

# Proyecto #1

Presentado por: *Oscar Andrés Sánchez Medina*

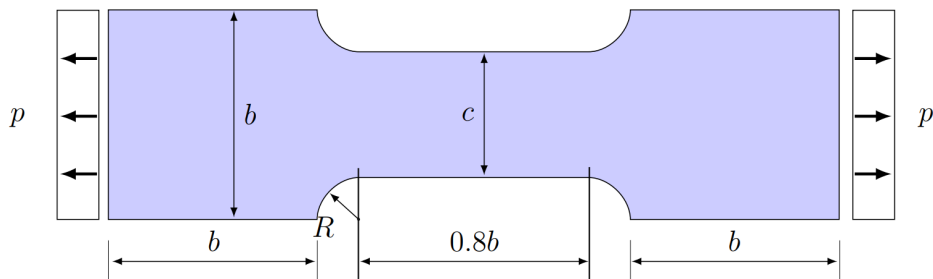
---

*Análisis estructural por el método de los elementos finitos*  
30 de mayo, 2022

## Proyecto 8.7.2

Una barra plana de espesor  $t$  está sometida a una fuerza distribuida uniforme por unidad de área  $p$  en sus extremos. La altura de la sección transversal de la barra se reduce de  $b$  en el primer y último tercio a  $c$  en su tramo central, como lo indica la figura. En el lugar donde cambia la sección transversal se utilizan filetes circulares de radio  $R$  para redondear las esquinas. Determine la variación del factor de concentración de esfuerzos  $K$  en función de  $R/c$  considerando  $b/c = 1.1$ ,  $b/c = 1.2$ ,  $b/c = 1.3$ ,  $b/c = 1.5$  y  $b/c = 2.0$ . Como referencia se puede consultar el libro Resistencia de Materiales de Gere y Goodno (2009)

Figura 1: Convención dimensiones probeta

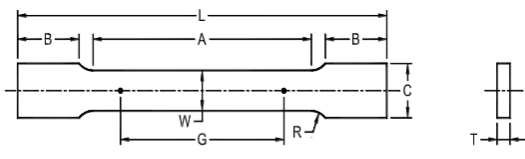


### Geometría del problema (Norma NTC 2):

De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 2 en su quinta actualización, las dimensiones de la probeta para el ensayo de tracción de materiales metálicos, son las que se muestran en la Figura 2.

Siguiendo los lineamientos dados por la norma, se puede obtener un único punto dentro de las curvas de concentración de esfuerzo normal que se pretenden obtener. Seleccionando unas dimensiones que sigan las recomendaciones de la norma, las relaciones  $R/c$  y  $b/c$  que se obtienen son:

Figura 2: Dimensiones de la probeta de ensayo. Tomado de: ICONTEC (2022)



		Dimensiones		
		Probetas estándar		Probeta de menor tamaño
		Tipo chapa, ancho 40 mm [1,500 pulgadas]	Tipo lámina, ancho 12,5 mm [0,500 pulgadas]	Ancho 6 mm [0,250 pulgadas]
		mm [pulgadas]	mm [pulgadas]	mm [pulgadas]
G	Longitud calibrada (véanse las Notas 1 y 2)	200,0 ± 0,2 [8,00 ± 0,01]	50,0 ± 0,1 [2,000 ± 0,005]	25,0 ± 0,1 [1,000 ± 0,003]
W	Ancho (véanse las Notas 3 y 4)	40,0 ± 2,0 [1,500 ± 0,125, -0,250]	12,5 ± 0,2 [0,500 ± 0,010]	6,0 ± 0,1 [0,250 ± 0,005]
T	Espesor (véase la Nota 5)	Espesor del material		
R	Radio del cuello, min (véase la Nota 6)	25 [1]	12,5 [0,500]	6 [0,250]
L	Longitud total, min (véanse las Notas 2, 7 y 8)	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A	Longitud de la sección reducida paralela, min	225 [9]	57 [2,25]	32 [1,25]
B	Longitud de la sección de agarre, min (véase la Nota 9)	75 [3]	50 [2]	30 [1,25]
C	Ancho de la sección de agarre, aproximada (véanse las Notas 4 y 9)	50 [2]	20 [0,750]	10 [0,375]

Longitud calibrada:  $G = 200 \text{ mm}$

Ancho:  $W = 40 \text{ mm}$

Espesor:  $T = 7 \text{ mm}$  (5 mm mínimo)

Radio del cuello:  $R = 25 \text{ mm}$

Longitud total (min):  $L = 450 \text{ mm}$

Longitud sección reducida paralela:  $A = 225 \text{ mm}$

Longitud sección de agarre:  $B = 75 \text{ mm}$

Ancho sección de agarre:  $C = 50 \text{ mm}$

$$b/c = 1.25$$

$$R/c = 0.625$$

Estas dimensiones y relaciones no quedan dentro de las variaciones que se planean hacer para el presente trabajo, sin embargo, posteriormente se hará el análisis de concentración de esfuerzos para esta geometría.

### Variación geométrica:

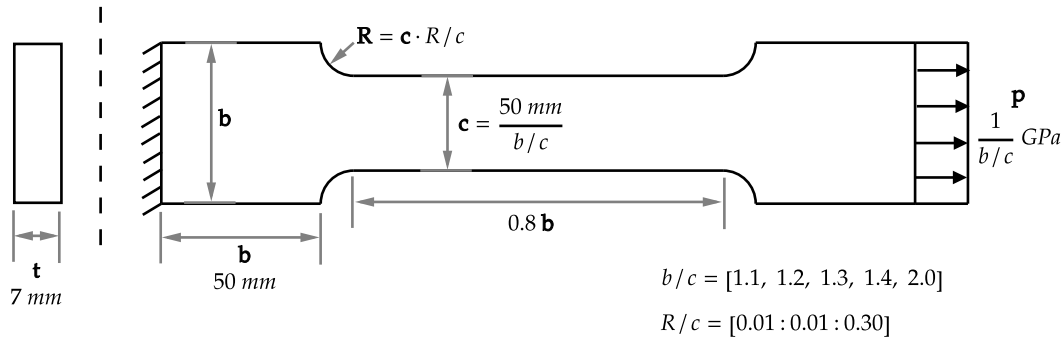
Para obtener las curvas de concentración de esfuerzo normal en los espacios de  $b/c$  y  $R/c$ , se decide fijar el valor de  $b$  y con la relación  $b/c$  determinar  $c$ , a partir de este  $c$  junto con la relación  $R/c$ , determinar  $R$ .

Así, se define como constante el valor de  $b = 50 \text{ mm}$ , el rango de variación de  $R/c$  entre 0.01 y 0.3 con un cambio entre valores de 0.01, por el lado de la relación  $b/c$ , los valores considerados son  $b/c = 1.1$ ,  $b/c = 1.2$ ,  $b/c = 1.3$ ,  $b/c = 1.5$  y  $b/c = 2.0$ . De esta manera la combinación de las 5 posibilidades de  $b/c$  junto con las 30 posibilidades de  $R/c$ , el total de modelos a correr es 150. El valor de la presión aplicada en un extremo

se define de tal manera que el esfuerzo nominal  $\sigma_{nom} = \frac{P}{ct}$  sea unitario ( $\sigma_{nom} = 1$ ), para este fin, la presión aplicada tendrá un valor de  $c/b$ .

En la Figura 3, se aprecian las dimensiones escogidas para el modelo y su respectiva variación.

Figura 3: Dimensiones de la probeta para modelar



### Construcción del modelo de elementos finitos:

Lo primero que se define para la construcción del modelo son las unidades con las que trabajará, en este caso, se escoge para el caso de la longitud y la fuerza, y posteriormente se derivan las demás:

Longitud : mm

Fuerza : kN

Esfuerzo :  $\frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} = \text{GPa}$

Las propiedades del material que se utilizarán para el modelo son las del Aluminio Aleación 2024:

Módulo de Young:  $E = 72.4 \text{ GPa}$

Relación de Poisson:  $\nu = 0.33$

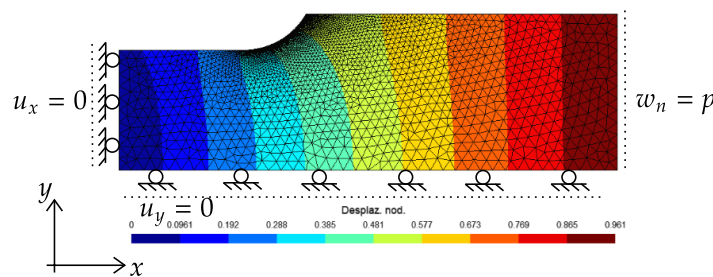
La simplificación del problema en 3D al plano 2D es posible gracias a que la geometría no varía en el eje perpendicular al plano y las cargas aplicadas están contenidas en el mismo plano. Teniendo el problema simplificado a dos dimensiones, se considera ahora que puede ser analizado en una *condición plana de esfuerzos* ya que el elemento es libre para deformarse en la dirección perpendicular al plano, esto junto con que no existen cargas en la dirección perpendicular al plano, conlleva a concluir que los esfuerzos en dicha dirección pueden considerarse como nulos.

