

0.1. Seguridad estructural

Para poder determinar la seguridad de una estructura, podemos hacer un **análisis global plástico** y un **análisis global elástico**. Hasta ahora, lo único que hemos visto es el último. Esto implica que nuestras hipótesis consideran que las deformaciones y esfuerzos se encuentran dentro del límite elástico. Esto nos permite hacer cálculos de primer orden y de segundo orden mediante los efectos de $P - \Delta$ y $P - \delta$.

0.2. Tipos de estructuras

Podemos encontrar dos tipos de estructuras básicas:

- **Estructuras tipo TR:** son aquellas totalmente restringidas, que son diseñadas como pórtico rígido, donde las uniones tienen rigidez suficiente para que los ángulos sean invariables.
- **Estructura tipo TP:** en la cual se supone que las uniones no tienen suficiente rigidez suficiente como para mantener invariables los ángulos entre las barras que concurren.

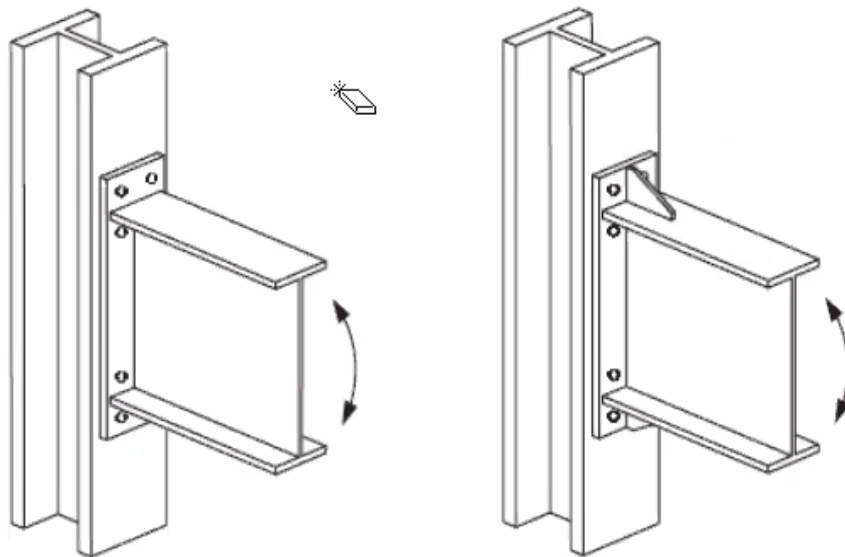


Figura 1: Esquema de tipos de unión.

0.3. Coeficiente de seguridad

El método normalizado para el cálculo del coeficiente de seguridad es a partir de **factores de carga y resistencia LRFD**. La ecuación general es:

$$\sum \gamma_i * Q_i \leq \phi * R_n.$$

Donde γ_i es el factor de carga, Q_i es el efecto de la carga i , y ϕ es el factor de resistencia.

El **grado de seguridad** se puede definir según la estructura de forma que tenga una aceptable probabilidad de permanecer en servicio durante la vida útil programada. Debe ser apropiado para que la estructura resista durante su ejecución y uso.

0.4. Fuerzas del viento

Este tipo de carga queda reglamentado en el CIRSOC 102. En particular, existen dos métodos que podemos utilizar dependiendo de las características de la estructura a analizar. Estos están definidos en capítulo 4 y 5 de dicho reglamento.

La definición de las mismas viene de un estudio estadístico, y determina cargas probables. En caso del viento, se trabaja con *presión*, que se calcula sobre superficies.

1. Edificios

No desarrollamos mucho este tipo punto. Es necesario ver desde un punto de vista estructural nuestros diseños. En principio, debemos ver como funcionan los **porticos** y otros sistemas como pueden ser vigas a contraviento.

