega} & \text{if } \sigma < 0 \end{cases} = \frac{\langle \sigma \rangle_+}{1-\omega} + \frac{\langle \sigma \rangle_-}{1-h\omega}$$

$h = 0.2 \sim 0.3$

Constante de cierre de fisura

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\}_b - \{\boldsymbol{\varepsilon}^p\}_b = [\mathbf{F}(\mathbf{D})]\langle\boldsymbol{\sigma}\rangle_b^+ + [\mathbf{F}(h\mathbf{D})]\langle\boldsymbol{\sigma}\rangle_b^-$$

$$[\mathbf{F}(h\mathbf{D})] = \begin{bmatrix} \frac{L}{3EI(1-hd_i)} & \frac{-L}{6EI} & 0 \\ \frac{-L}{6EI} & \frac{L}{3EI(1-hd_j)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{L}{AE} \end{bmatrix}$$

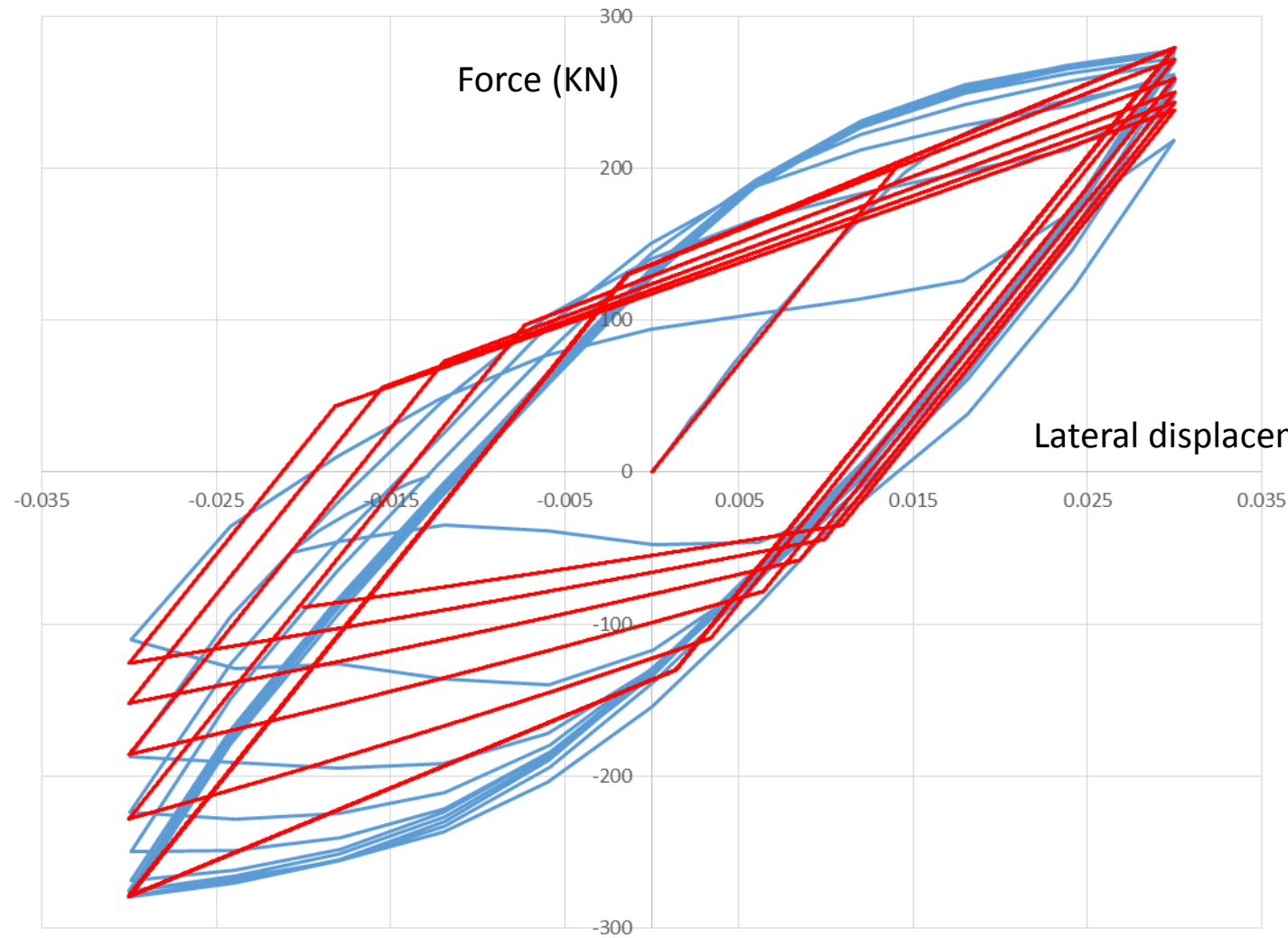
Ley de elasticidad (degradación de rigidez unilateral)

$$f_i = \text{Max} \left(\frac{m_i}{1-d_i} - C\phi_i^p, \frac{-m_i}{1-hd_i} + C\phi_i^p \right) - M_p \leq 0$$

Función de fluencia de la rótula i
(degradación de resistencia unilateral)

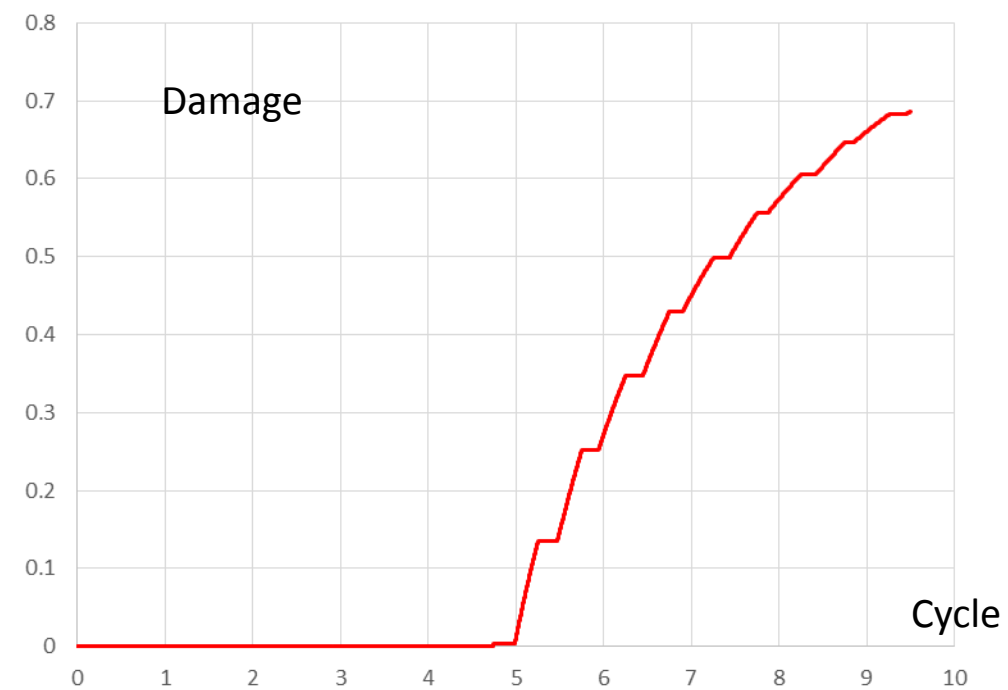
$$(1-d(N))^{-\alpha\beta} \int_0^N \left(\frac{\dot{p}(t)}{2\phi_{cr}} \right)^{-\beta} dt = 1$$

Ley de daño de la rótula i
(Solicitaciones no estacionarias)