Dado que el problema es doblemente simétrico, es posible modelar una cuarta parte del mismo para disminuir el costo computacional de la simulación. Para esta cuarta

parte del problema, las condiciones en la frontera son las que se muestran en la Figura 4.

Para la generación de la malla del modelo, se definen dos tamaños que permitan capturar adecuadamente la concentración de esfuerzos en la zona del filete redondeado de la probeta y permita obtener resultados aceptables pero no tan detallados en el resto del problema. Luego de hacer una análisis de sensibilidad para diferentes tamaños físicos de malla en la zona del filete, se obtiene que el menor valor con el que se llega a una convergencia aceptable del esfuerzo normal es de 0.1 mm.

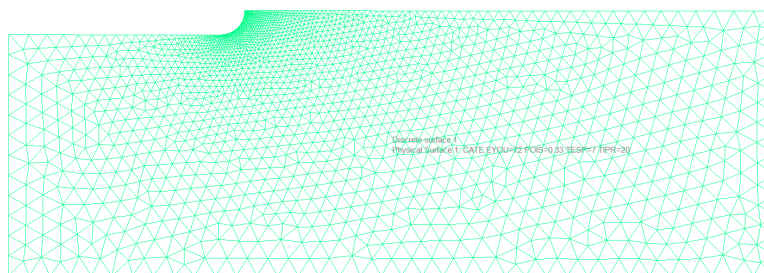
Figura 4: Condiciones de borde para la modelación



### Resultados detallados de una simulación:

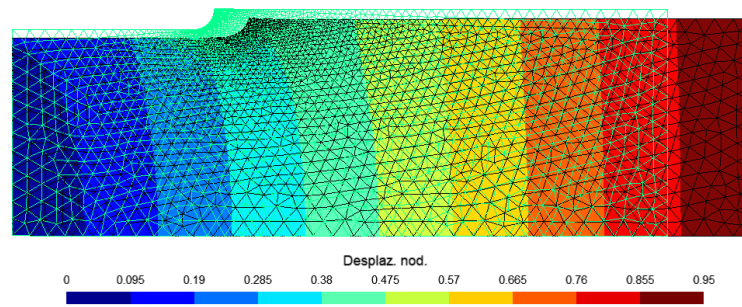
A continuación, se muestran los resultados detallados de una simulación, se elige la simulación que tiene una relación  $b/c = 1.1$  y  $R/c = 0.05$ , para esta configuración el filete barre un ángulo de  $90^\circ$  y termina exactamente a la altura del borde horizontal superior. La malla utilizada para esta simulación se aprecia en la Figura 5.

Figura 5: Malla para  $b/c = 1.1$  y  $R/c = 0.05$

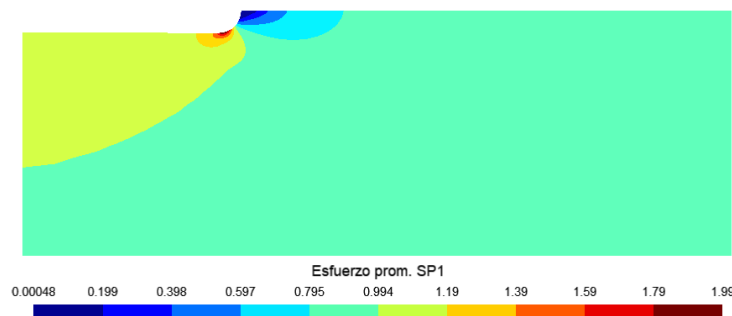


Luego de correr esta simulación se verifica que los resultados obtenidos sean coherentes para posteriormente correr todas las simulaciones que permitan obtener las gráficas deseadas.

En la Figura 6 se puede observar que los desplazamientos son consistentes con las condiciones de borde aplicadas. El borde vertical izquierdo presenta desplazamientos nulos en la dirección X mientras que permite el desplazamiento en la dirección Y, que se da por el efecto de la relación de Poisson. Para el caso del borde horizontal inferior, el desplazamiento en la dirección Y es nulo, mientras que en la dirección X permite el

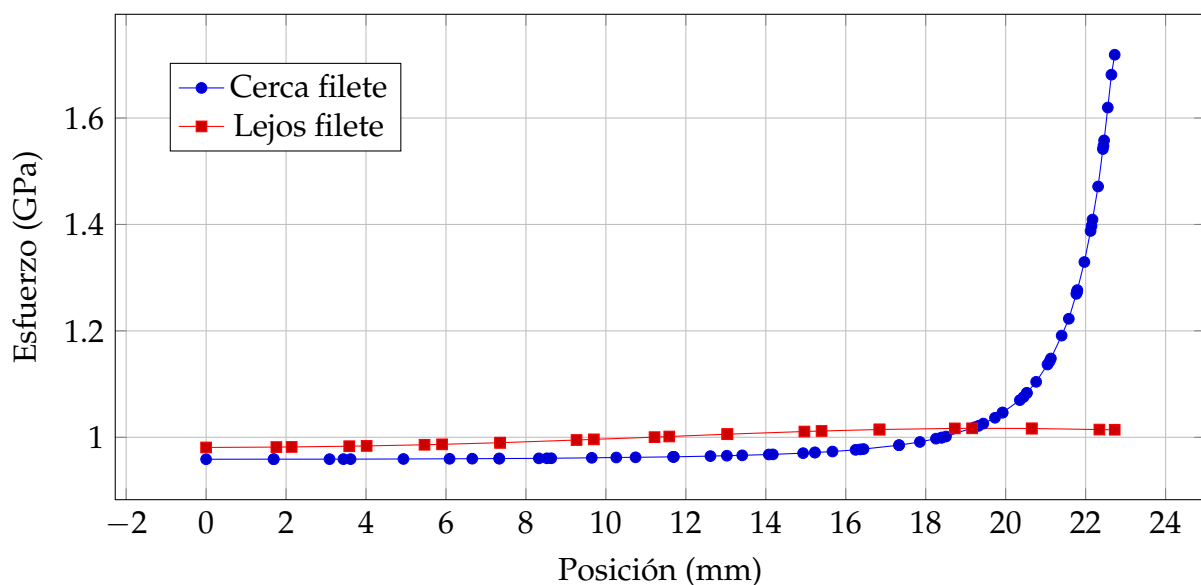
Figura 6: Desplazamiento para  $b/c = 1.1$  y  $R/c = 0.05$ 

desplazamiento. El borde cargado presenta un desplazamiento horizontal uniforme, lo cual es deseable.

Figura 7: Esfuerzo principal mayor para  $b/c = 1.1$  y  $R/c = 0.05$ 

En cuanto a la distribución del esfuerzo principal mayor (Figura 7), se observa que el valor mayor lo toma en la parte más baja del filete que es el lugar en el que se esperaba que ocurriera, por otro lado, se observa que la distribución del esfuerzo en las secciones alejadas al cambio de altura de la probeta son uniformes o muy cercanas a serlo.