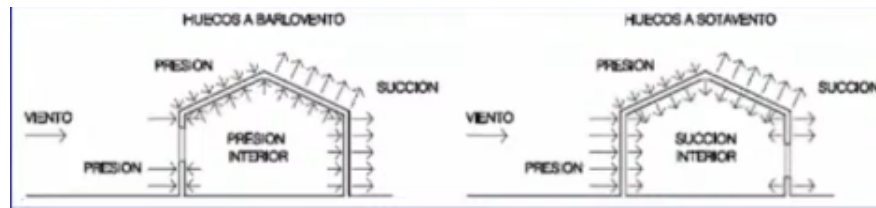


Figura 2: Esquema de fuerzas por viento

En general, estructuras de acero son muy interesante para construcciones de grandes luces, ya que son *estructuras livianas*.

2. Elementos sometidos a tracción axil

En principio, para este tipo de problemas, primero debemos considerar el área que estará siendo traccionada. Podemos distinguir tres tipos:

- **Área bruta.** A_g
- **Área neta** A_n : es el área descontando los agujeros para bulones. En caso de estar en tresbolillo, se debe considerar una formula especial.
- **Área neta efectiva** A_e : es el área neta teniendo en cuenta el *retraso de cortante*, que se da cuando no todos los elementos están conectados directamente. Ver ??

El A_e puede obtenerse con la formula $A_e = A_n * U$ donde U sale de:

$$U = 1 - (\bar{x}/L) \leq 0,9.$$

Donde el valor de \bar{x} será la excentricidad de la unión, es decir la distancia entre el baricentro del agujero hasta el baricentro de la pieza. En caso de una pieza con dos alas donde se cuenta con una sola línea de bulones, se considera unicamente los elementos directamente unidos.

2.1. Retraso de cortante

Se da cuando tenemos uniones donde no todos los elementos solicitados están conectados directamente. Esto se puede ver en Figure 3. Vemos que no hay forma física que la parte última de la pieza no conectada transmita tensiones.

3. Elementos sometidos a compresión

3.1. Resistencia de diseño a compresión

La resistencia de diseño para pandeo flexional de barras comprimidas axialmente se determina de la siguiente forma:

$$\phi_c * P_n.$$

Donde $\phi_c = 0,85$ y P_n es la resistencia nominal en kN, dado que $P_n = F_{cr} * A_g * 10^{-1}$
La tensión crítica de pandeo F_{cr} dependiendo del factor de esbeltez, que se calcula como:

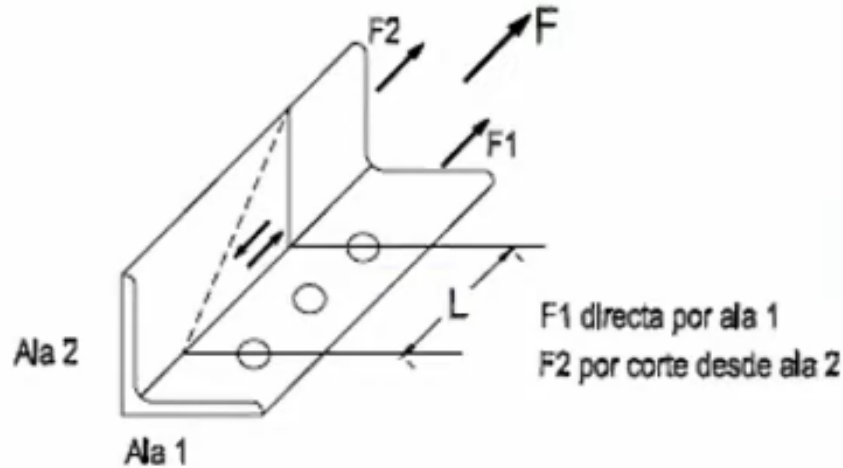


Figura 3: Esquema de retraso de cortante

$$\lambda_c = \frac{1}{\pi} * \frac{k * L}{r} * \sqrt{\frac{F_y}{E}}. \quad (\text{Esbeltez})$$

Vemos, que para un mayor radio de giro, tendremos menor esbeltez, que nos permite cargar más la columna. Esto lo podemos ver al calcular F_{cr} , que se calcula de la siguiente forma:

$$\begin{cases} \lambda_c d \leq 1,5 \rightarrow F_{cr} = 0,658 \lambda_c^2 * F_y \\ \lambda_c d \geq 1,5 \rightarrow F_{cr} = \frac{0,877}{\lambda_c^2} * F_y \end{cases}.$$

La variación dependiendo se debe a la existencia de **tensiones residuales** que pueden hacer que elementos entren en fluencia antes de lo previsto. Por eso es necesario para esbelteces bajas tener especial cuidado.