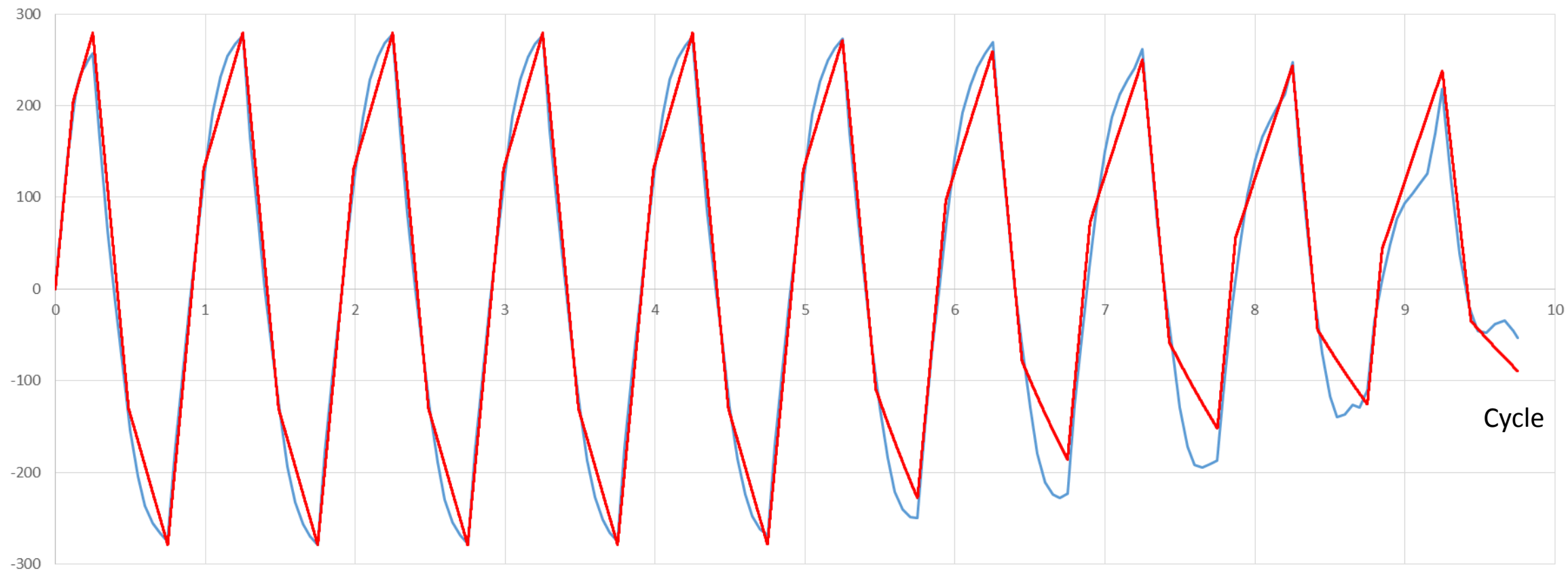
SP-6

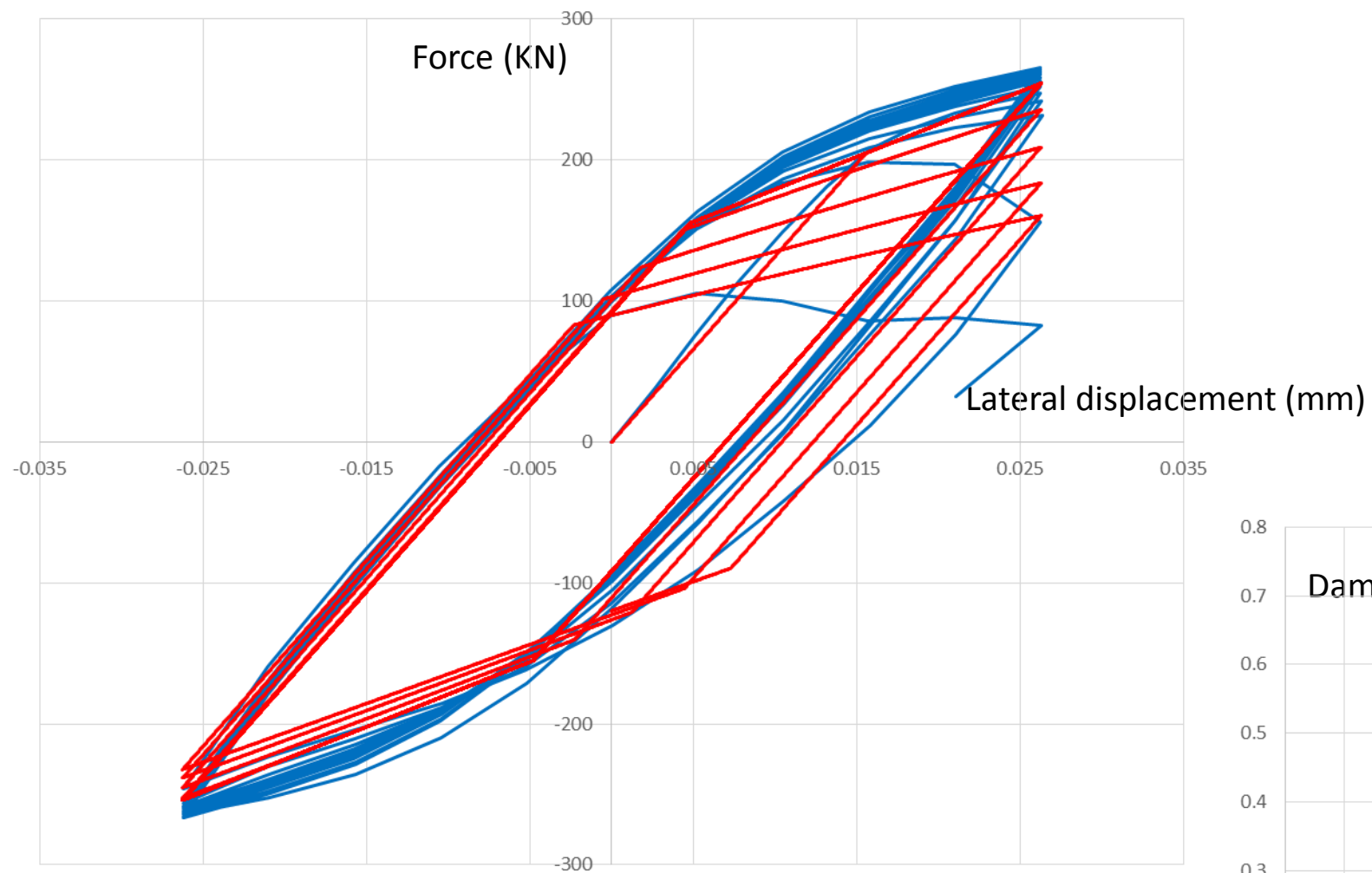
Ensayo
Modelo



Ensayo
Modelo

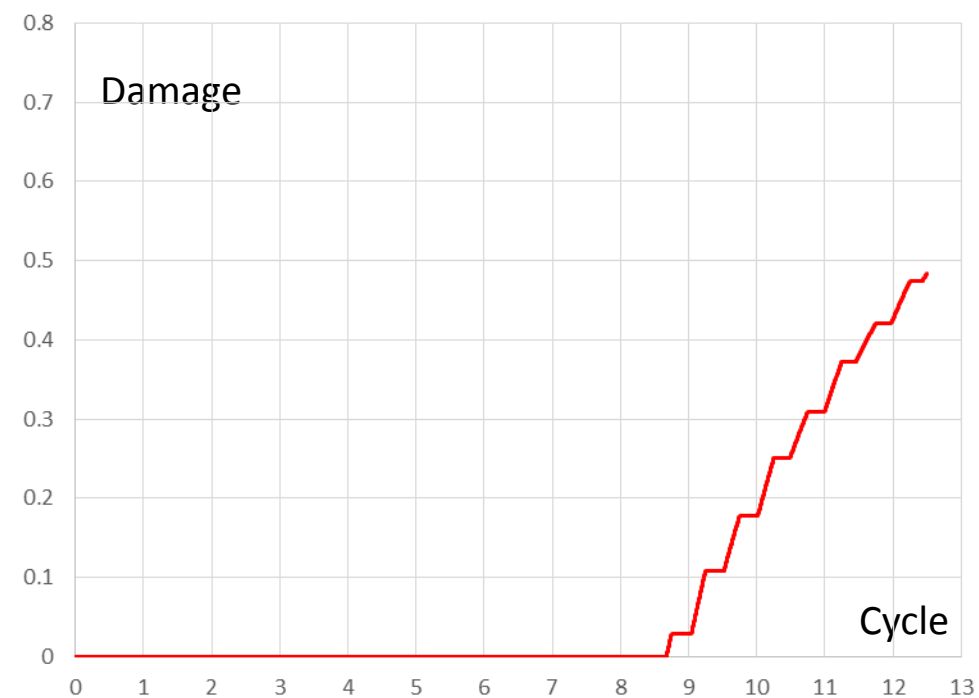
Force (kN)

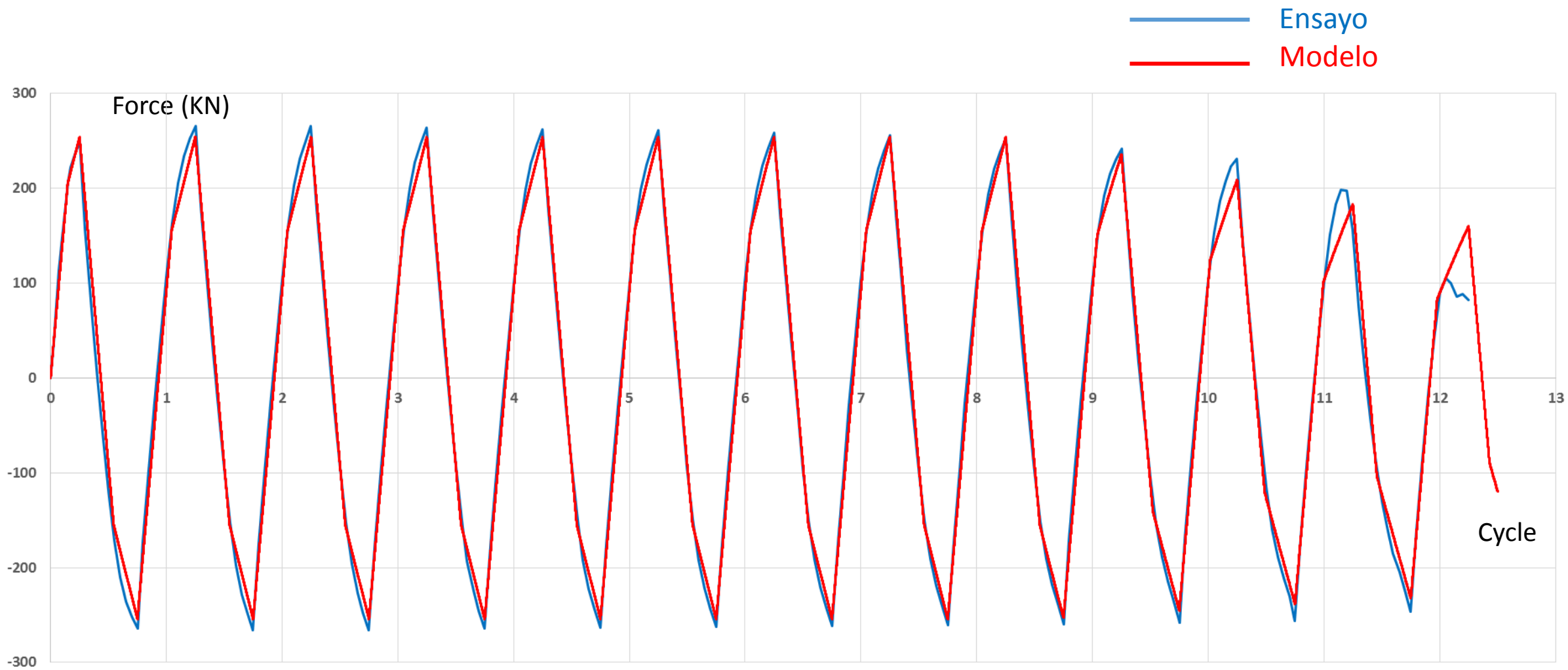


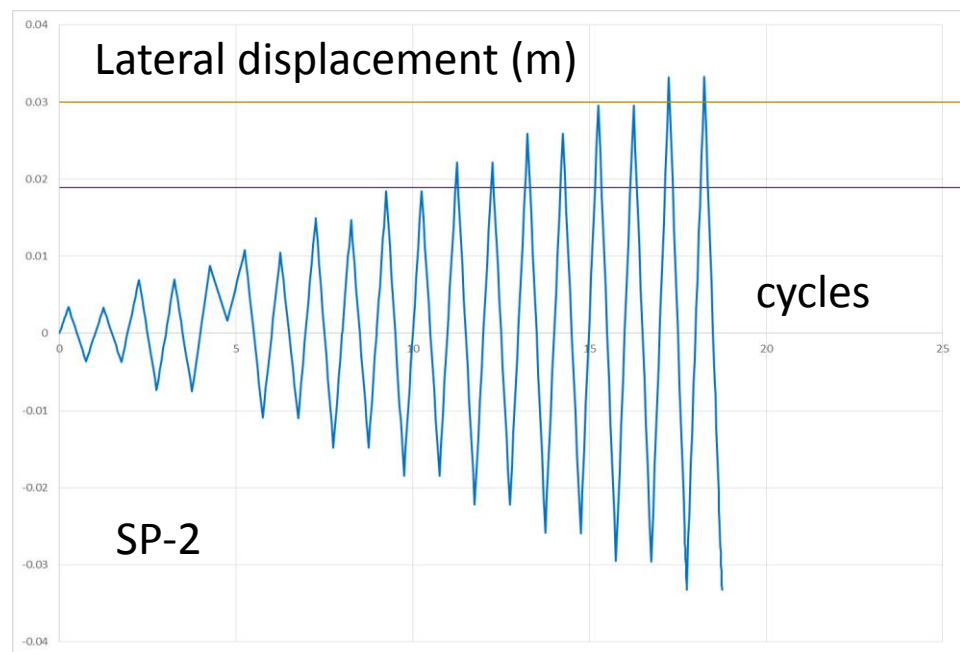


SP-7

Ensayo
Modelo



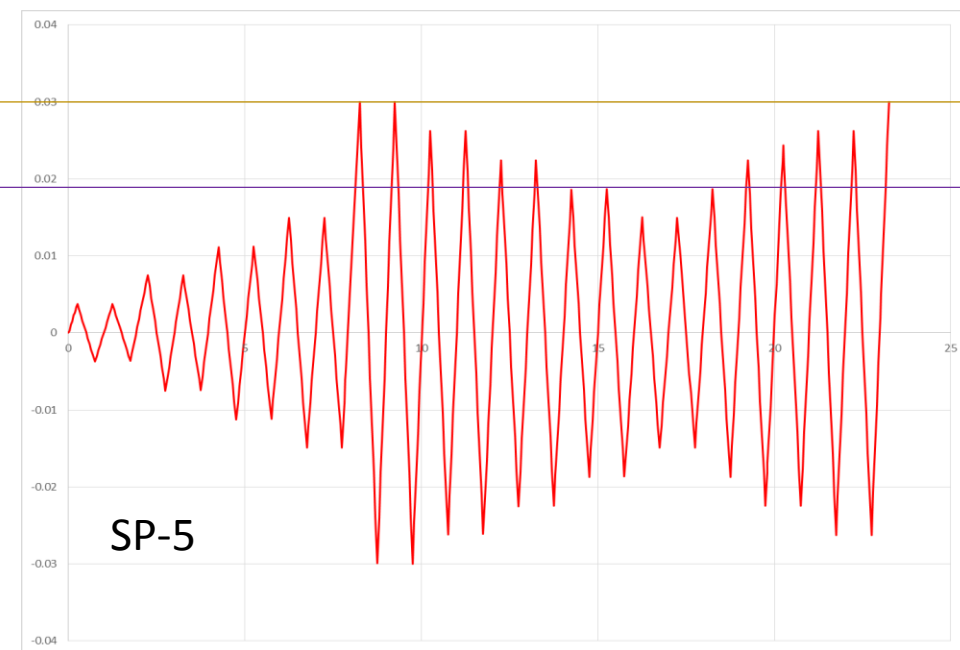
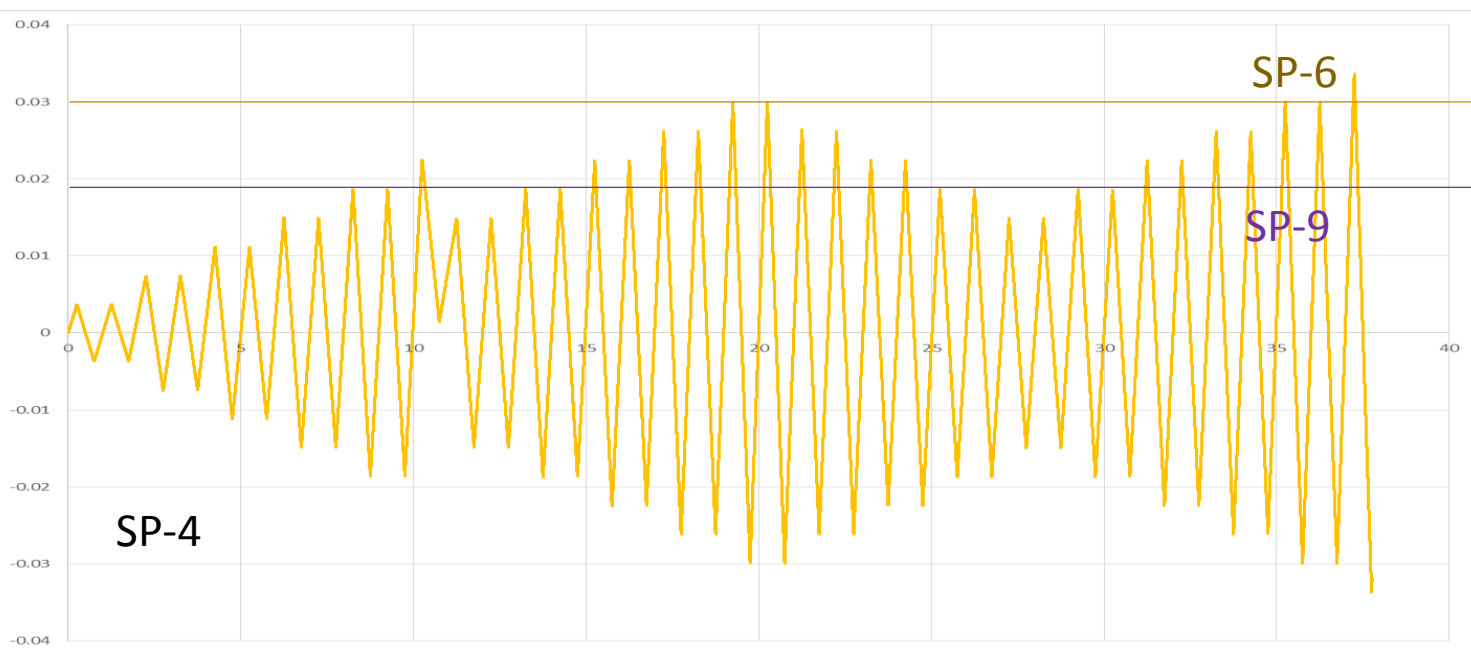
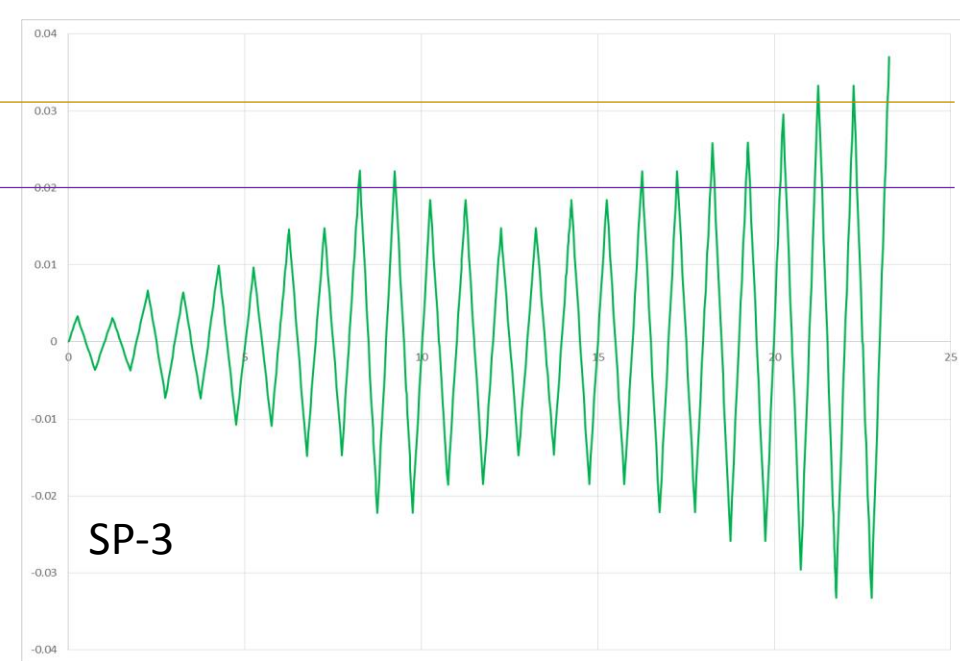