Distribución del SP1 en dos secciones distintas

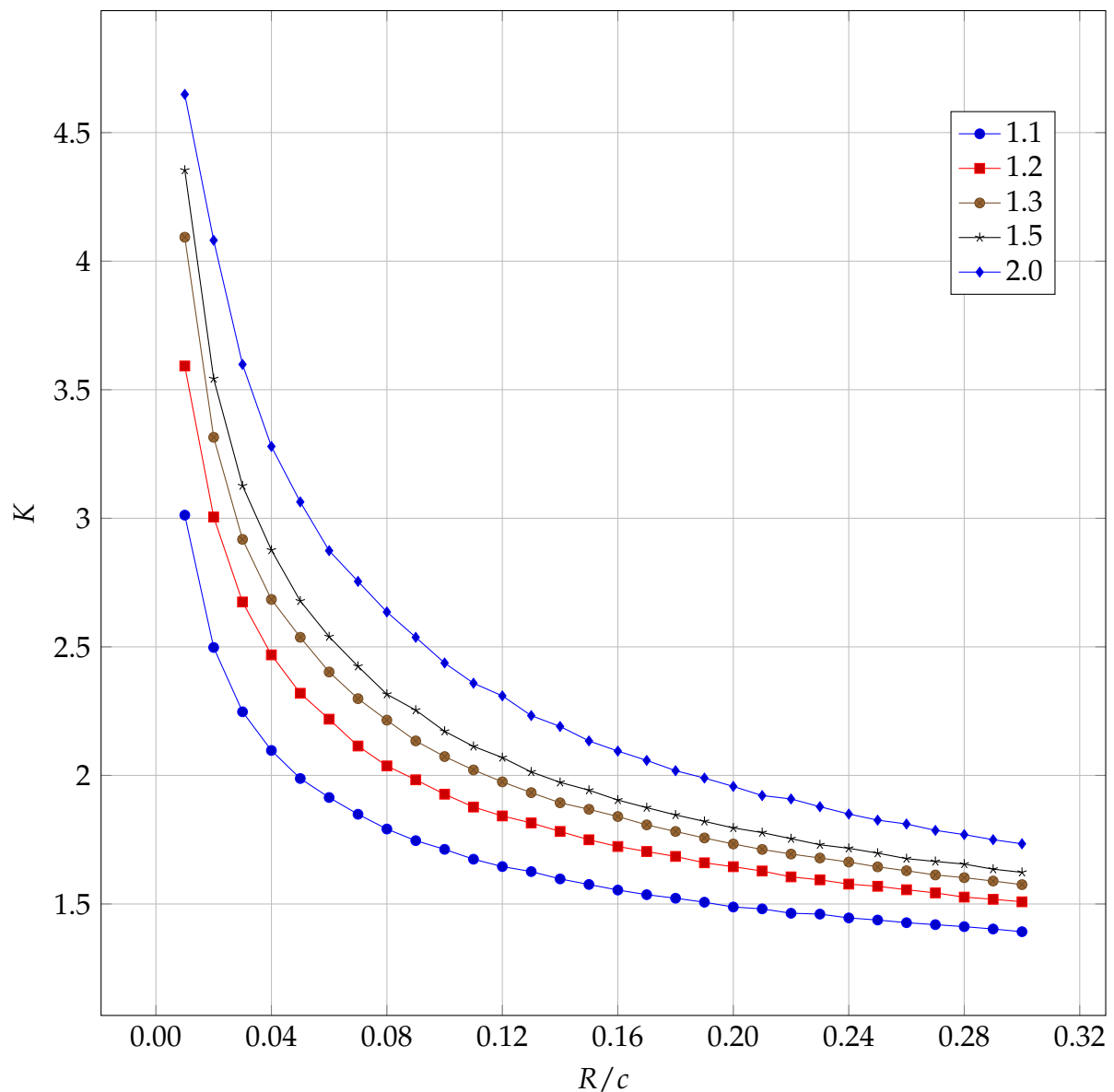


### Obtención de las gráficas de concentración de esfuerzo normal:

Luego de observar y asegurarse que los resultados obtenidos para una simulación son coherentes con lo que se esperaba, se procede a correr y obtener los resultados para el esfuerzo principal mayor máximo para cada uno de los 150 casos que definen la variación de las relaciones  $b/c$  y  $R/c$ . Vale la pena destacar que los valores máximos del esfuerzo principal mayor se obtuvieron de los resultados promedio de esfuerzo en los nudos, y no en los elementos.

$R/c$	$b/c(1.1)$	$b/c(1.2)$	$b/c(1.3)$	$b/c(1.5)$	$b/c(2.0)$
0.01	3.012	3.592	4.093	4.354	4.649
0.02	2.498	3.005	3.315	3.543	4.081
0.03	2.247	2.674	2.918	3.126	3.599
0.04	2.097	2.469	2.684	2.876	3.279
0.05	1.988	2.319	2.537	2.678	3.064
0.06	1.914	2.219	2.402	2.539	2.874
0.07	1.849	2.114	2.298	2.424	2.754
0.08	1.791	2.037	2.215	2.316	2.636
0.09	1.746	1.983	2.134	2.254	2.537
0.10	1.712	1.927	2.073	2.172	2.437
0.11	1.674	1.877	2.021	2.113	2.359
0.12	1.645	1.842	1.975	2.069	2.309
0.13	1.626	1.815	1.933	2.014	2.233
0.14	1.597	1.782	1.893	1.973	2.190
0.15	1.576	1.750	1.868	1.942	2.134
0.16	1.554	1.723	1.840	1.904	2.095
0.17	1.536	1.704	1.808	1.875	2.058
0.18	1.522	1.685	1.782	1.846	2.018
0.19	1.507	1.660	1.757	1.821	1.990
0.20	1.488	1.645	1.733	1.796	1.957
0.21	1.481	1.628	1.712	1.778	1.922
0.22	1.464	1.605	1.694	1.754	1.908
0.23	1.461	1.594	1.679	1.730	1.878
0.24	1.446	1.577	1.663	1.716	1.850
0.25	1.438	1.569	1.644	1.698	1.826
0.26	1.427	1.555	1.629	1.676	1.811
0.27	1.420	1.543	1.613	1.665	1.786
0.28	1.412	1.527	1.602	1.655	1.770
0.29	1.403	1.518	1.589	1.635	1.750
0.30	1.392	1.508	1.575	1.623	1.734

Con estos datos, se procede a generar las gráficas de variación del factor de concentración de esfuerzos  $K = \frac{\sigma_{mx}}{\sigma_{prom}}$ , en función de  $R/c$ , considerando  $b/c = 1.1$ ,  $b/c = 1.2$ ,  $b/c = 1.3$ ,  $b/c = 1.5$  y  $b/c = 2.0$ .

Variación del factor de concentración de esfuerzos  $K$ 

Es clara la tendencia de la relación entre el esfuerzo máximo y el esfuerzo nominal a disminuir cuando la relación entre el diámetro y el ancho de la sección más pequeña se hace más grande. Quiere decir, que entre más se acerca el radio del filete en la transición de secciones al ancho de la sección reducida la concentración de esfuerzo será menor. De la misma manera cuanto más pequeña es la relación entre el ancho de la sección reducida y la sección de agarre, la concentración del esfuerzo normal también es menor.

### Concentración de esfuerzos para la geometría recomendada por la NTC 2:

Dado que las relaciones  $b/c$  y  $R/c$  recomendadas por la norma NTC, no caen dentro de la variación de relaciones realizada, a continuación se muestran los resultados de la simulación siguiendo esa geometría.

Figura 8: Desplazamiento para NTC 2

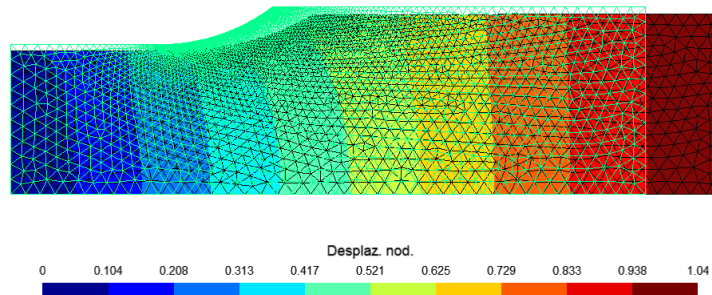
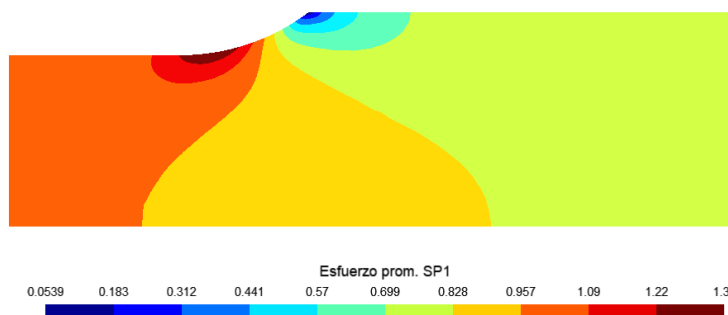
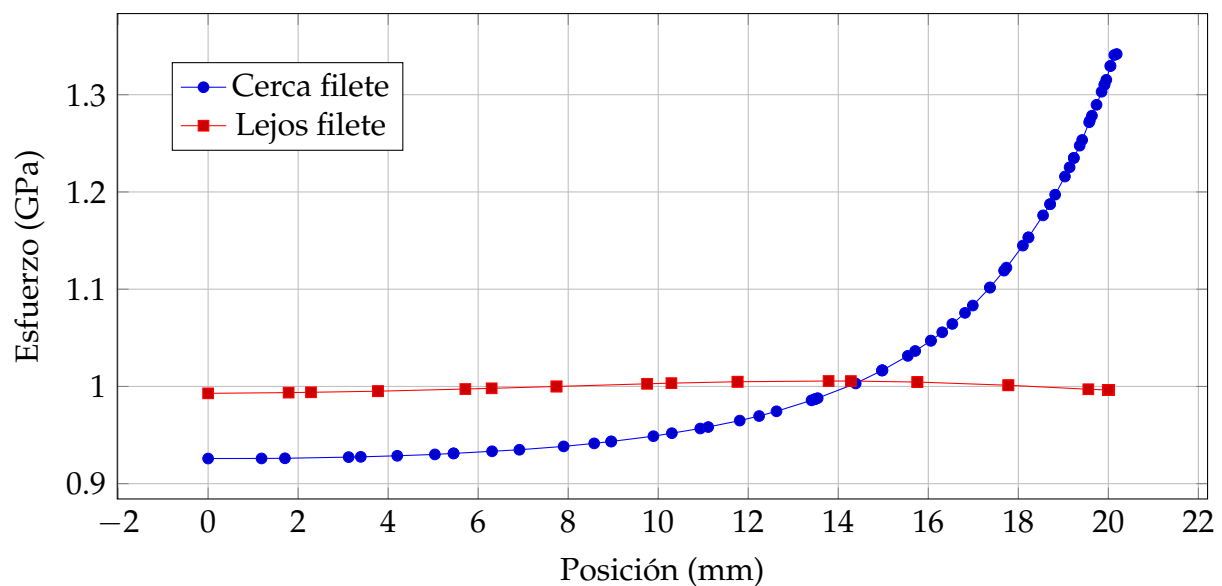