3.2. Longitud efectiva de una barra comprimida

El **factor de longitud efectiva** k se debe determinar de acuerdo con lo especificado en el Capítulo C, Sección C.2 del reglamento CIRSOC 301. Los valores presentados en Figure 4, se pueden ver valores recomendados en casos donde no se usen los nomogramas (recomendado).

El uso de nomogramas depende de si tenemos estructuras desplazables o indesplazables, donde se obtienen valores de G_a y G_b , que salen de la siguiente formula:

$$G = \frac{\Sigma(I_c/L_c)}{\Sigma I_g/L_g}.$$

Donde se consideran las rigideces que vienen de las columnas y de las vigas. Los nomogramas utilizados se encuentran en el reglamento CIRSOC y copiados en Figure 5.

Este punto es crítico, ya que de él dependen todos los valores y fuerzas admisibles a compresión.

3.3. Clasificación de secciones

Las secciones pueden ser compactas, no compactas y con elementos esbeltos. Es importante saber cuando los elementos son **esbeltos**, ya que se pueden dar pandeos o abollamientos en los lados o alas de la columna. Esto queda claro en la fig. 6.

La forma de calcular si un elemento es esbelto o no se hace desde la Tabla B.5.1. del reglamento CIRSOC 301. Esta presenta varios casos, donde describe el elemento y da la forma para considerar el tipo de elemento.

| | | | | | | |
|--|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| La forma de pandeo se indica en línea de puntos | (a) | (b) | (c) | (d) | (e) | (f) |
| Valores teóricos de K | 0,5 | 0,7 | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 2,0 |
| Valores recomendados de proyecto para condiciones reales | 0,65 | 0,80 | 1,2 | 1,0 | 2,10 | 2,0 |
| Condiciones de vínculo | Rotación y Traslación impedida Rotación libre y Traslación impedida Rotación impedida y Traslación libre Rotación libre y Traslación libre | | | | | |

Figura 4: Valores recomendados para k

En caso de que los elementos no son esbeltos, podemos seguir utilizando las formulas a utilizar son las dadas, y caso contrario se lo deberá afectar por un coeficiente Q que penalizará esta condición.

