

TASA DE CARBONIZACIÓN: CALIBRACIÓN SEGÚN NORMA ESTADOUNIDENSE Y EUROPEA

INTRODUCCIÓN

Este documento resume dos metodologías internacionales del cálculo de la carbonización para paneles de CLT.

Luego, realiza una calibración de las tasas de carbonización de entrada de ambas metodologías, para ser usadas en el diseño y comprobación al fuego de paneles de CLT HILAM, expuestas por 1 cara. Lo anterior, toma como referencia los ensayos de carbonización realizados en IDIEM, correspondientes a **DTC-FC-506-V.03** con fecha 18/01/23.

PRESENTACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS INTERNACIONALES

Primero, se presentan las dos metodologías de diseño más usadas a nivel internacional: la estadounidense y la europea.

METODOLOGÍA CARBONIZADO SEGÚN USA

A continuación, se presenta un resumen de la metodología estadounidense según código NDS-2018. Para más detalles de las variables, revisar el documento de referencia.

PASO 1: CÁLCULO DEL TIEMPO DE CAÍDA DE LA LAMINACIÓN

La tasa de carbonización de entrada se ajusta a la tasa correspondiente a 1 hora:

$$\beta_t = \beta_n (a \text{ 1 hora}) = 1,5 \text{ pulgada/hora}$$

El tiempo para alcanzar la interfaz de cola es el siguiente:

$$t_{fo} = \left(\frac{h_{lam}}{\beta_n} \right)^{1,23}$$

Luego se debe calcular la cantidad de lamelas que traspasa el fuego.

$$t_{gi} = \left(\frac{h_{lam}}{\beta_t} \right)^{1,23}$$

$$n_{lam} = \frac{t}{t_{gi}}$$

PASO 2: CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONIZADO EFECTIVA

Finalmente, la carbonización efectiva, α_{eff} para el CLT, corresponde a:

$$\alpha_{eff} = 1,2 \cdot \alpha_{char} = 1,2 \cdot \left[n_{lam} \cdot h_{lam} + \beta_n \cdot \left(t - (n_{lam} \cdot t_{fo}) \right)^{0,813} \right]$$

EJEMPLO USA

Se presenta el resumen del ejemplo obtenido del punto 4.1.8 Floor Design Example, del CLT Handbook USA, 2013.

Que se puede encontrar en la siguiente ruta:

Input:

- 90 minutos de fuego
- Panel de CLT de 5 capas de 1 3/8" de espesor
=> [1 3/8", 1 3/8", 1 3/8", 1 3/8", 1 3/8"] => CLT 6 7/8"

PASO 1: CÁLCULO DEL TIEMPO DE CAÍDA DE LA LAMINACIÓN

El tiempo para alcanzar la interfaz de cola es el siguiente:

$$t_{fo} = \left(\frac{h_{lam}}{\beta_n} \right)^{1,23} = \left(\frac{1 \frac{3}{8} \text{ pulgada}}{1,5 \frac{\text{pulgada}}{\text{hora}}} \right)^{1,23} = 0,9 \cdot \text{hrs} = 54 \text{ min}$$

La cantidad de interfaces de laminación que puedan caer se redondea al entero menor como sigue:

$$n_{lam} = \text{entero} \left(\frac{90}{54} \right) = 1 \text{ lamela}$$

PASO 2: CÁLCULO DE LA PROFUNDIDAD DE CARBONIZADO EFECTIVA

La profundidad de carbonizado efectiva se basa en el número de lamelas que pudiesen delaminar, se puede calcular como sigue:

$$\alpha_{eff} = 1,2 \cdot \alpha_{char} = 1,2 \cdot \left[n_{lam} \cdot h_{lam} + \beta_n \cdot \left(t - (n_{lam} \cdot t_{fo}) \right)^{0,813} \right]$$

$$\alpha_{char} = 1,2 \cdot \left[1 \cdot 1 \frac{3}{8} + 1,5 \frac{\text{in}}{\text{hr}} \left(\frac{90}{60} - \left(1 \cdot \frac{54}{60} \right) \right)^{0,813} \right] = 2,84 \text{ in}$$

METODOLOGÍA CARBONIZADO SEGÚN EUROPA

A continuación, se presenta un resumen de la metodología europea según Eurocódigo 5-2 del 2004. Para más detalles de las variables, revisar el documento de referencia.