Figura 9: Esfuerzo principal mayor para NTC 2



Distribución del SP1 en dos secciones distintas



En la gráfica anterior, se puede apreciar cómo utilizando las dimensiones recomendadas por la NTC 2, todavía se aprecia una concentración de esfuerzos en la sección cercana al filete, sin embargo, el factor de la concentración de esfuerzo normal no llega

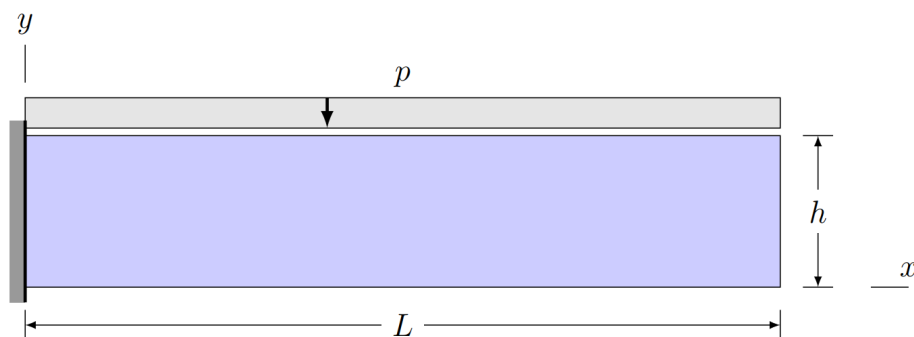


a ser 1.4, por lo que se sigue manteniendo la tendencia mencionada anteriormente y se reconoce la pertinencia de las dimensiones recomendadas por la NTC que conlleva a concentraciones de esfuerzos aceptables.

### Proyecto 8.7.3

Una viga en voladizo de longitud  $L$  y sección transversal rectangular de altura  $h$  y ancho  $t$ , está sometida a una carga distribuida uniforme  $p$  a lo largo de su luz, como lo ilustra la Figura 10. Obtener la distribución de los esfuerzos normales y cortantes en la sección transversal ubicada en el apoyo ( $x = 0$ ), mediante el método de los elementos finitos. Comparar los resultados anteriores con la solución analítica dada por la teoría de vigas de Euler-Bernoulli. Simular el problema con varias relaciones  $L/h$ , para las cuales el error de la solución analítica sea del 5 % al 25 % con respecto al resultado numérico. Calcular el error en la deflexión máxima y los esfuerzos normales y cortantes máximos. Como referencia se puede consultar el libro Resistencia de Materiales de Gere y Goodno (2009)

Figura 10: Geometría del problema



Las dimensiones escogidas para la solución del problema y su respectiva variación son las que se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} L &= 40 \text{ mm} \\ p &= 1 \text{ GPa} \\ h &= [2 : 2 : 120] \text{ mm} \\ t &= 30 \text{ mm} \\ h/L &= [0.05 : 0.05 : 3.00] \text{ mm} \end{aligned}$$

#### Definición de propiedades para el modelo

Lo primero que se define para la construcción del modelo son las unidades con las que trabajará, en este caso, se escoge para el caso de la longitud y la fuerza, y posteriormente se derivan las demás:

$$\begin{aligned} \text{Longitud} &: \text{mm} \\ \text{Fuerza} &: \text{kN} \\ \text{Esfuerzo} &: \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} = \text{GPa} \end{aligned}$$

Las propiedades del material que se utilizarán para el modelo son las del Aluminio

Aleación 2024, con la salvedad que se utilizará una relación de Poisson muy cercana a cero, para ignorar sus efectos que podrían introducir ruido en los resultados de esfuerzos:

Módulo de Young:  $E = 72.4 \text{ GPa}$

Relación de Poisson:  $\nu = 1e - 10$

### Resultados detallados de dos simulaciones

A continuación se presentan los resultados para la simulación con una relación  $h/L = 0.25$ , con la que se verifica que el proceso de generación de la malla y la solución son adecuadas, adicionalmente se muestra la distribución del esfuerzo normal y cortante en una sección cercana (0.5 mm) al empotramiento:

Figura 11: Desplazamiento

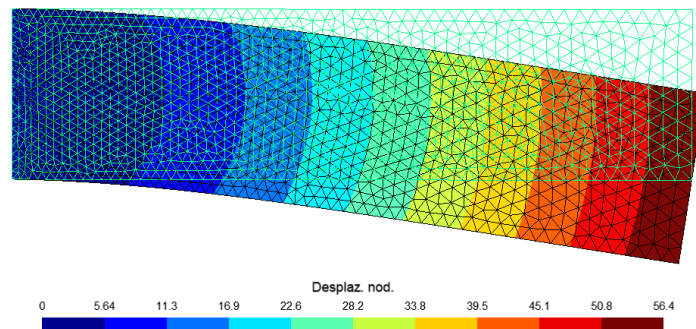


Figura 12: Esfuerzo normal SXX

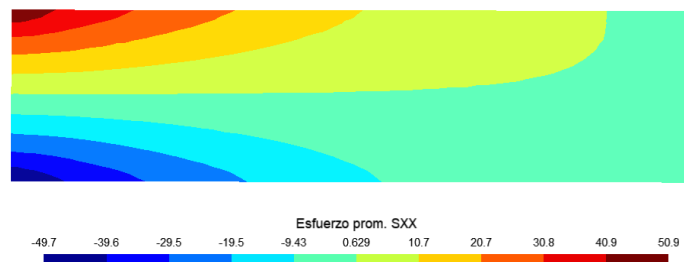
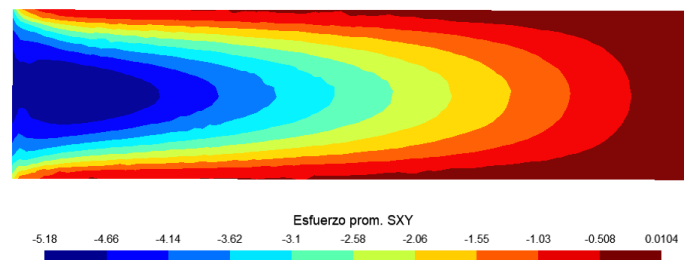
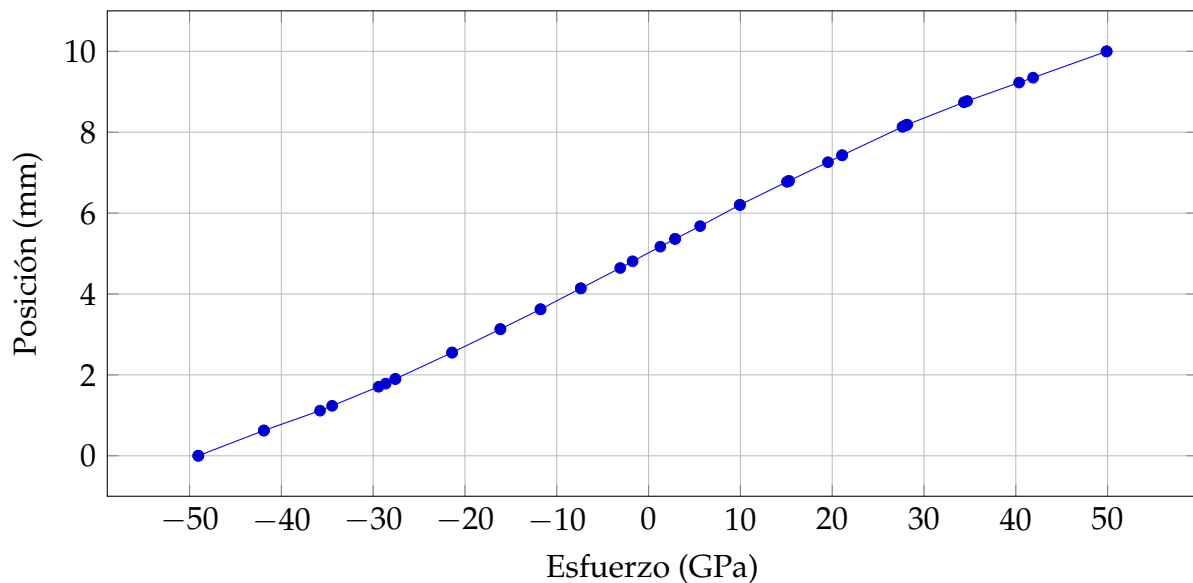