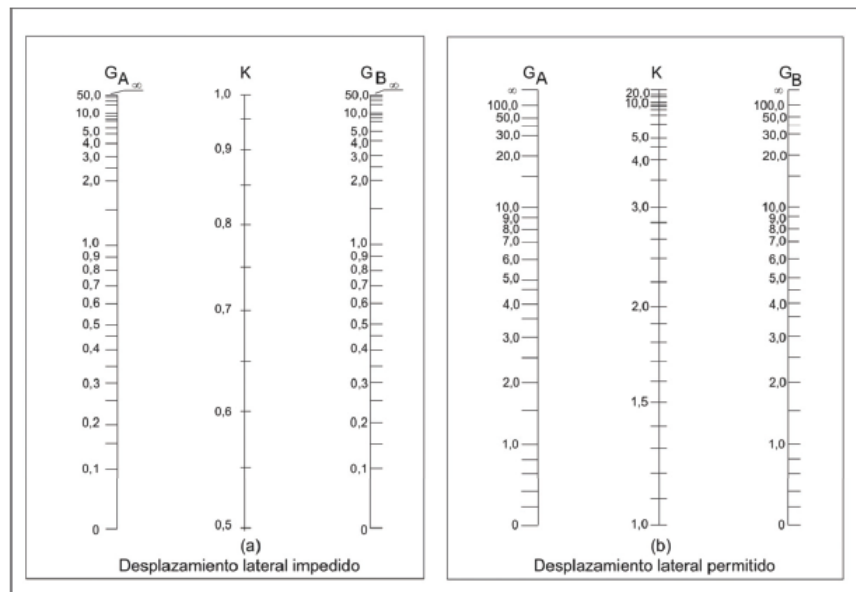


Figura 5: Nomogramas de figura C-C.2.2. de Comentarios CIRSOC 301

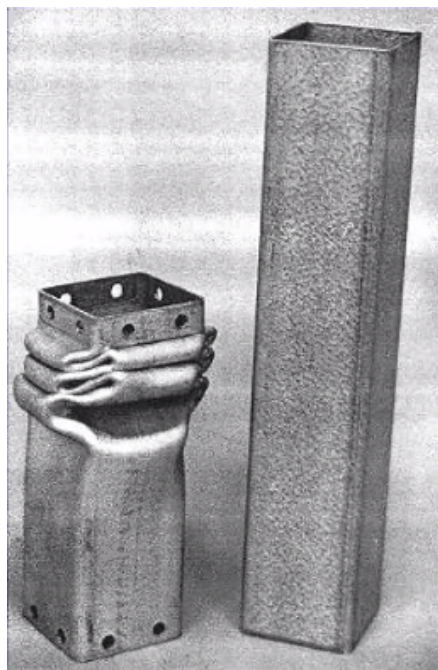


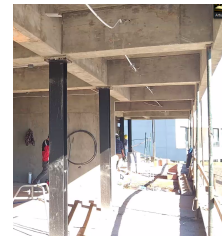
Figura 6: Pandeo local.

3.4. Ejemplo teorico-práctico

Siguiendo un ejemplo práctico, siguiendo la estructura mostrada en fig. 7



(a) A subfigure



(b) A subfigure

Figura 7: Fotos reales de la estructura

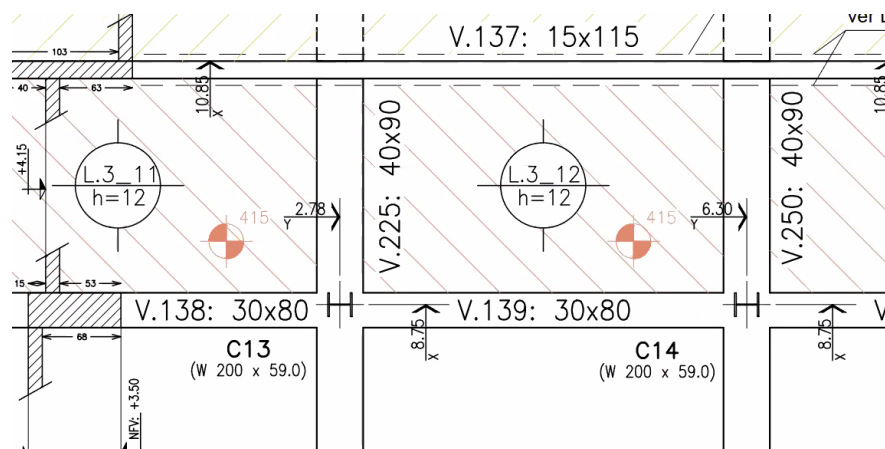


Figura 8: Plano a calcular

Consideramos una estructura como la siguiente:

Entonces, tenemos que considerar un $k = 1,2$. Consideramos una altura desde $h = 2.8$ m, con un, y tenemos un perfil **W200.59**, que vamos a considerar como el **W8x40** que se encuentra en el reglamento CIRSOC. El perfil tendrá un $f_y = 345$ MPa y $f_u = 450$ MPa.