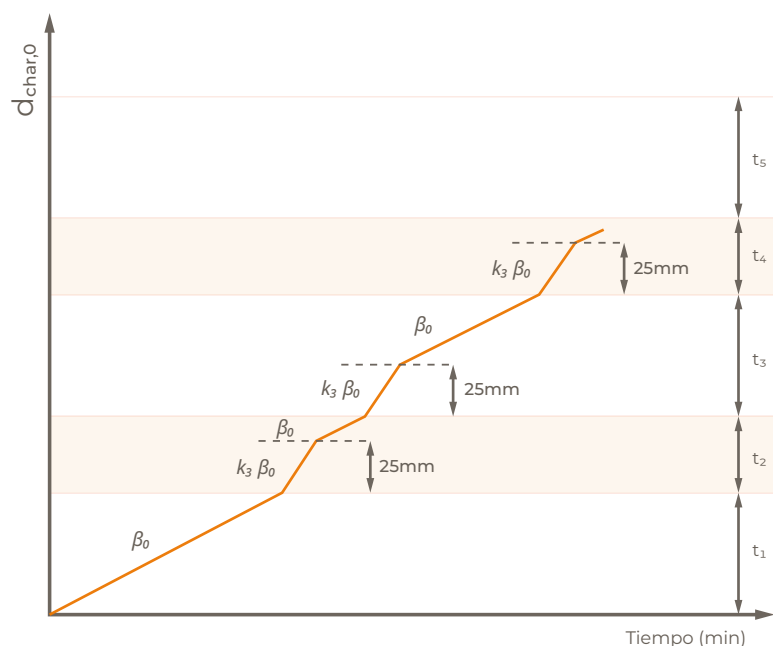
La tasa de **carbonización uni-dimensional** para fuego estándar para la madera laminada es de $\beta_0=0,65 \text{ mm/min}$. El cuál, también corresponde al valor de entrada para CLT según el código europeo.

Por otro lado, la tasa de **carbonización nominal** para fuego estándar en el caso de la madera laminada es de $\beta_n=0,7 \text{ mm/min}$.

En cuanto a la manera que se carboniza el CLT, es importante notar que, para **adhesivos no resistentes a fuego**, la tasa de carbonización se considera variable cada vez que toca una interfaz de adhesivo.

De hecho, se considera que **la capa de carbonizado que aísla la temperatura puede caerse**, dejando la madera de la siguiente lamela expuesta, produciéndose un aumento de la tasa, que corresponde a **2 veces la tasa de entrada**. En otras palabras, para la **segunda y subsiguientes lamelas**, la tasa es de $k_3 \cdot \beta_0=2 \cdot \beta_0=2 \cdot 0,65 \text{ mm/min}$.

Sólo cuando se alcanza una distancia de **25mm de carbonizado** es que se asume que la tasa se estabiliza a su valor de entrada inicial, $\beta_0=0,65 \text{ mm/min}$, tal como se muestra en la siguiente ilustración.



Finalmente, a la **carbonización del CLT**, se debe agregar la **capa de resistencia nula**, $k_0 \cdot d_0$, que corresponde a $1 \cdot 7 \text{ mm}=7 \text{ mm}$ para esa versión del eurocódigo.

Por lo tanto, la profundidad de **carbonización efectiva del CLT** corresponde a:

$$d_{ef} = d_{char_CLT} + k_0 \cdot d_0 = d_{char_CLT} + 7 \cdot \text{mm}$$

EJEMPLO EUROPA

Se toma como referencia el Technical Design Calculation Report del software, Timbertech.

Que se puede encontrar en la siguiente ruta.