Figura 13: Esfuerzo cortante SXY

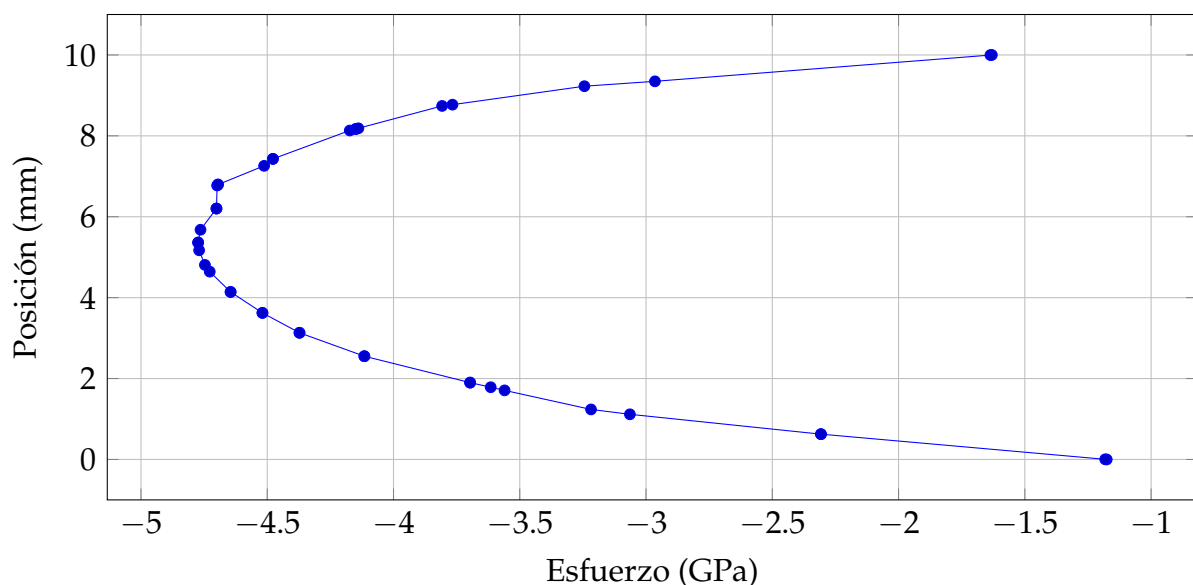


Distribución del SXX cerca al empotramiento



Es posible apreciar la distribución del esfuerzo normal cercana a la distribución lineal de la teoría de vigas Euler-Bernoulli, con un valor muy cercano a cero en el eje neutro de la sección.

Distribución del SXY cerca al empotramiento



Es posible apreciar la distribución parabólica de los esfuerzos cortantes en la sección, con el máximo en el eje neutro de la sección.

Ahora, se presentan los resultados para la simulación con una relación  $h/L = 2.00$ , con la que se verifica que el proceso de generación de la malla y la solución son adecuadas, adicionalmente se muestra la distribución del esfuerzo normal y cortante en una sección cercana (0.5 mm) al empotramiento:

Figura 14: Desplazamiento

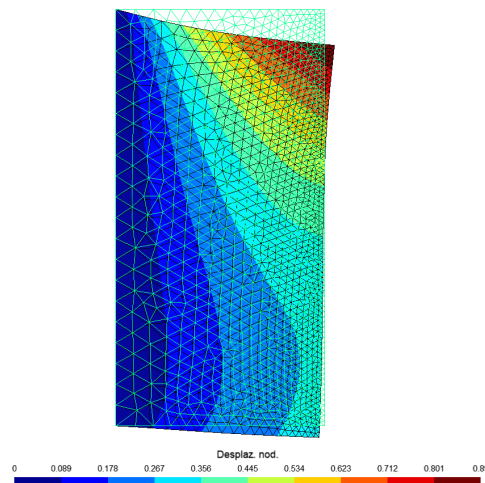


Figura 15: Esfuerzo normal SXX

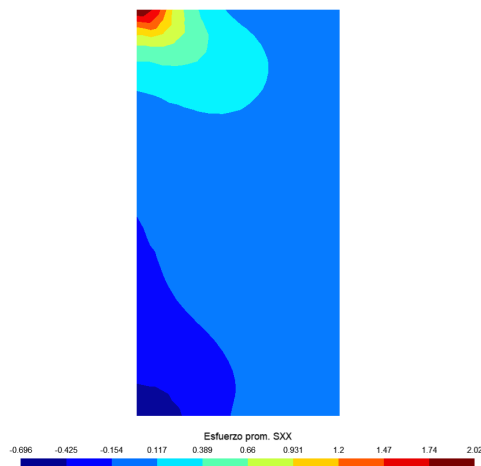
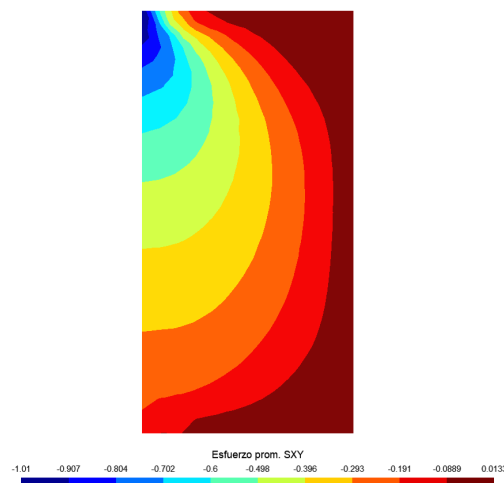
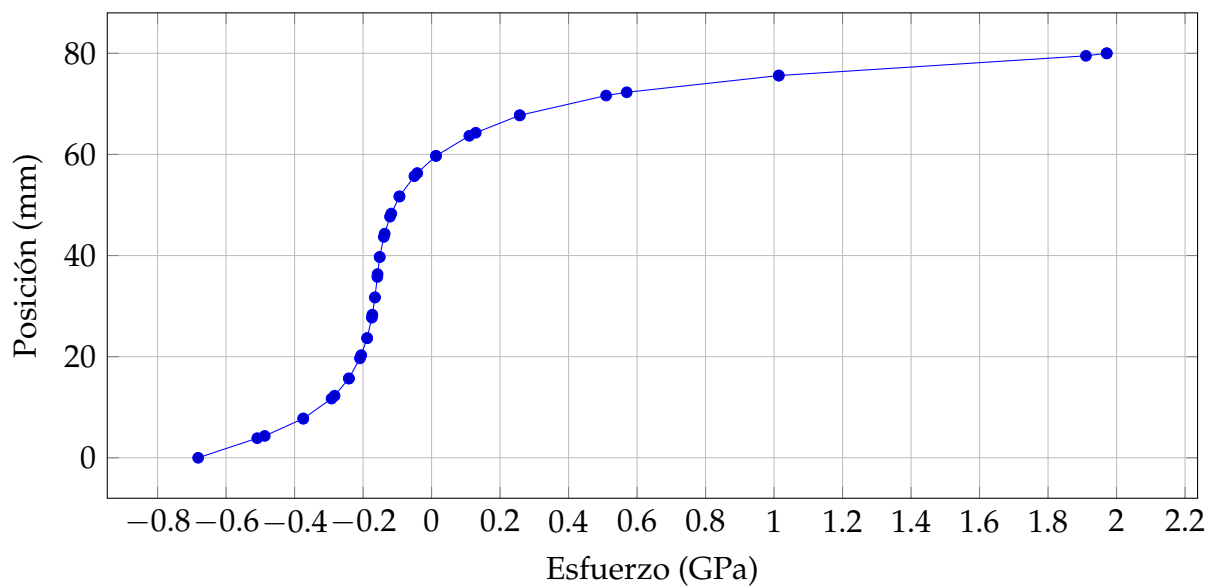