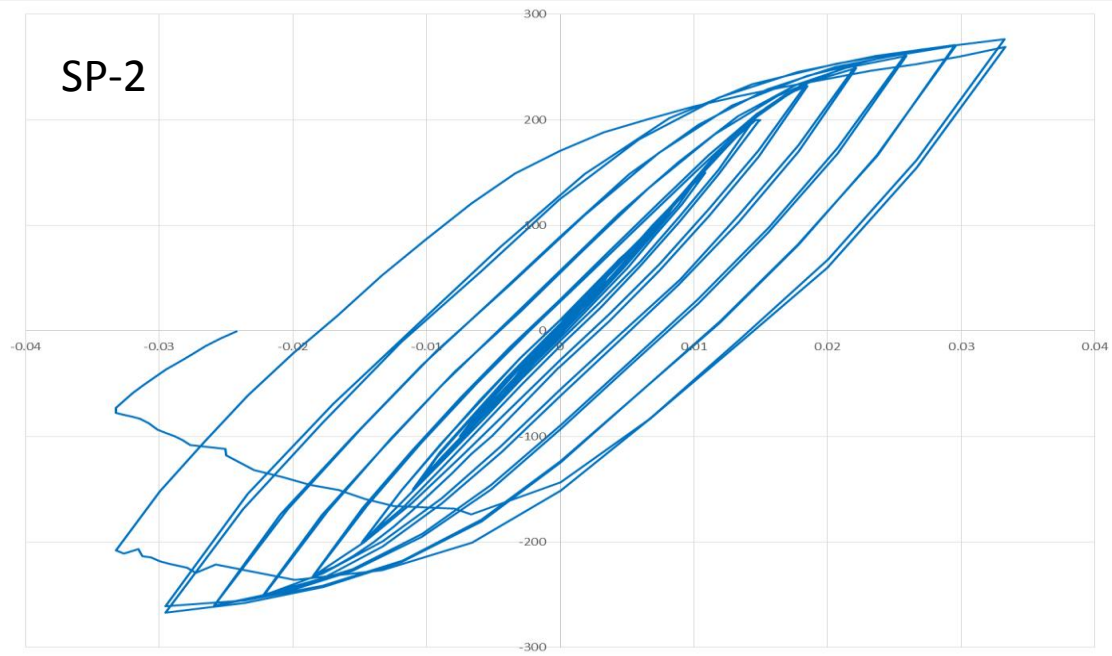
SP-6

SP-9

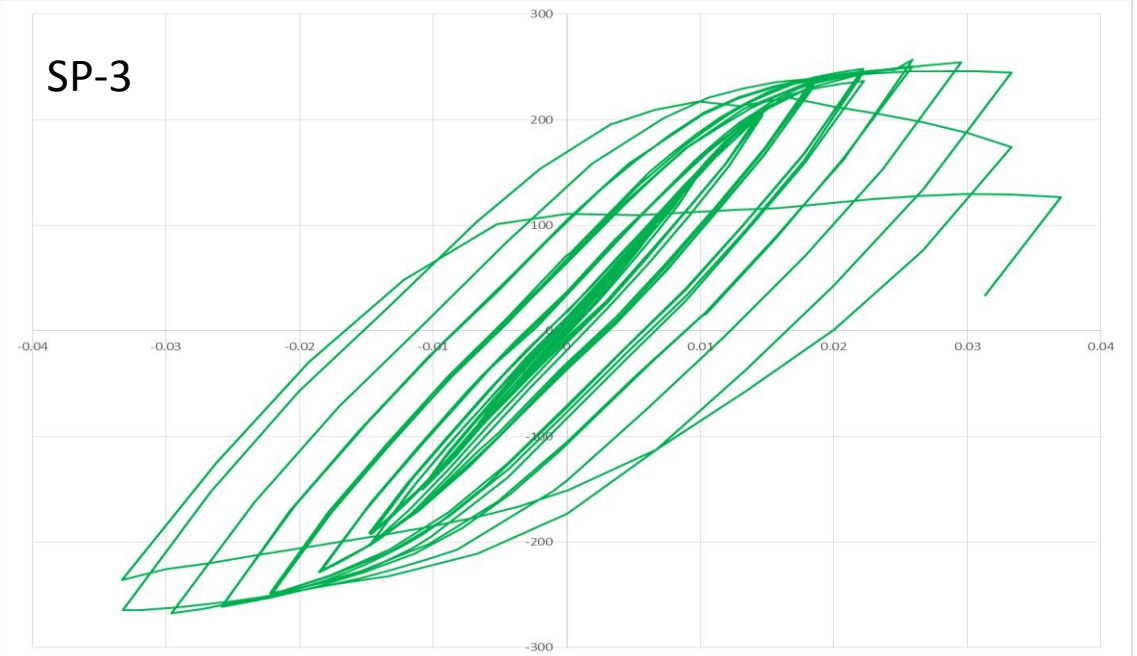
Ensayos de
amplitud
variable



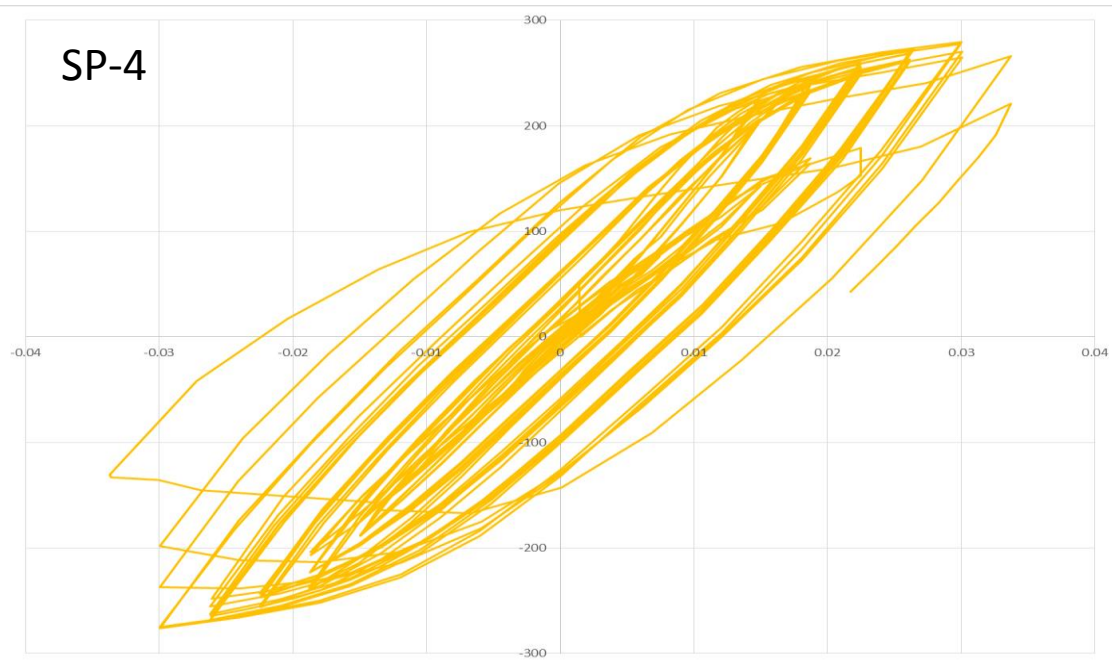
SP-2



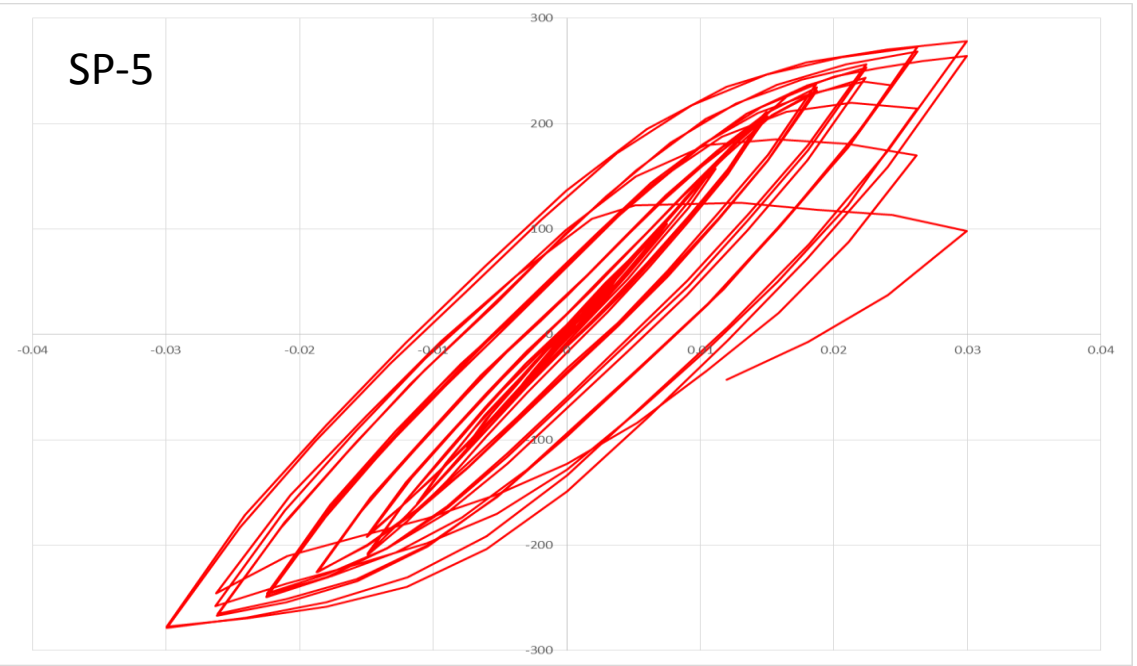
SP-3