Input:

- 60 minutos de fuego
- Panel de CLT de 5 capas de [20, 30, 20, 30, 20] · mm => CLT 120 mm

PASO 1: CÁLCULO CARBONIZACIÓN CLT

Primero, se calcula la profundidad de carbonización, considerando 60 minutos a una tasa de 0,65 mm/min Capas

$$d_{char_CLT} = 60 \text{ min} \cdot 0,65 \text{ mm} = 53 \text{ mm}$$

PASO 1: CÁLCULO CARBONIZACIÓN EFECTIVA CLT

Capa de resistencia nula

$$k_0 \cdot d_0 = 1 \cdot 7 \text{ mm} = 7 \text{ mm}$$

Carbonización efectiva del CLT

$$d_{ef} = d_{char_CLT} + k_0 \cdot d_0 = 53 \cdot \text{mm} + 7 \cdot \text{mm} = 60 \cdot \text{mm}$$

CALIBRACIÓN DE LAS TASAS DE ENTRADA CON LOS ENSAYO DE CARBONIZACIÓN

Para evaluar la velocidad de carbonización, ensayamos en IDIEM 4 paneles de CLT Hílam, dos con los paneles dispuestos verticalmente y dos horizontalmente.

Para este análisis tomamos como referencia los resultados del ensayo de carbonización horizontal desarrollado el 3/01/2023 (Informe N° 1.832.784).

Condiciones del ensayo:

- Tiempo, 120 minutos de fuego
- Panel de CLT de 180 mm de espesor de 5 capas [30, 20, 30, 20, 30] · mm

Resultado

Carbonización final: 136,6 [mm]

CALIBRACIÓN PARA USA

A continuación, para el mismo panel de CLT y utilizando la metodología estadounidense iteramos ajustando la tasa de carbonización de entrada hasta obtener una carbonización equivalente de 136,6 mm.

$$h = [30,20, 30,20, 30,20,30] \cdot mm$$

$$fire_{total} = 120 \cdot minutos$$

Así llegamos al siguiente valor:

$$Velocidad\ de\ Entrada = 1,9 \cdot \frac{pulgadas}{minuto}$$

$$a_{eff_{USA}} = 136,20mm \text{ (Velocidad CLT Hílam 1,9 inch/hr)}$$

$$\frac{Carbo_{calculado}}{Carbo_{empírico}} = \frac{136,2\ mm}{136,6\ mm} = 99,7\% \Rightarrow \text{Se cumple}$$

CALIBRACIÓN PARA EUROPA

A continuación, se presenta la tasa de carbonización de entrada a la metodología **europea** , de modo de obtener una carbonización equivalente de **136,6mm**, para el mismo panel de CLT de 180mm del ensayo.

$$h = [30,20, 30,20, 30,20,30] \cdot mm$$

$$fire_{total} = 120 \cdot minutos$$

Para obtener un valor de carbonización equivalente lo más cercana posible a lo ensayado, se itera la tasa de entrada hasta que llegamos al siguiente valor:

$$Velocidad\ de\ Entrada = 0,7 \cdot \frac{mm}{minuto}$$

$$a_{eff_{EU}} = 136,00mm \text{ (Velocidad CLT Hílam 0,70 mm/min)}$$

$$\frac{Carbo_{calculado}}{Carbo_{empírico}} = \frac{136\ mm}{136,6\ mm} = 99,5\% \Rightarrow \text{Se cumple}$$

Por lo tanto, para usar la metodología europea para el cálculo de la carbonización en paneles de CLT HILAM, la **tasa de entrada para calibración se debe ajustar desde 0,65 mm/minuto a 0,70 mm/minuto.**

CONCLUSIÓN

Este documento transparenta los pasos realizados para poder entregar las tasas de entrada para el cálculo del carbonizado de paneles CLT HILAM, tanto para ser usado por normativa estadounidense como europea.

- Para el código estadounidense, usar: **1,9 pulgada/hora**
- Para el código europeo, usar: **0,70 mm/minuto**