Desarrollo:

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{1}{\pi} * \frac{k * L}{r} * \sqrt{\frac{f_y}{E}} \\ \lambda &= \frac{1}{\pi} * \frac{1 * 280}{5,18} * \sqrt{\frac{355}{200000}} \\ \lambda &= 0,8698.\end{aligned}$$

Entonces podemos obtener los valores de F_{cr} de la siguiente forma:

$$f_{cr} = 0,658^{0,8698^2} * F_y$$

$$f_{cr} = 258.6 \text{ MPa.}$$

Conseguimos entonces los valores de tensión y carga critica como:

$$P_d = 1660 \text{ kN.}$$

3.4.1. Recordatorio

Es necesario acordarse de que cuando $\lambda \leq 1,5$ se utiliza:

$$F_{cr} = 0,658^{\lambda^2} * F_y.$$

Y cuando se da que $\lambda \geq 1,5$ tenemos que considerar:

$$F_{cr} = \frac{0,877}{\lambda^2} * F_y.$$

4. Estabilidad del equilibrio en placa

Esta parte es importante para la seguridad estructural. Es posible ver lo que se realiza en la siguiente imagen:

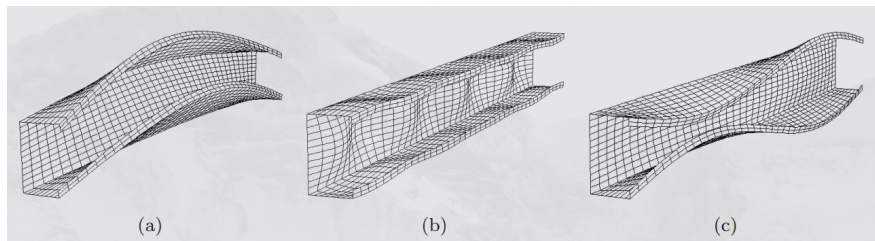


Figura 9: Ejemplos de pandeo localizado.

Estos problemas son más preponderantes en los perfiles delgados, que serán perfiles no compactos.

4.1. Pandeo en placas planas

Podemos tener dos tipos de pandeos: el pandeo precrítico y el pandeo poscrítico. El **pandeo precrítico** puede ser elástico o inelástico, mientras que el **pandeo poscrítico** es siempre inelástico.

Existen soluciones gráficas y formulas simples que permite resolver las ecuaciones diferenciales para la resolución de este tipo de problemas, que en principio se como:

$$F_{ki} = k * \frac{\pi^2 * E}{12 * (1 - \mu)} * \frac{1}{(b/t)^2}.$$

Donde el valor de k depende de como esta apoyada la columna de los lados no cargados, que puede ser obtenido de la Figure 10

Cabe notar que estos valores dependerá de las condiciones de apoyo perpendicular a la fuerza.

4.1.1. Pandeo precrítico elástico

Utilizando la formula ya dada, se puede encontrar el valor de k_1 para encontrar el corte critico como se desarrolla:

$$\tau_{ki} = k * \frac{\pi^2 * E}{12 * (1 - \mu)} * \frac{1}{(b/t)^2}.$$

$$k_1 = 5,34 + \frac{4}{\alpha} \longrightarrow \alpha \geq 1$$

$$k_1 = 4 + \frac{5,34}{\alpha} \longrightarrow \alpha \leq 1.$$

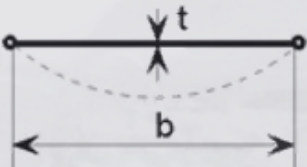
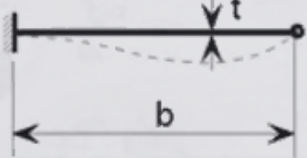
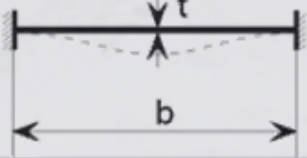
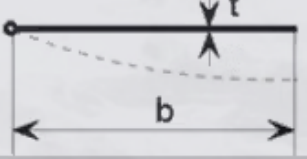
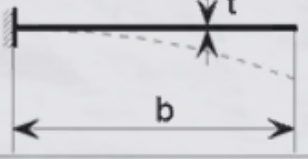
| Case | Description of support at the unloaded edges | | k |
|------|--|--|-------|
| 1 | Both edges simply supported |  | 4,00 |
| 2 | One edge simply supported, the other fixed |  | 5,42 |
| 3 | Both edges fixed supported |  | 6,97 |
| 4 | One edge simply supported, the other free |  | 0,425 |
| 5 | One edge fixed, the other free |  | 1,277 |

Figura 10: Valores de K

Donde el valor de α es a/h . Los problemas dados por el corte se encuentran principalmente cerca del apoyo, donde los esfuerzos son máximos.