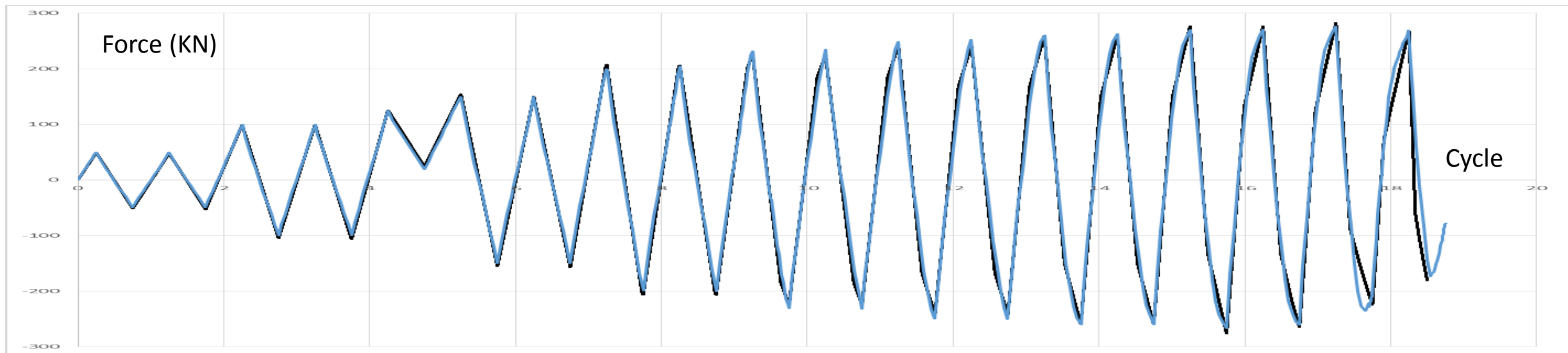
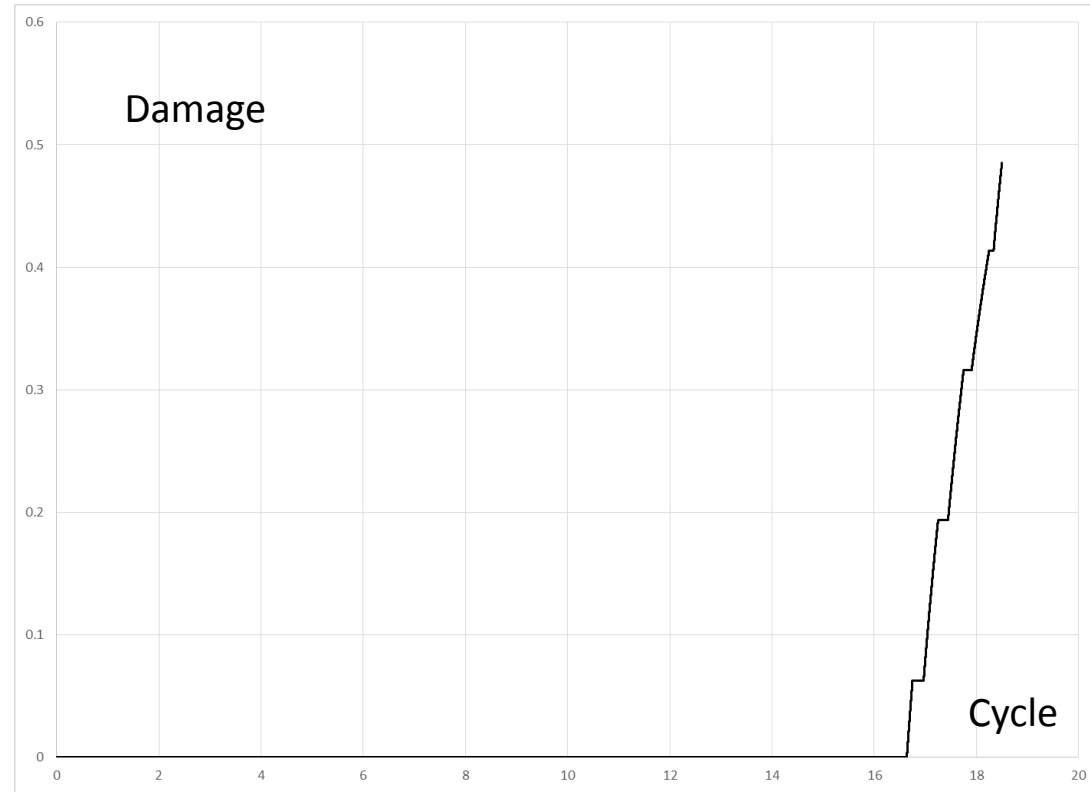
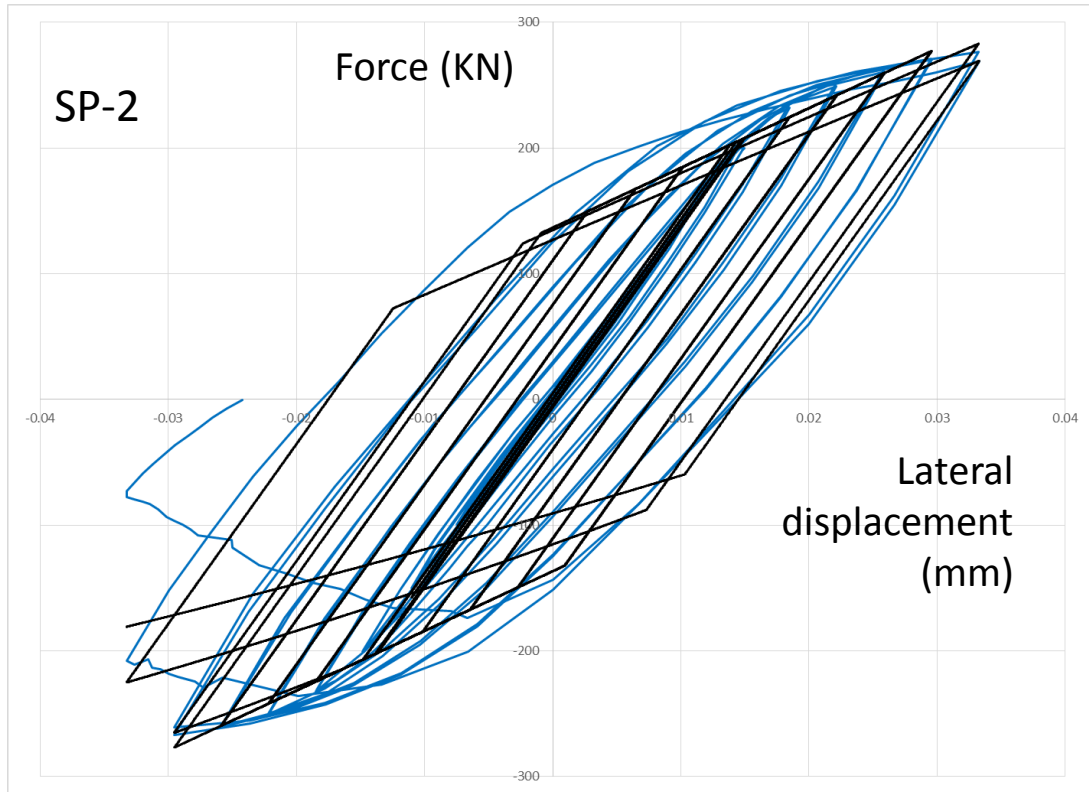


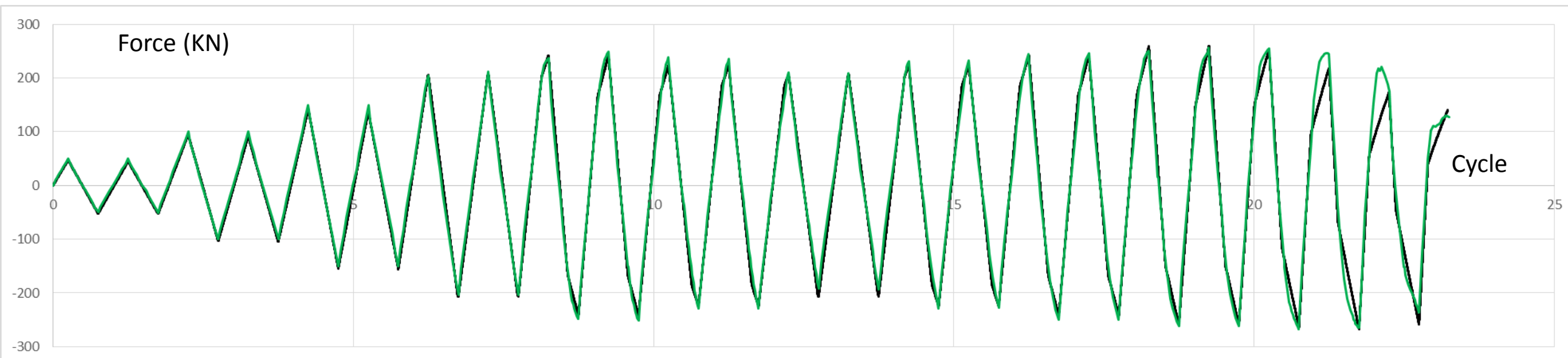
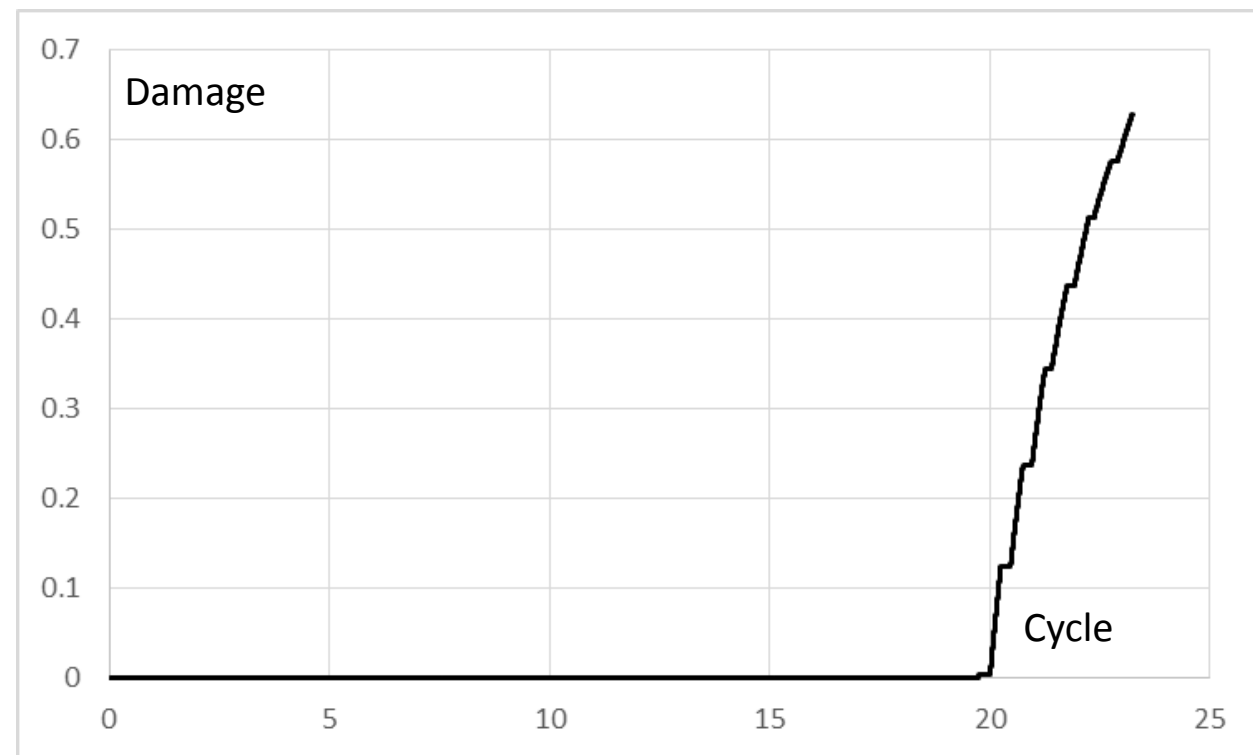
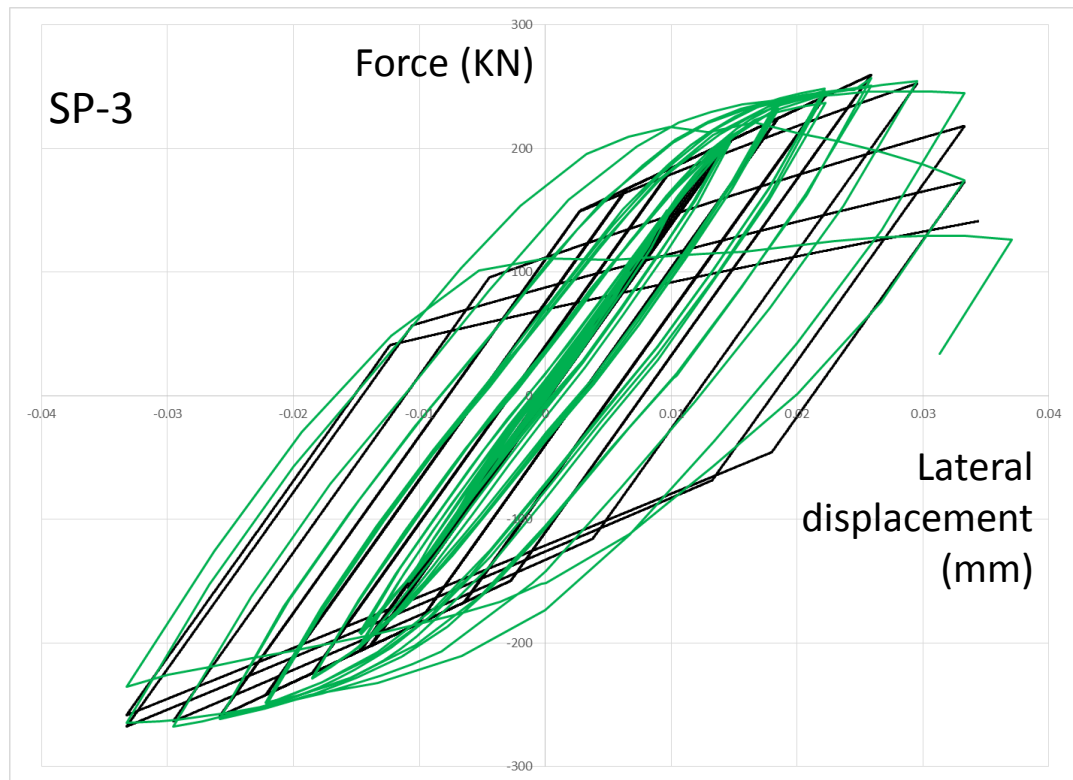
SP-4