Figura 16: Esfuerzo cortante SXY



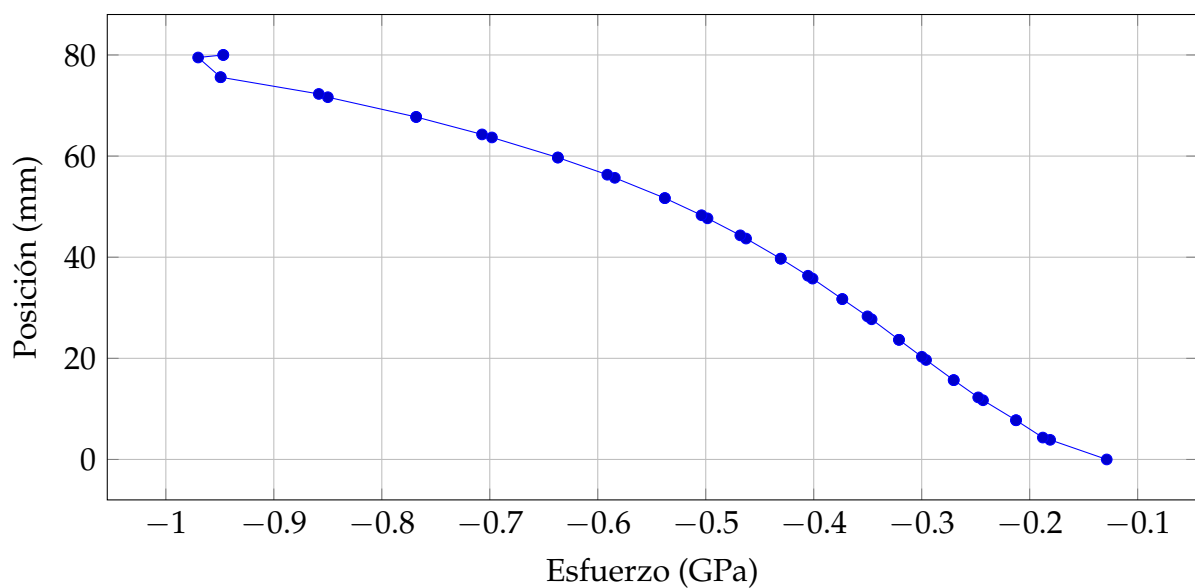
A continuación, se presentan las gráficas de distribución de esfuerzos cerca al empotramiento:

Distribución del SXX cerca al empotramiento



Es posible apreciar que la distribución del esfuerzo normal deja de ser lineal y presenta una curvatura tanto en la porción de la sección por encima del eje neutro como debajo de este.

Distribución del SXY cerca al empotramiento



Se aprecia que la distribución del esfuerzo cortante es parabólico en la parte superior de la sección y alcanza su máximo cerca de la cara superior, luego de esto comienza a disminuir tendiendo hacia cero a medida que se acerca a la cara inferior de la sección. Es claro que esta distribución no sigue la planteada por la teoría de vigas Euler-Bernoulli.

### Comparación con la solución analítica (Teoría de vigas Euler-Bernoulli)

La solución analítica tiene como resultados de análisis:

$$V(x) = -30x + 1200$$

$$M(x) = -15x^2 + 1200x - 24000$$

$$v(x) = \frac{1000}{EI}(-1.25x^4 + 200x^3 - 12000x^2)$$

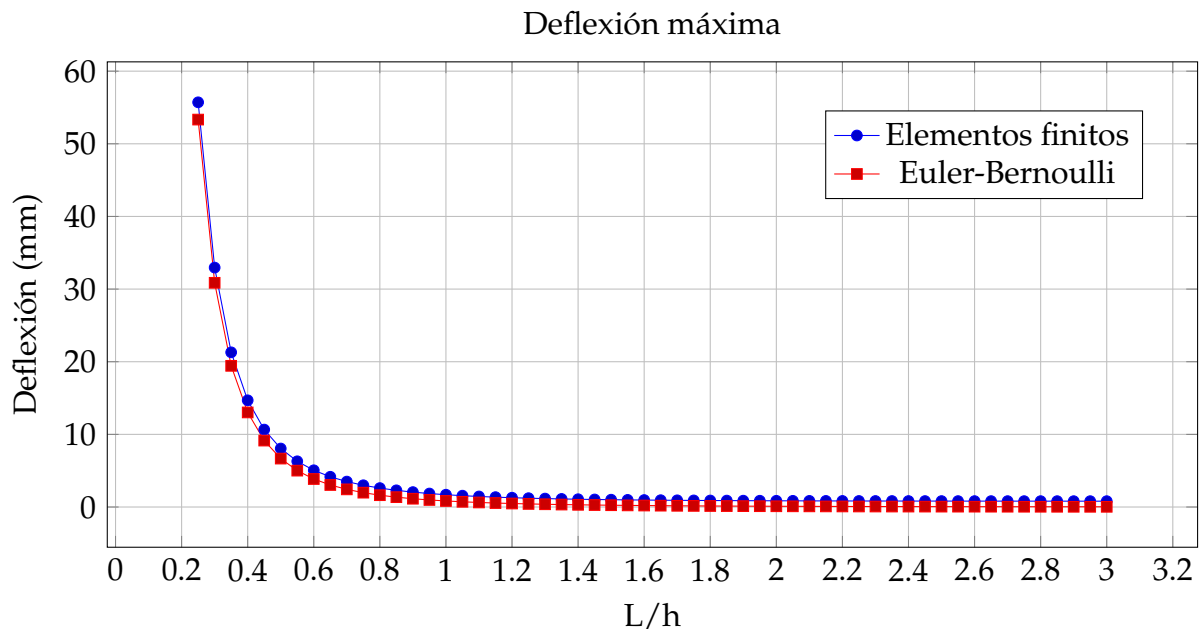
Con lo que las expresiones para los máximos en cuanto a esfuerzo normal, esfuerzo cortante (para  $x = 0$  mm) y deflexión (para  $x = 40$  mm), son :

$$\tau_{max} = \frac{3 \cdot V_{max}}{2 \cdot A} = \frac{3 \cdot 1200}{2 \cdot 30 \cdot h}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} \cdot y_{max}}{I} = \frac{h/2}{30 \cdot h^3/12} (24000)$$

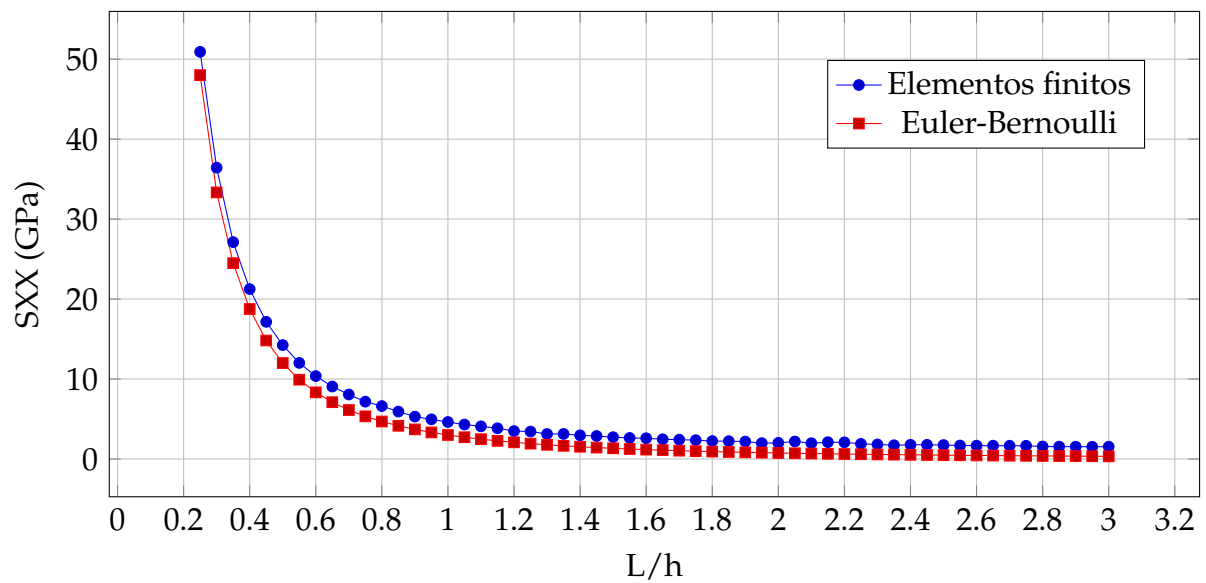
$$v_{max} = \frac{1000}{EI}(-9600000) = \frac{1000}{72 \cdot 30 \cdot h^3/12}(-9600000)$$

Al comparar los resultados de las soluciones con elementos finitos contra la solución con la teoría de vigas Euler-Bernoulli, se obtiene:



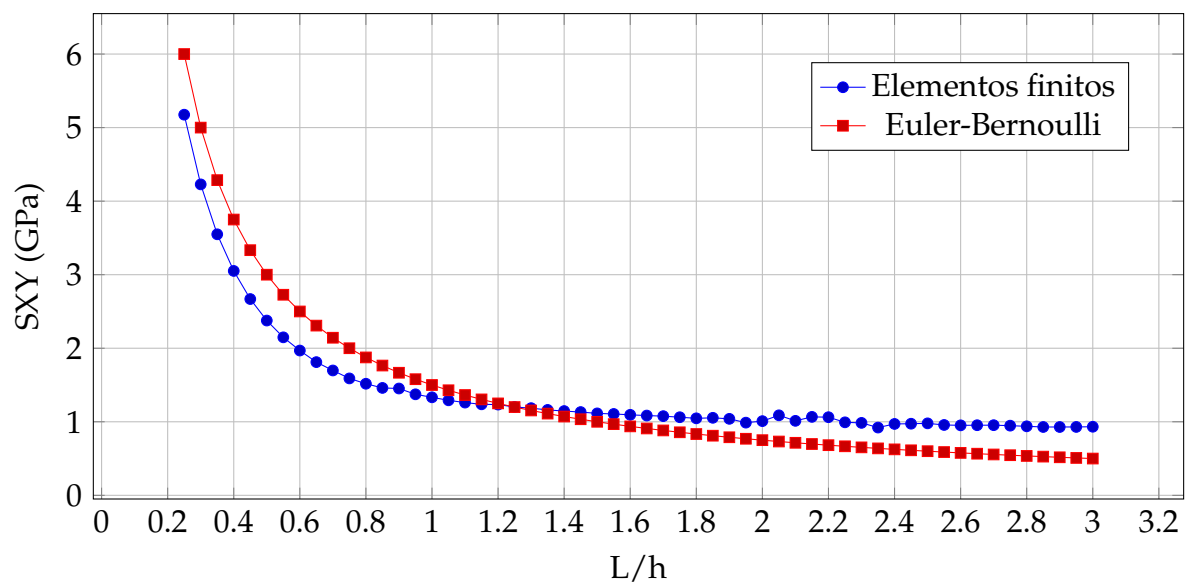
Para el caso de los esfuerzos normales

SXX máximo



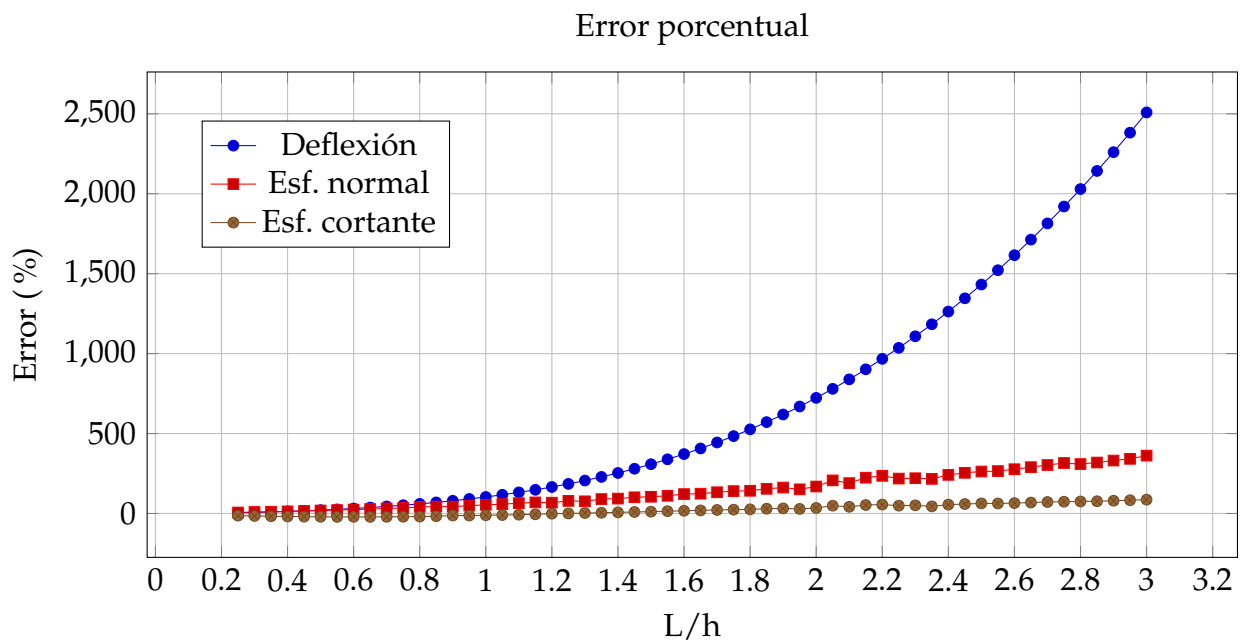
Para el caso de los esfuerzos cortantes

SXY máximo

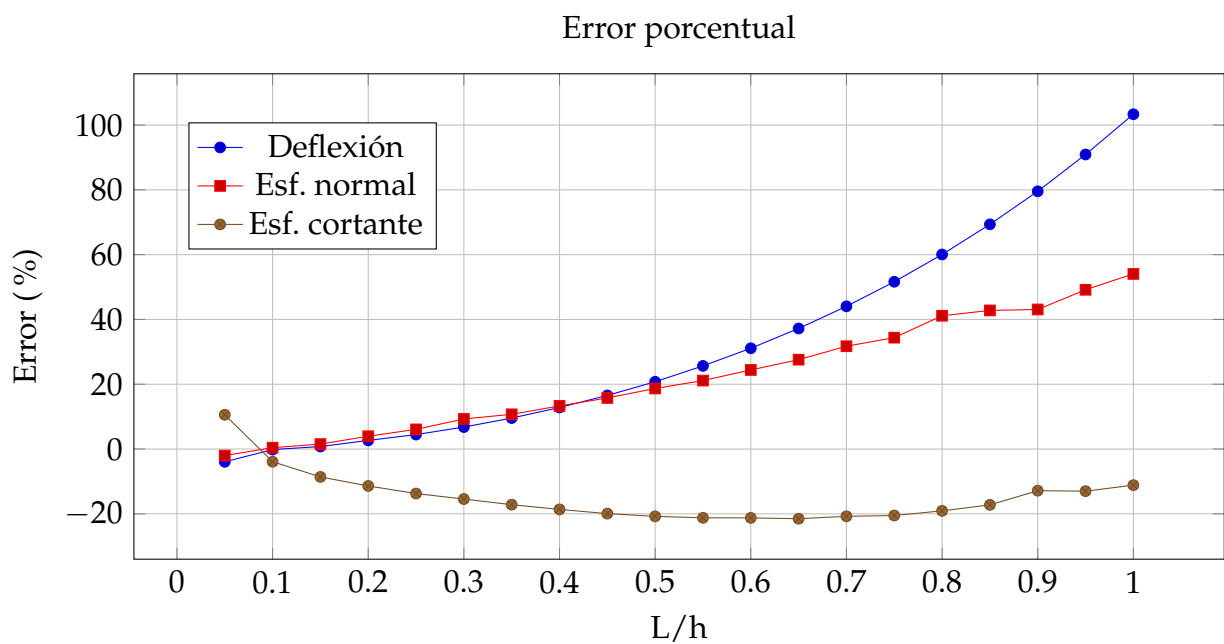




Y las diferencias porcentuales



Para visualizar mejor los datos, se recortan las relaciones  $L/h$  más altas.



De la gráfica anterior, se concluye que para que los errores de la solución analítica utilizando la teoría de Euler-Bernoulli estén por debajo del 25 %, la relación  $L/h$ , debe estar por debajo de 0.55.

## Anexo: Tiempo de ejecución de las simulaciones

### Proyecto 8.7.2

Para la corrida de las 150 simulaciones cuyos resultados se utilizaron en este informe se utilizó Matlab mediante la consola de comandos externa, el tiempo total para la ejecución de las 150 simulaciones fue de 1452 segundos, que corresponden a 24.2 minutos.

Figura 17: Inicio de la ejecución

```
OSCAR@DESKTOP-NONOC99 C:\Users\OSCAR\Desktop\MEF-Local\PEFICA20-OAS\PEFBID\
$ matlab -batch "Proyecto1"
[1/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.01 -> Malla de 2062 nudos, 3923 elementos y 4124 GLs
[2/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.02 -> Malla de 2018 nudos, 3833 elementos y 4036 GLs
[3/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.03 -> Malla de 2013 nudos, 3820 elementos y 4026 GLs
[4/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.04 -> Malla de 2077 nudos, 3946 elementos y 4154 GLs
[5/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.05 -> Malla de 2134 nudos, 4057 elementos y 4268 GLs
[6/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.06 -> Malla de 2174 nudos, 4134 elementos y 4348 GLs
[7/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.07 -> Malla de 2188 nudos, 4160 elementos y 4376 GLs
[8/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.08 -> Malla de 2214 nudos, 4209 elementos y 4428 GLs
[9/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.09 -> Malla de 2250 nudos, 4279 elementos y 4500 GLs
[10/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.10 -> Malla de 2283 nudos, 4343 elementos y 4566 GLs
[11/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.11 -> Malla de 2341 nudos, 4456 elementos y 4682 GLs
[12/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.12 -> Malla de 2376 nudos, 4524 elementos y 4752 GLs
[13/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.13 -> Malla de 2419 nudos, 4608 elementos y 4838 GLs
[14/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.14 -> Malla de 2465 nudos, 4698 elementos y 4930 GLs
[15/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.15 -> Malla de 2461 nudos, 4688 elementos y 4922 GLs
[16/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.16 -> Malla de 2522 nudos, 4808 elementos y 5044 GLs
[17/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.17 -> Malla de 2523 nudos, 4809 elementos y 5046 GLs
[18/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.18 -> Malla de 2431 nudos, 4623 elementos y 4862 GLs
[19/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.19 -> Malla de 2479 nudos, 4717 elementos y 4958 GLs
[20/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.20 -> Malla de 2450 nudos, 4670 elementos y 4912 GLs
[21/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.21 -> Malla de 2526 nudos, 4807 elementos y 5052 GLs
[22/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.22 -> Malla de 2513 nudos, 4780 elementos y 5026 GLs
[23/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.23 -> Malla de 2646 nudos, 5044 elementos y 5292 GLs
[24/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.24 -> Malla de 2672 nudos, 5095 elementos y 5344 GLs
[25/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.25 -> Malla de 2699 nudos, 5147 elementos y 5398 GLs
[26/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.26 -> Malla de 2687 nudos, 5122 elementos y 5374 GLs
[27/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.27 -> Malla de 2709 nudos, 5165 elementos y 5418 GLs
[28/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.28 -> Malla de 2732 nudos, 5209 elementos y 5464 GLs
[29/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.29 -> Malla de 2735 nudos, 5214 elementos y 5470 GLs
[30/150]Proyecto 1/mallas/1.10_0.30 -> Malla de 2771 nudos, 5285 elementos y 5542 GLs
[31/150]Proyecto 1/mallas/1.20_0.01 -> Malla de 2232 nudos, 4246 elementos y 4464 GLs
[32/150]Proyecto 1/mallas/1.20_0.02 -> Malla de 2246 nudos, 4271 elementos y 4492 GLs
```