La forma de poder mejorar la situación es mediante la utilización de **rigidizadores**, que nos permiten reducir la distancia a .

4.1.2. Pandeo precrítico inelástico

Se puede hacer mediante la fórmula de Basler, que es:

$$\tau_{cr} = \sqrt{\tau_{pr} * \tau_{ki}}.$$

4.1.3. Combinación de tensiones

Se nos puede dar la situación donde se tengan tanto tensiones normales y tangenciales. Esto es necesario considerar una formula mucho más compleja que considera las tensiones reales actuantes, tensiones críticas sin sobreposición y relaciones de tensiones, aunque es posible hacerlo mediante el reglamento de forma simplificada.

4.2. Pandeo poscrítico

Es una sobretensión que es posible aprovechar. Se da cuando, luego del pandeo dado que luego del pandeo la distribución de tensiones se da de forma distinta, bajando en el medio y aumentando en los costados, incluso superando la tensión crítica de pandeo, que se da porque los bordes son indesplazables y permiten entonces tomar más carga. Esto se ve en ??.

Esto se da mediante el concepto de **ancho efectivo**, que es menor al ancho real, que nos da el valor de la carga crítica considerando la sobrerresistencia.

5. Flexión

Un miembro sometido a flexión es un miembro estructural sobre el que actúan cargas perpendiculares a su eje que producen flexión y corte.

Normalmente se utilizan perfiles canal, vigas W, secciones armadas y abiertas.

Podemos distinguir dos tipos de vigas según su soporte lateral:

Vigas con soporte lateral adecuado son aquellas con arriostramiento poco espaciado, y donde la inestabilidad global no controla la capacidad.

Vigas sin soporte lateral son arriostramientos con espaciado mayor, y donde la inestabilidad global puede controlar la capacidad.

De acuerdo a la geometría de la sección

Vigas de sección compacta

Vigas de sección no compacta

Vigas de sección esbelta

5.1. Modos de falla

Se pueden distinguir varios tipos de falla, tales como:

Plastificación de la sección se da cuando se puede llegar a la plastificación total sin necesitar de llegar a las tensiones críticas de pandeo.

Pandeo lateral torsional

Pandeo local se puede dar tanto en el alma o en el ala.

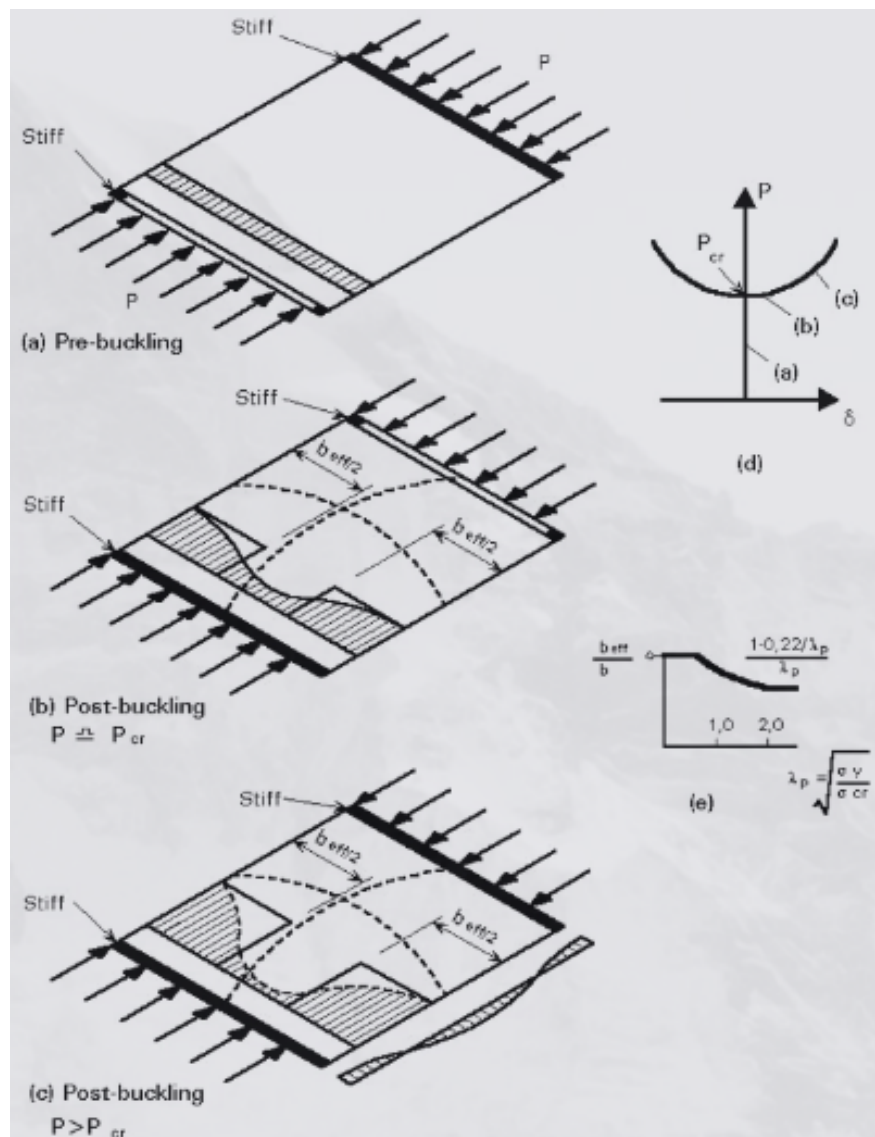


Figura 11: Pandeo poscrítico.

Las hipótesis iniciales son las comunes: no hay inestabilidad, comportamiento perfectamente elástico-plástico, no hay fractura ni fatiga. Se Puede conseguir un momento plástico M_p que es donde se tiene la máxima tensión debido a que la sección se encuentra plastificada.

A partir del desarrollo de la sección sometida a un momento plástico se puede hallar el **módulo plástico** que se define como:

$$Z_x = A_c * \bar{y}_c + A_t * \bar{y}_t.$$

Es te valor se puede relacionar con el modulo elástico como:

$$\alpha = \frac{Z_x}{S_x}.$$

Esta relación tiende a ser 1.12 a 1.2 para secciones doble T.

Cuando consideramos el **pandeo lateral torcional**, podemos hablar de sus causas, que son tensiones residuales e imperfecciones iniciales. Mediante el uso de elementos finitos se puede desarrollar la siguiente formula para determinar el momento crítico:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{L} * \sqrt{E * I_y * GJ} * \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{L^2} * \frac{E * C_w}{GJ}}.$$

Vemos que los factores que afectan al momento crítico son principalmente la distancia de arriostramiento, donde a mayor longitud, decrese el momento.

5.1.1. Longitudes de arriostramiento límite

La longitud no arriostrada límite se determina de la siguiente forma:

Para cargas aplicadas en el alma o en el ala inferior de la viga

$$L_p = 1,76 * r_y \sqrt{\frac{E}{F_{yf}}}.$$

Para cargas aplicadas en el ala superior de la viga

$$L_p = 1,59 * r_y \sqrt{\frac{E}{F_{yf}}}.$$

Por otro lado, se determina la longitud lateralmente no arriostrada L_r y su correspondiente momento M_r con otras formulas que se encuentran en el reglamento CIRSOC 201.