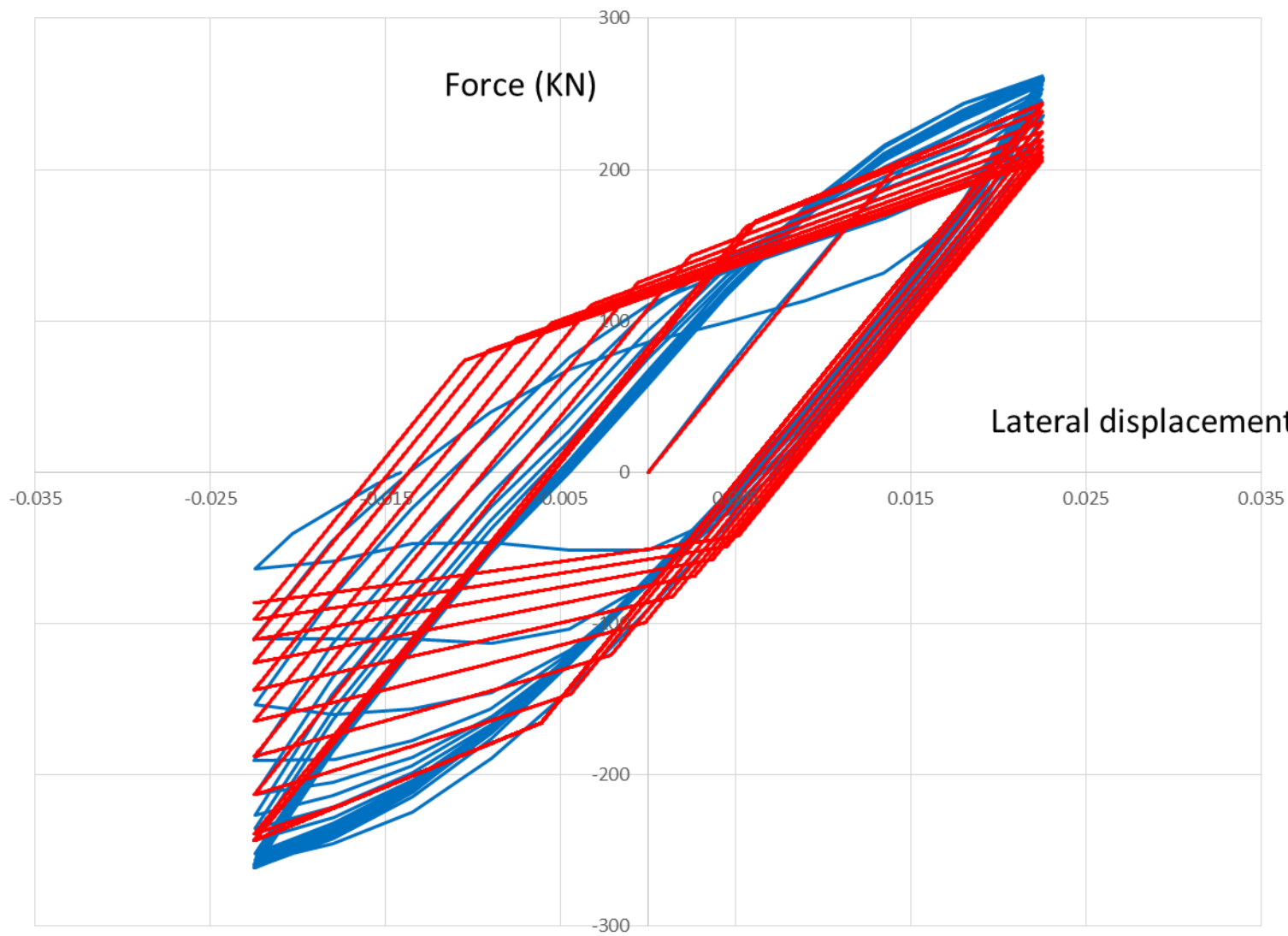


SP-5





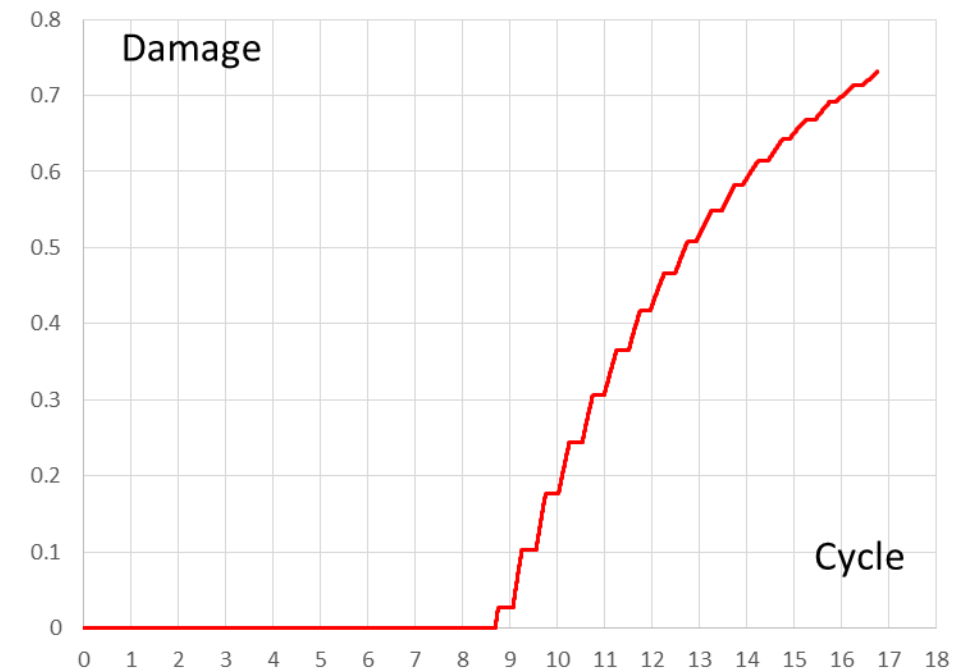


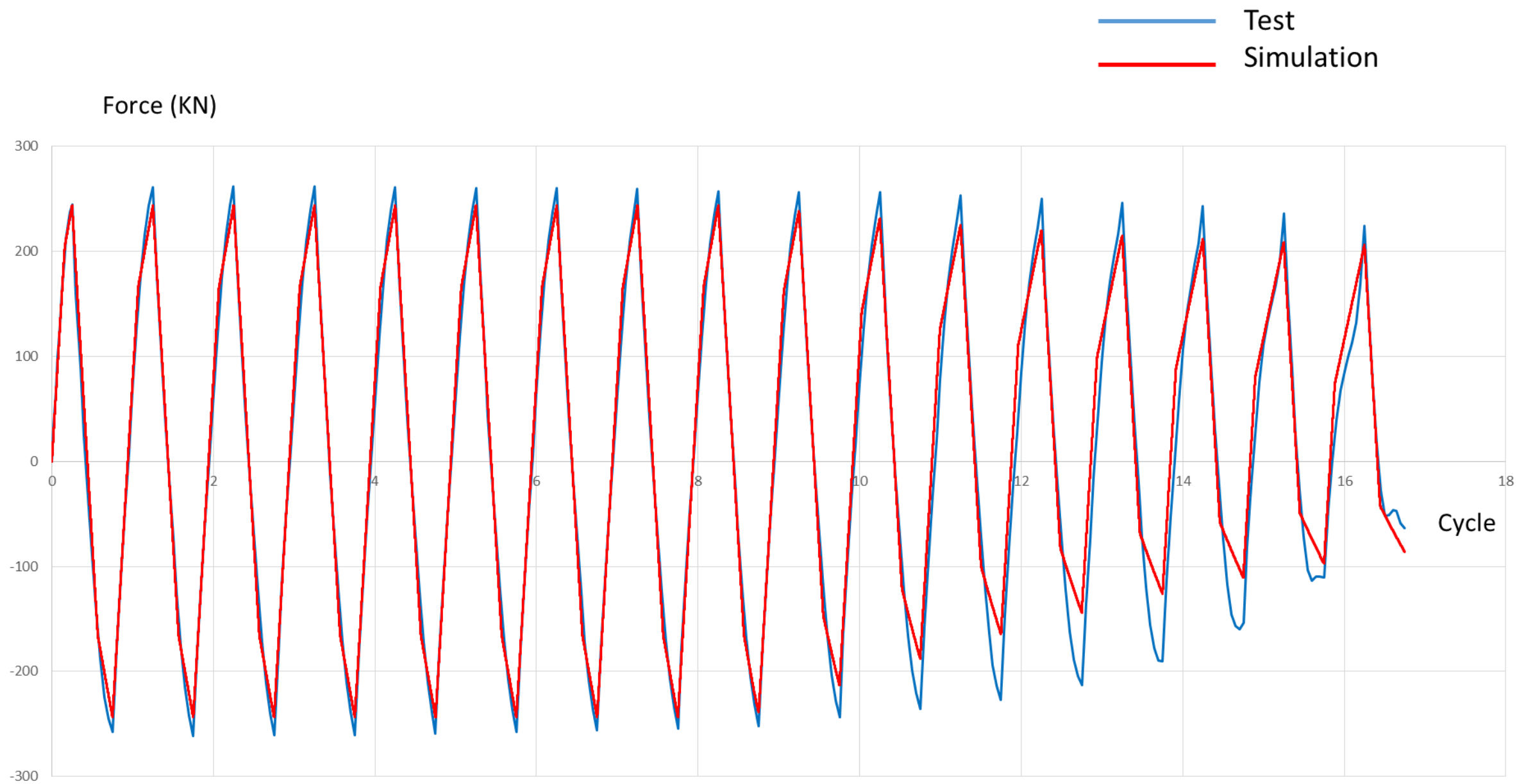


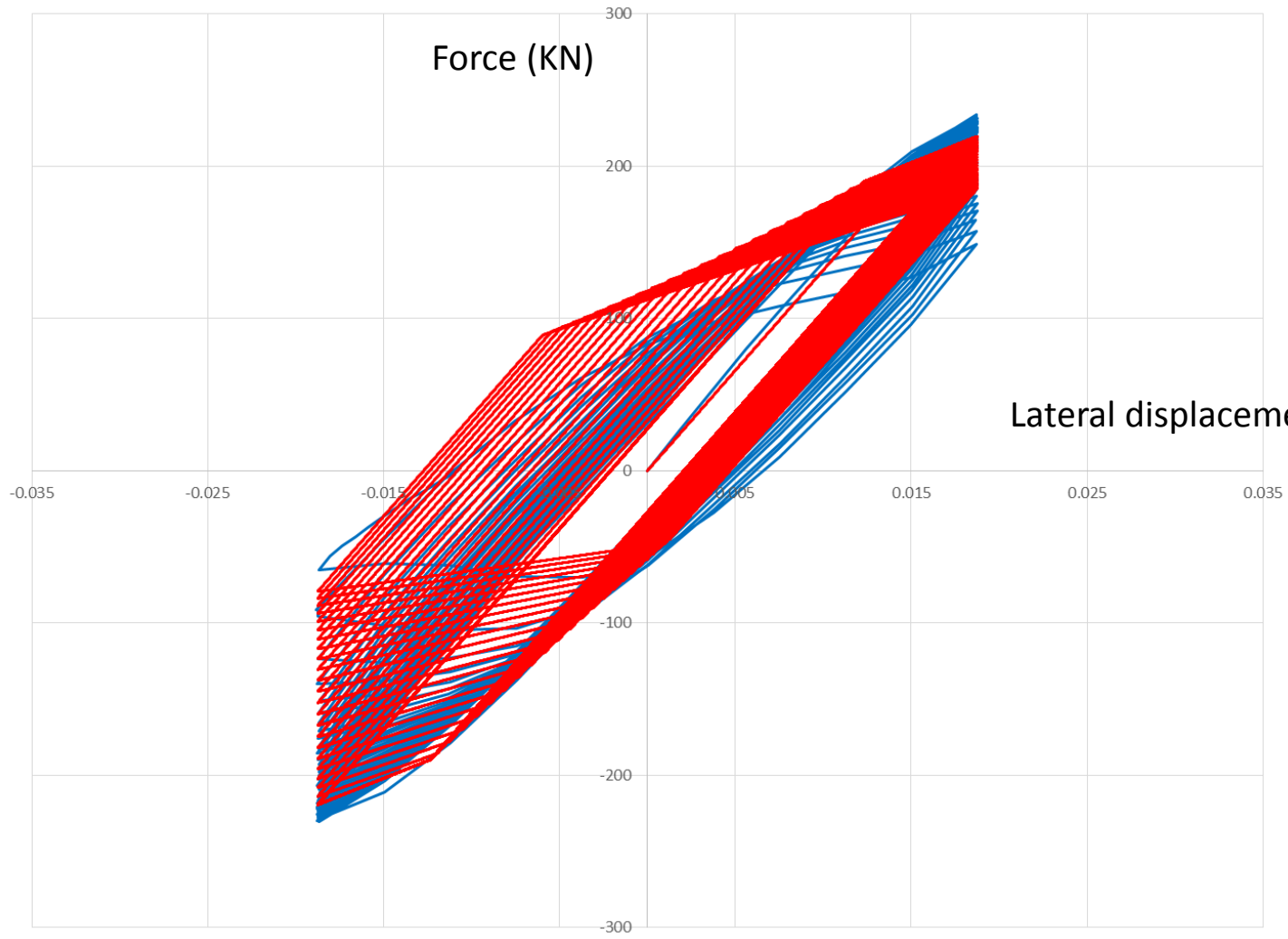
SP-8

— Test

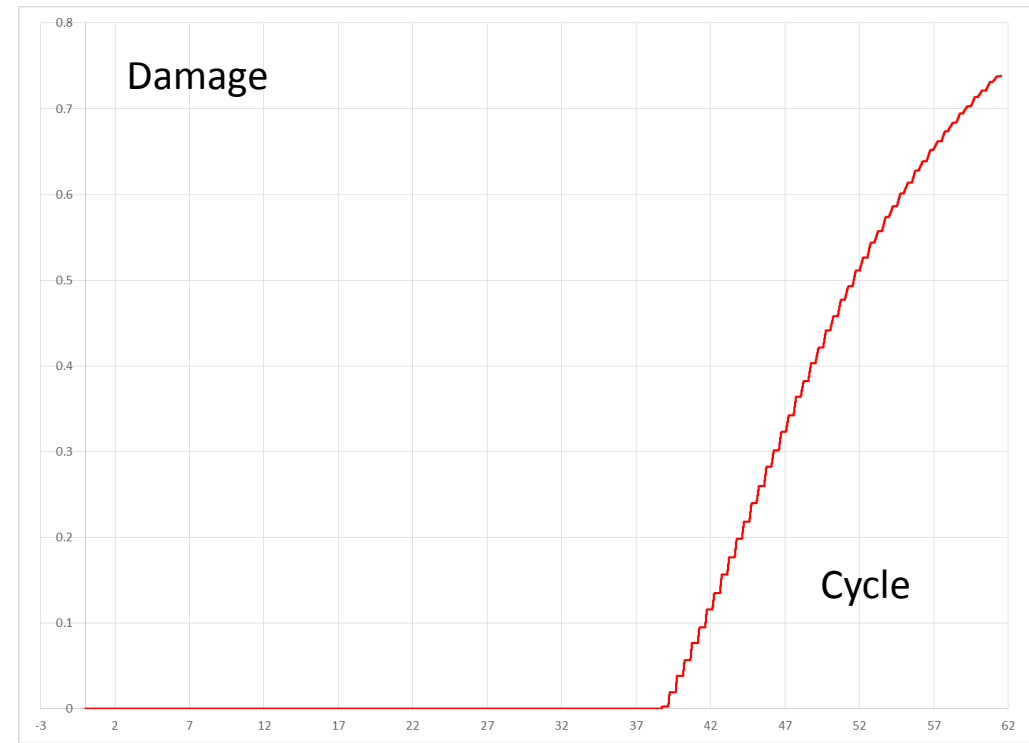
— Simulation

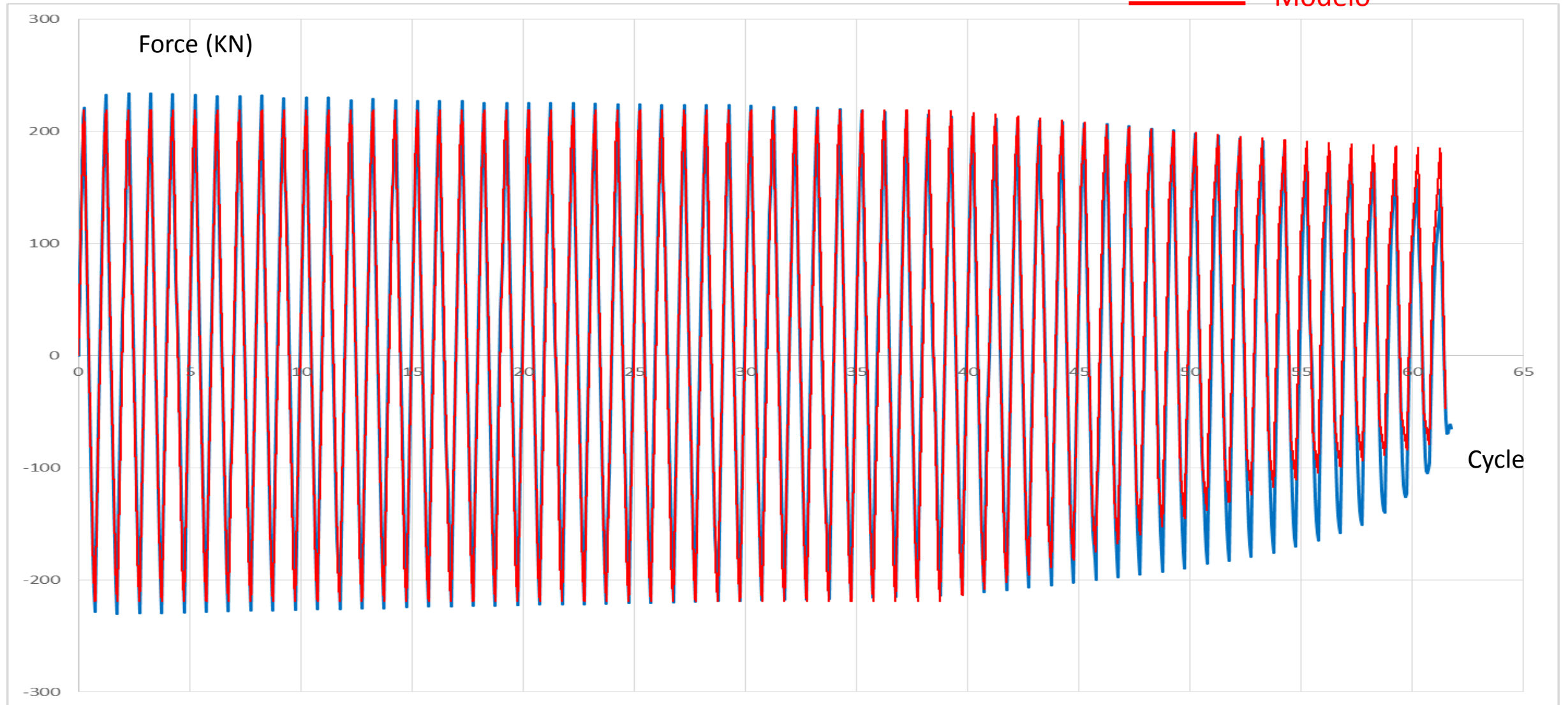






SP-9



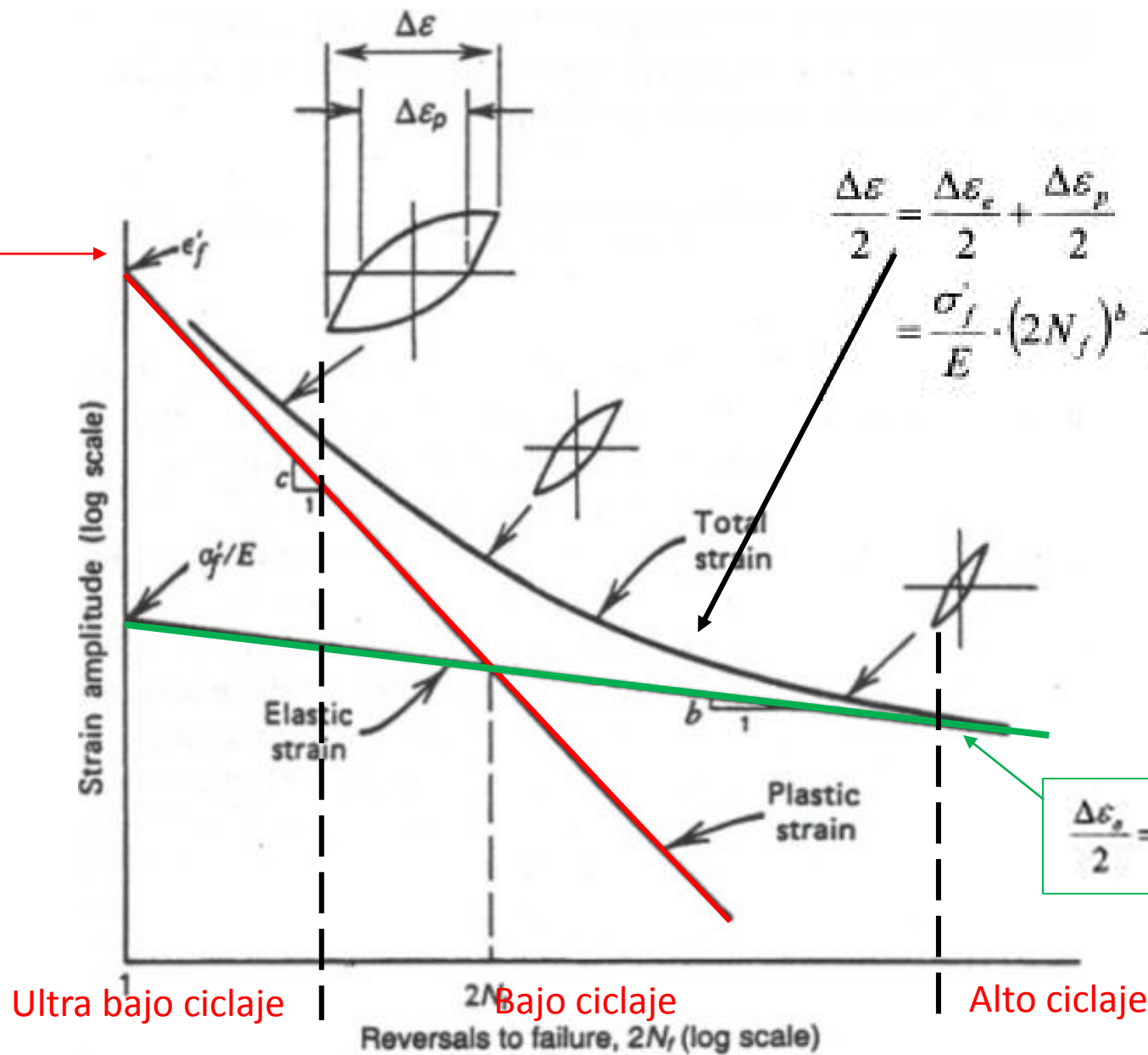


Manson-Coffin

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f \cdot (2N_f)^c$$

Manson-Coffin-Basquin

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \varepsilon}{2} &= \frac{\Delta \varepsilon_e}{2} + \frac{\Delta \varepsilon_p}{2} \\ &= \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \end{aligned}$$



$$\frac{\Delta \varepsilon_e}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} \cdot (2N_f)^b$$

Mecanismos de colapso en estructuras de acero

Modelado del pandeo local

Modelado de la propagación de fisuras bajo solicitaciones de fatiga de ultra bajo ciclaje