Figura 18: Final de la ejecución

```
[124/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.04 -> Malla de 3135 nudos, 5970 elementos y 6270 GLs
[125/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.05 -> Malla de 3343 nudos, 6384 elementos y 6686 GLs
[126/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.06 -> Malla de 3145 nudos, 5987 elementos y 6290 GLs
[127/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.07 -> Malla de 3349 nudos, 6393 elementos y 6698 GLs
[128/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.08 -> Malla de 3297 nudos, 6288 elementos y 6594 GLs
[129/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.09 -> Malla de 3211 nudos, 6113 elementos y 6422 GLs
[130/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.10 -> Malla de 3172 nudos, 6034 elementos y 6344 GLs
[131/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.11 -> Malla de 3148 nudos, 5984 elementos y 6296 GLs
[132/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.12 -> Malla de 3111 nudos, 6309 elementos y 6622 GLs
[133/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.13 -> Malla de 3275 nudos, 6235 elementos y 6550 GLs
[134/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.14 -> Malla de 3208 nudos, 6101 elementos y 6416 GLs
[135/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.15 -> Malla de 3188 nudos, 6059 elementos y 6376 GLs
[136/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.16 -> Malla de 3221 nudos, 6124 elementos y 6442 GLs
[137/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.17 -> Malla de 3199 nudos, 6077 elementos y 6398 GLs
[138/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.18 -> Malla de 3246 nudos, 6170 elementos y 6492 GLs
[139/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.19 -> Malla de 3190 nudos, 6056 elementos y 6380 GLs
[140/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.20 -> Malla de 3218 nudos, 6111 elementos y 6436 GLs
[141/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.21 -> Malla de 3269 nudos, 6211 elementos y 6538 GLs
[142/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.22 -> Malla de 3345 nudos, 6362 elementos y 6690 GLs
[143/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.23 -> Malla de 3236 nudos, 6142 elementos y 6472 GLs
[144/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.24 -> Malla de 3339 nudos, 6347 elementos y 6678 GLs
[145/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.25 -> Malla de 3326 nudos, 6318 elementos y 6652 GLs
[146/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.26 -> Malla de 3359 nudos, 6383 elementos y 6718 GLs
[147/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.27 -> Malla de 3348 nudos, 6359 elementos y 6696 GLs
[148/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.28 -> Malla de 3307 nudos, 6277 elementos y 6614 GLs
[149/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.29 -> Malla de 3437 nudos, 6535 elementos y 6874 GLs
[150/150]Proyecto 1/mallas/2.00_0.30 -> Malla de 3380 nudos, 6420 elementos y 6760 GLs
Elapsed time is 1452.023411 seconds.
```

### Proyecto 8.7.3

Para la corrida de las 60 simulaciones cuyos resultados se utilizaron en este informe se utilizó Matlab mediante la consola de comandos externa, el tiempo total para la ejecución de las 60 simulaciones fue de 316 segundos, que corresponden a 5.3 minutos.

Figura 19: Inicio de la ejecución

```
OSCAR@DESKTOP-NONOC9P C:\Users\OSCAR\Desktop\MEF-Local\PEFICA20-OAS\PEFBID\
$ matlab -batch "Proyecto1"
[1/60]Proyecto 1/Punto 2/0.050 -> Malla de 1120 nudos, 2010 elementos y 2240 GLs
[2/60]Proyecto 1/Punto 2/0.100 -> Malla de 1098 nudos, 2008 elementos y 2196 GLs
[3/60]Proyecto 1/Punto 2/0.150 -> Malla de 1074 nudos, 1982 elementos y 2148 GLs
[4/60]Proyecto 1/Punto 2/0.200 -> Malla de 1083 nudos, 2012 elementos y 2166 GLs
[5/60]Proyecto 1/Punto 2/0.250 -> Malla de 1079 nudos, 2014 elementos y 2158 GLs
[6/60]Proyecto 1/Punto 2/0.300 -> Malla de 1078 nudos, 2018 elementos y 2156 GLs
[7/60]Proyecto 1/Punto 2/0.350 -> Malla de 1039 nudos, 1946 elementos y 2078 GLs
[8/60]Proyecto 1/Punto 2/0.400 -> Malla de 1044 nudos, 1960 elementos y 2088 GLs
[9/60]Proyecto 1/Punto 2/0.450 -> Malla de 1051 nudos, 1976 elementos y 2102 GLs
[10/60]Proyecto 1/Punto 2/0.500 -> Malla de 996 nudos, 1870 elementos y 1992 GLs
[11/60]Proyecto 1/Punto 2/0.550 -> Malla de 1050 nudos, 1978 elementos y 2100 GLs
[12/60]Proyecto 1/Punto 2/0.600 -> Malla de 1042 nudos, 1964 elementos y 2084 GLs
[13/60]Proyecto 1/Punto 2/0.650 -> Malla de 1005 nudos, 1892 elementos y 2010 GLs
[14/60]Proyecto 1/Punto 2/0.700 -> Malla de 1025 nudos, 1932 elementos y 2050 GLs
[15/60]Proyecto 1/Punto 2/0.750 -> Malla de 1044 nudos, 1970 elementos y 2088 GLs
[16/60]Proyecto 1/Punto 2/0.800 -> Malla de 1050 nudos, 1982 elementos y 2100 GLs
[17/60]Proyecto 1/Punto 2/0.850 -> Malla de 1047 nudos, 1976 elementos y 2094 GLs
[18/60]Proyecto 1/Punto 2/0.900 -> Malla de 1044 nudos, 1970 elementos y 2088 GLs
[19/60]Proyecto 1/Punto 2/0.950 -> Malla de 1047 nudos, 1976 elementos y 2094 GLs
[20/60]Proyecto 1/Punto 2/1.000 -> Malla de 1043 nudos, 1968 elementos y 2086 GLs
[21/60]Proyecto 1/Punto 2/1.050 -> Malla de 1030 nudos, 1942 elementos y 2060 GLs
[22/60]Proyecto 1/Punto 2/1.100 -> Malla de 1056 nudos, 1992 elementos y 2112 GLs
```

Figura 20: Final de la ejecución

```
[50/60]Proyecto 1/Punto 2/2.500 -> Malla de 1101 nudos, 2046 elementos y 2202 GLs
[51/60]Proyecto 1/Punto 2/2.550 -> Malla de 1085 nudos, 2014 elementos y 2170 GLs
[52/60]Proyecto 1/Punto 2/2.600 -> Malla de 1079 nudos, 2000 elementos y 2158 GLs
[53/60]Proyecto 1/Punto 2/2.650 -> Malla de 1094 nudos, 2028 elementos y 2188 GLs
[54/60]Proyecto 1/Punto 2/2.700 -> Malla de 1102 nudos, 2042 elementos y 2204 GLs
[55/60]Proyecto 1/Punto 2/2.750 -> Malla de 1106 nudos, 2048 elementos y 2212 GLs
[56/60]Proyecto 1/Punto 2/2.800 -> Malla de 1096 nudos, 2028 elementos y 2192 GLs
[57/60]Proyecto 1/Punto 2/2.850 -> Malla de 1103 nudos, 2040 elementos y 2206 GLs
[58/60]Proyecto 1/Punto 2/2.900 -> Malla de 1112 nudos, 2056 elementos y 2224 GLs
[59/60]Proyecto 1/Punto 2/2.950 -> Malla de 1115 nudos, 2060 elementos y 2230 GLs
[60/60]Proyecto 1/Punto 2/3.000 -> Malla de 1111 nudos, 2050 elementos y 2222 GLs
Elapsed time is 315.949022 seconds.
```