Observaciones finales

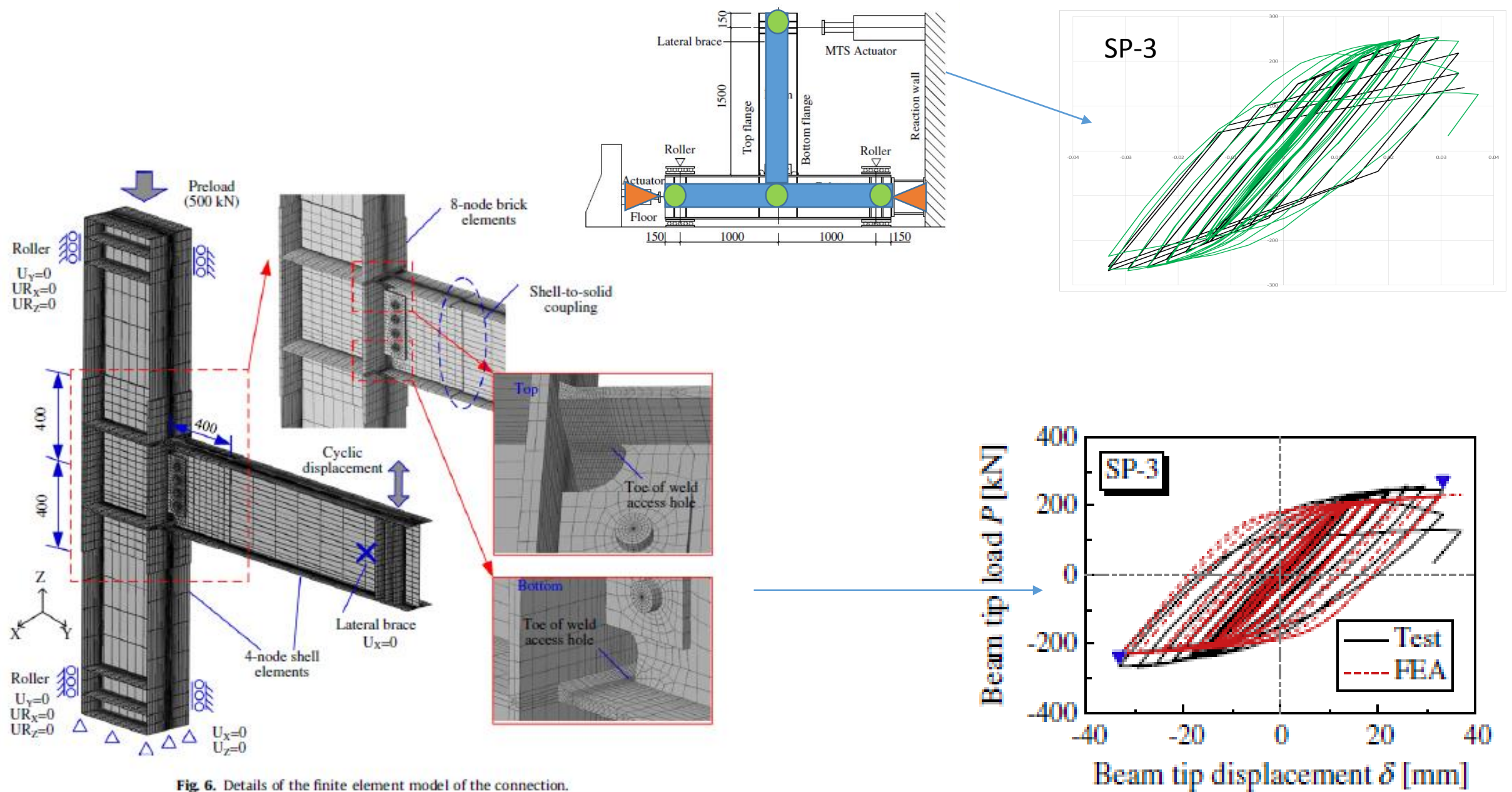
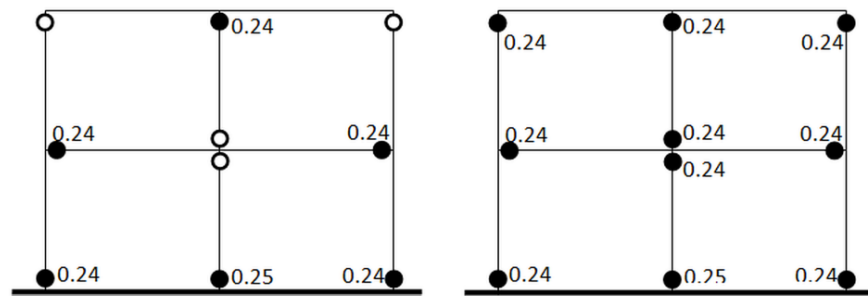
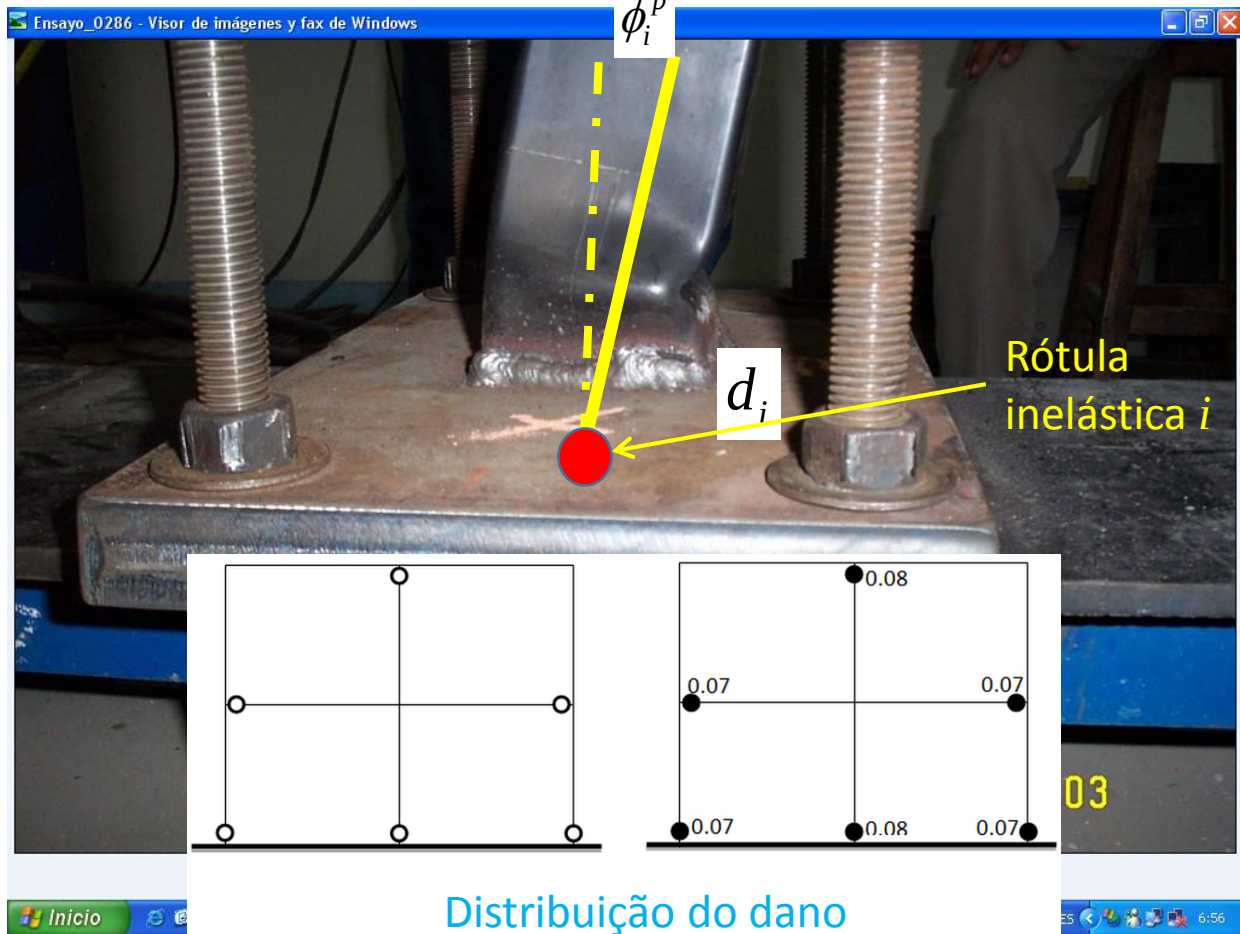
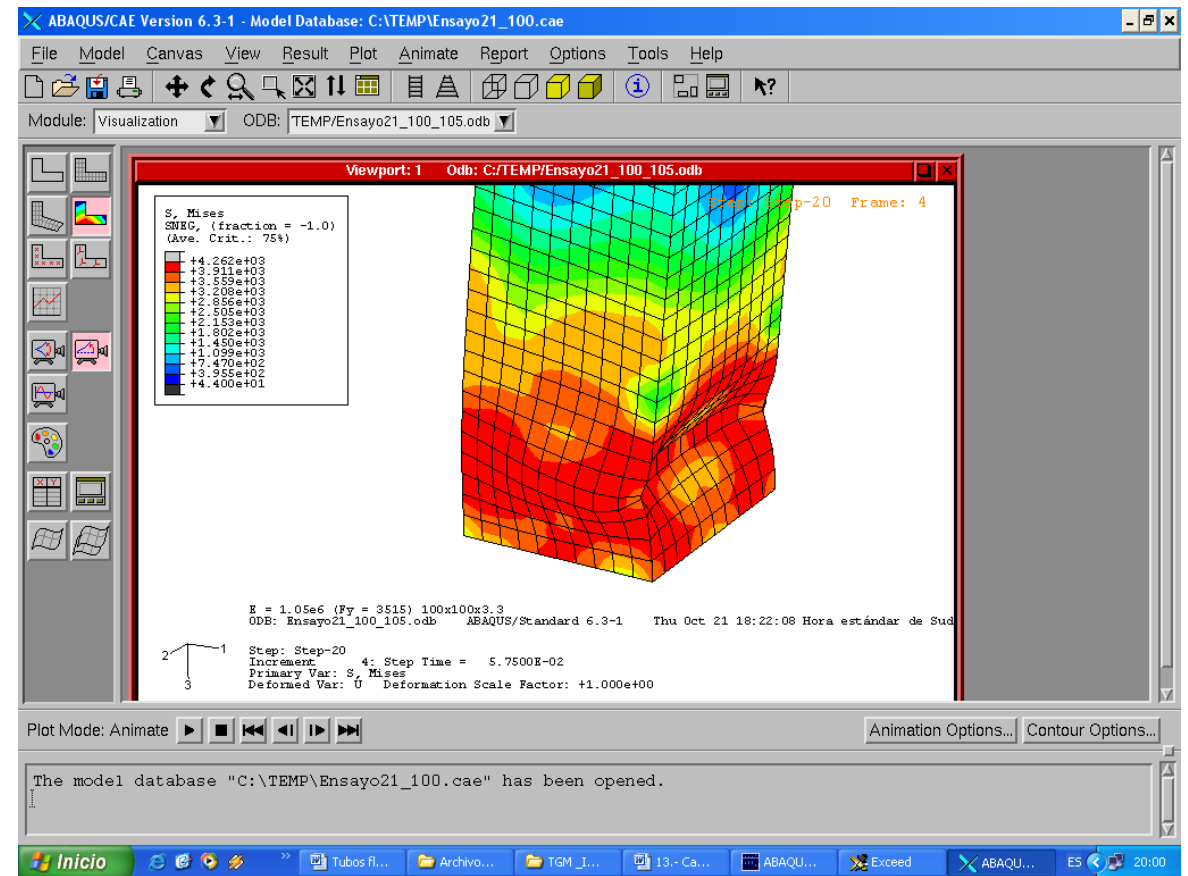
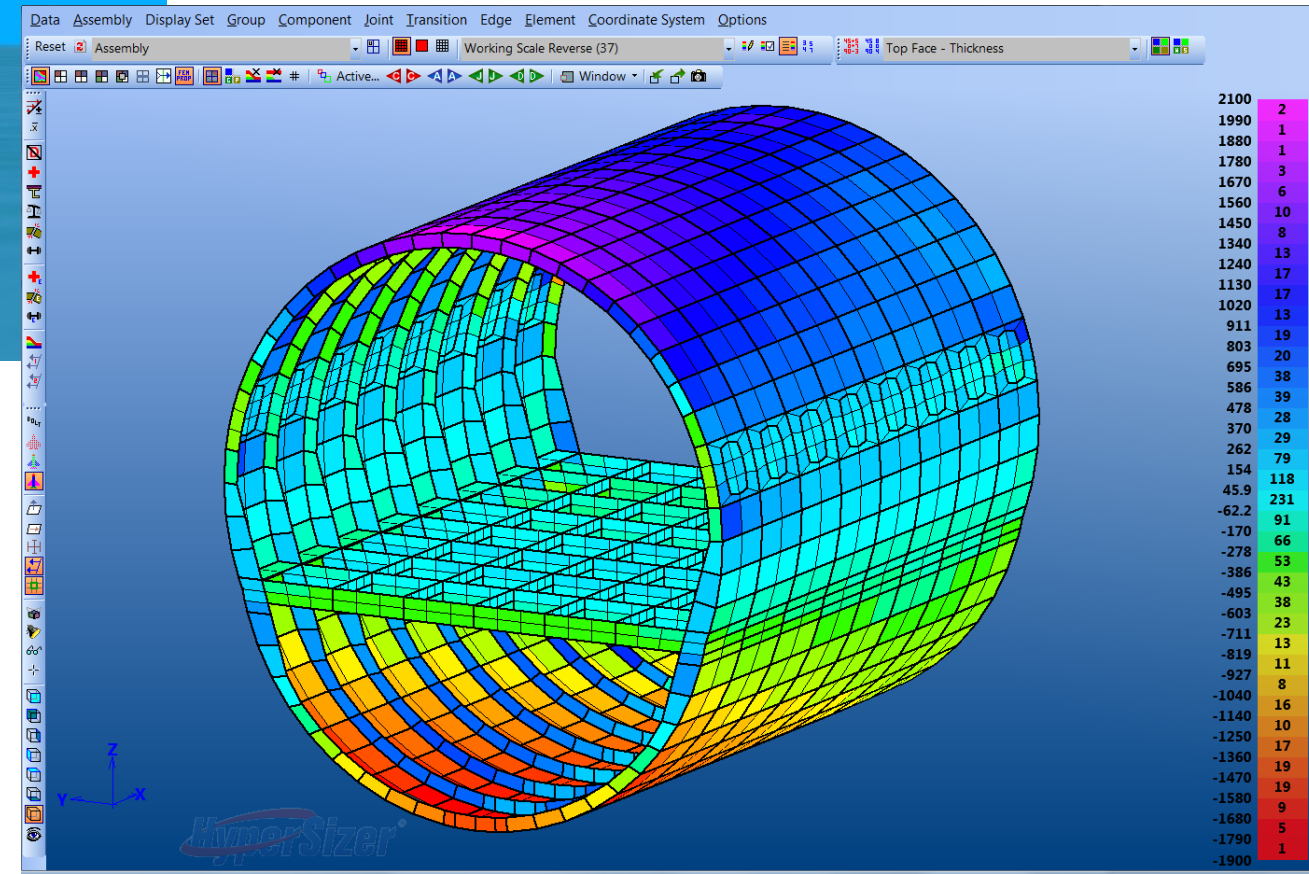


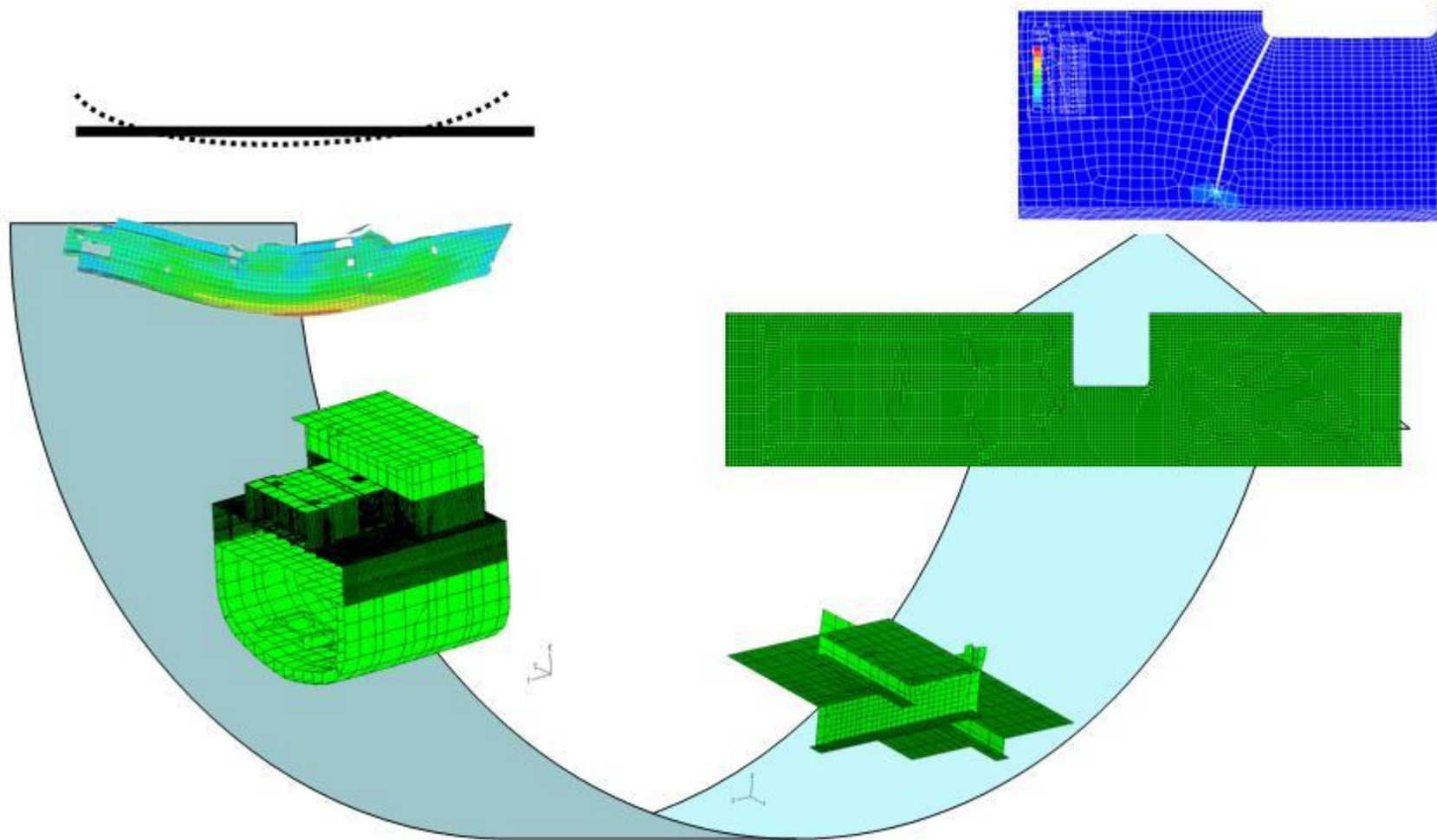
Fig. 6. Details of the finite element model of the connection.

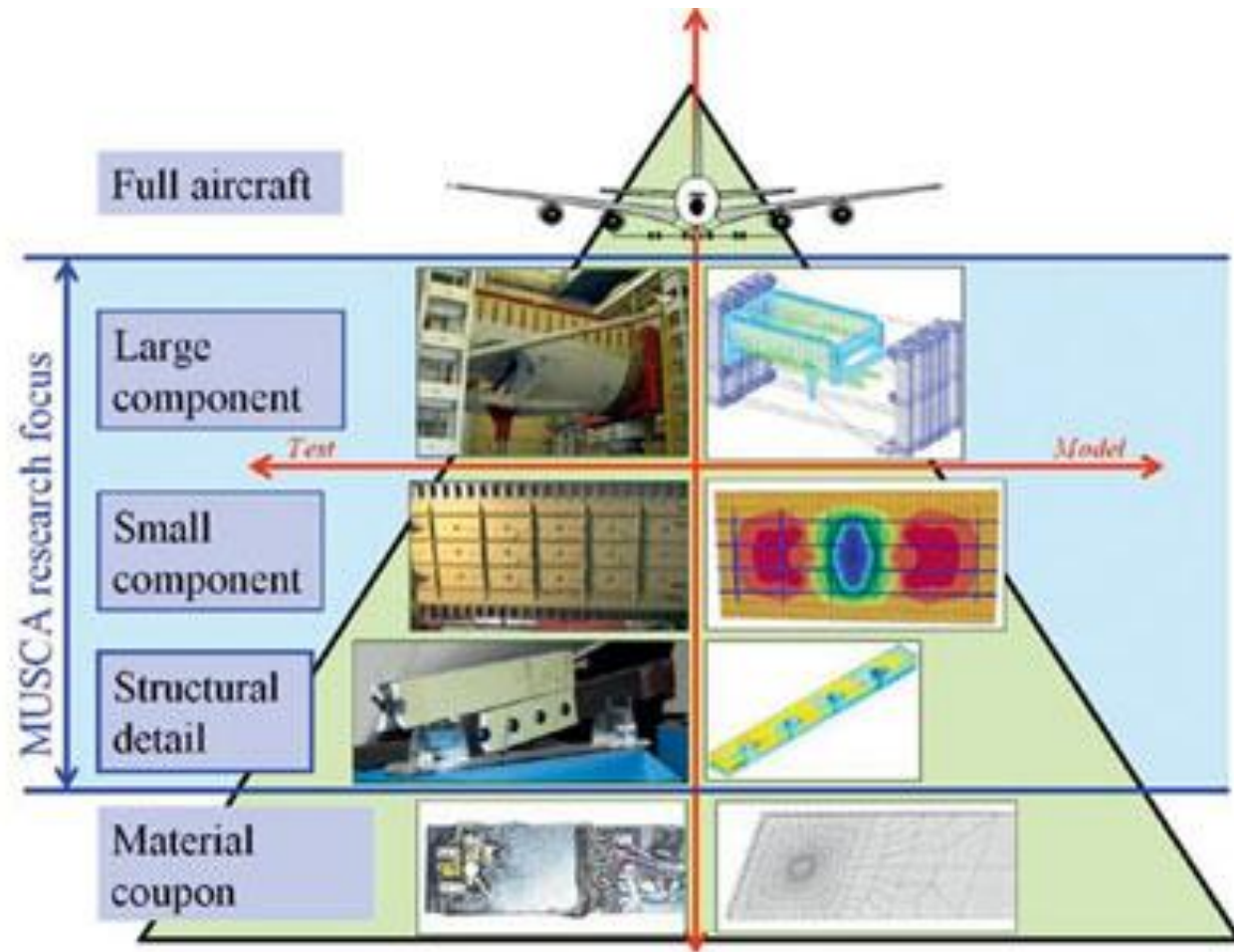


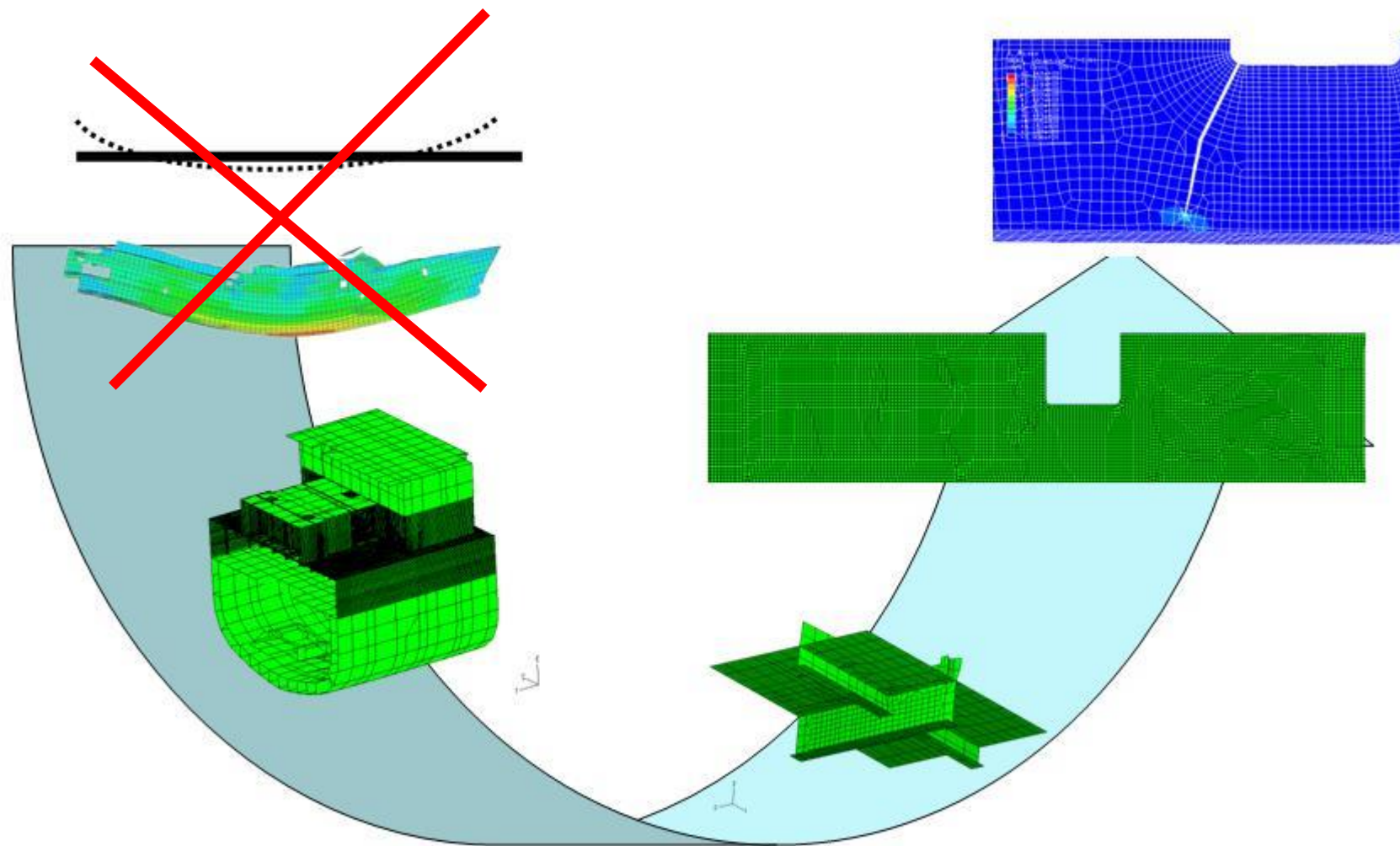
- Plastic hinges with no damage
- Plastic hinges with local buckling

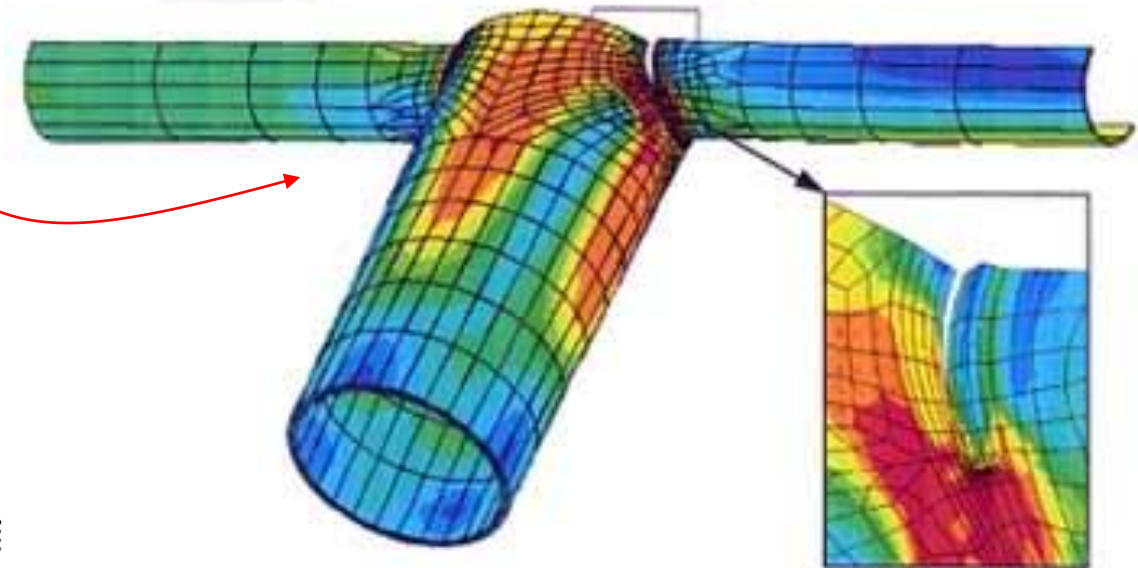
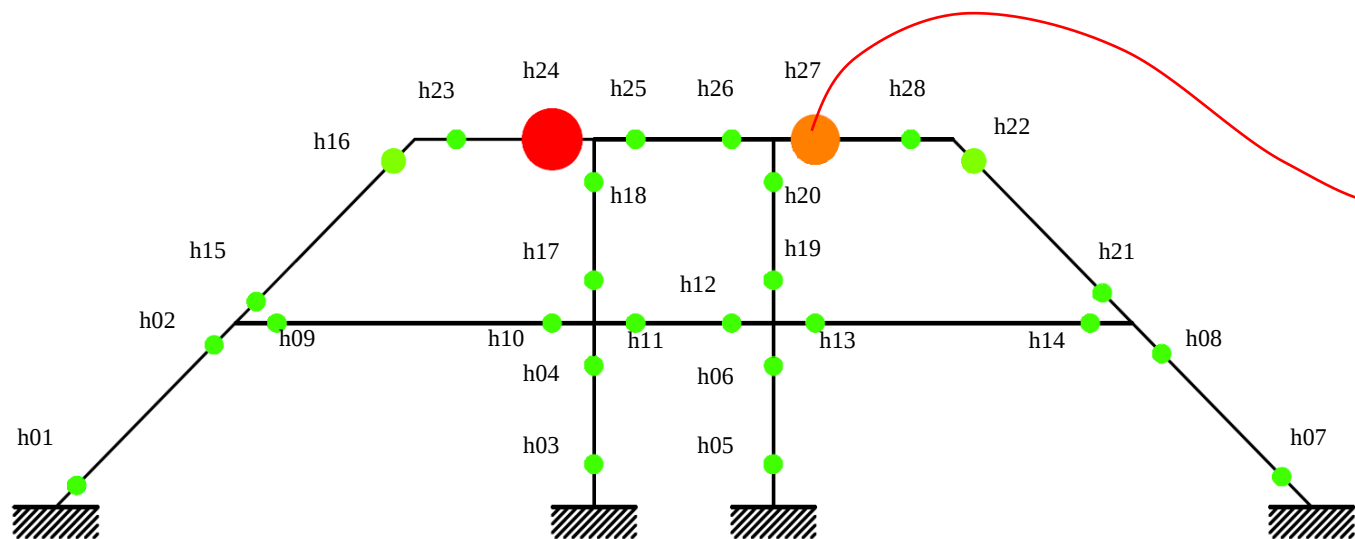












Damage map:

