●—∗·

Tanque de GNL en Cartagena

Distribución de Esfuerzo Cortante en la Cúpula considerada como estructura mixta anisótropa

Grupo de Mecánica Computacional
Depto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Escuela Técnica Sup. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Madrid.

Fecha: 06 de septiembre de 2000

Índice General

1 Objeto y Alcance

1.1 Objeto

El objeto de este cálculo es el análisis del comportamiento estructural de cúpula como estructura mixta. Es un cálculo adicional a [2], teniendo en cuenta falta de isotropía de la lámina esférica por la presencía de las vigas metálicas conectadas al hormigón. Por ello, se quiere la distribución del esfuerzo cortante en los casos siguientes:

1. **Caso de carga repartida** de valor 10000 N/m en una línea circunferencial de radio $23,53$ m con respecto al eje de simetría de la cúpula:
   - 1a. la sección **A** a $21,120$ m de radio a partir del eje de la cúpula;
   - 1b. la sección **B** a $25,890$ m de radio;
   - 1c. la sección **C** a $31,490$ m de radio;
   - 1d. la sección **D** a $13,590$ m de radio.
2. **Caso de carga concentrada** de valor 100000 N en el vértice del modelo de la cúpula, es decir el eje de simetría de la misma:
   - 2a. la sección **A1** a $31,49$ m de radio a partir del eje de la cúpula;
   - 2b. la sección **B1** a 13.59 m de radio;
   - 2c. la sección **C1** al apoyo.

   En cada caso, se compararán los resultados del modelo con vigas (anisótropo) a los resultados del modelo sin vigas rigidizadoras (isótropo).
3. **En el caso de un gradiente de temperatura** de valor $13\,°C^{-1}$, se sacarán los resultados tanto a lo largo de las vigas como en la losa compuesta de la chapa de acero y del hormigón.

1.2 Alcance

Para poder explicar el efecto de la colaboración de los dos rigidizadores y la viga circunferencial de refuerzo en la recogida del cortante, se ha diseñado un modelo que describiremos. Por ello, el alcance de este documento puede definirse como sigue:

1. Descripción del modelo de elementos finitos;
2. Propiedades de los materiales;
3. Presentación de los resultados;
4. Conclusión.

2 Descripción del Modelo de Elementos Finitos

En el modelo consta de las siguientes partes diferenciadas representadas en la figura 1:

1. Lámina de acero de la cúpula de espesor de 5 mm;
2. Dos perfiles metálicos IPE-400 radiales en los que se apoya la lámina de acero, rigidizandóla. El modelo representa únicamente un gajo en que la simetría cíclica permite descomponer la cúpula, entre dos vigas radiales. Para que se consideren adecuadamente las condiciones de simetría, las rigideces a la flexión y al corte de las vigas radiales en los extremos del gajo deberán tomarse como la mitad del valor real. Por ello, se toma para ellas la mitad del modulo de elasticidad del acero estructural;
3. Un perfil metálico IPN-140, circunferencial de refuerzo, situado a 0,8 m del arranque de la cúpula;
4. La lámina de hormigón fraguado encima de la lámina de acero, de espesor constante de 45 cm. En el modelo, las chapas de acero y del hormigón se consideran como una lámina única compuesta por dos capas.

   Lámina compuesta: capas de acero y de hormigón

   La lámina compuesta está discretizada como elementos lámina de cuatro nodos e integración reducida del tipo S4R. Un número de 650 elementos cuadriláteros ha sido considerado. En ABAQUS [1], 7 puntos de integración en cada chapa individual ha sido utilizado. Geométricamente, los 650 elementos se distribuyen sobre una superficie esférica de la cúpula de radio igual $53,825$ m. El gajo modelizado tiene el eje Ox (1) como eje de simetría como se ve en la figura 1, lo que tiene ventaja

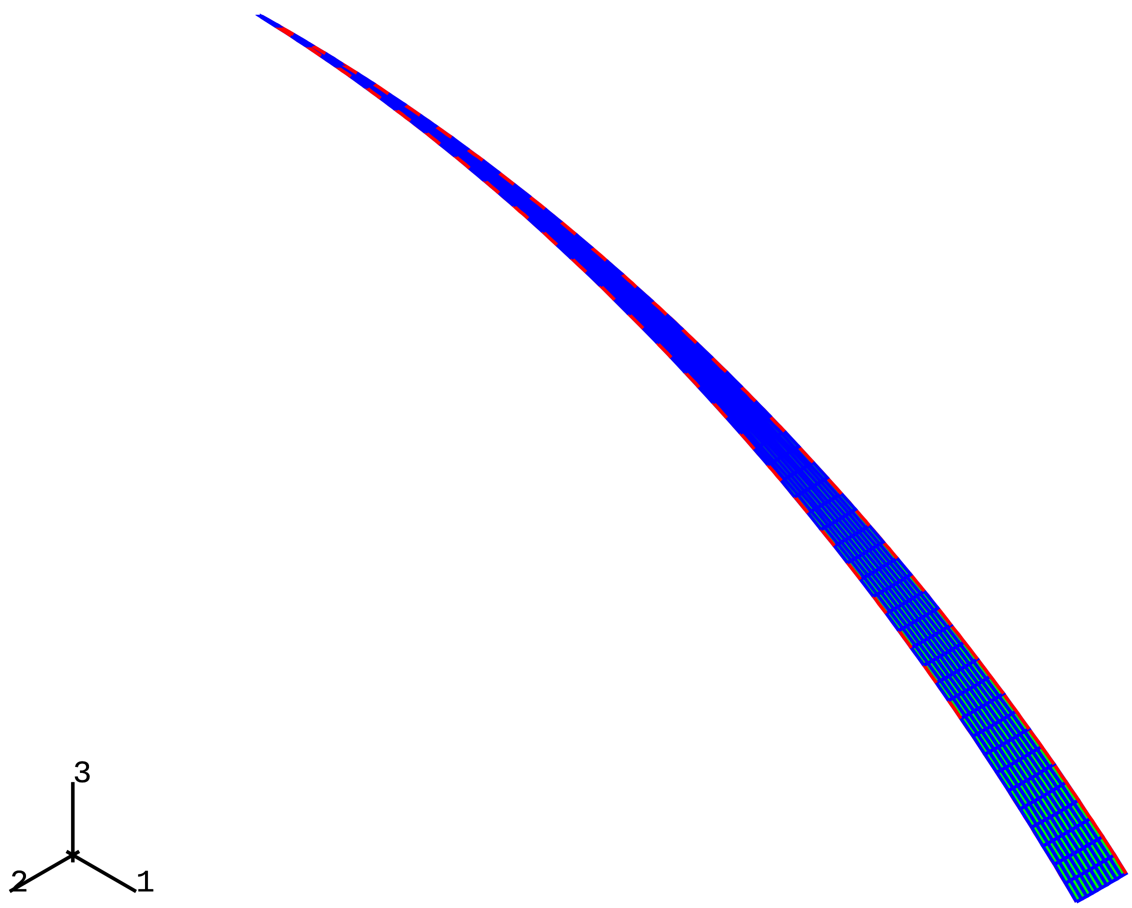

Figura 1: *Vista tridimensional del Modelo de Elementos Finitos. En rojo las vigas radiales, en negro la viga circunferencial, en verde la chapa compuesta (acero y hormigón), y en azul la discretización.*

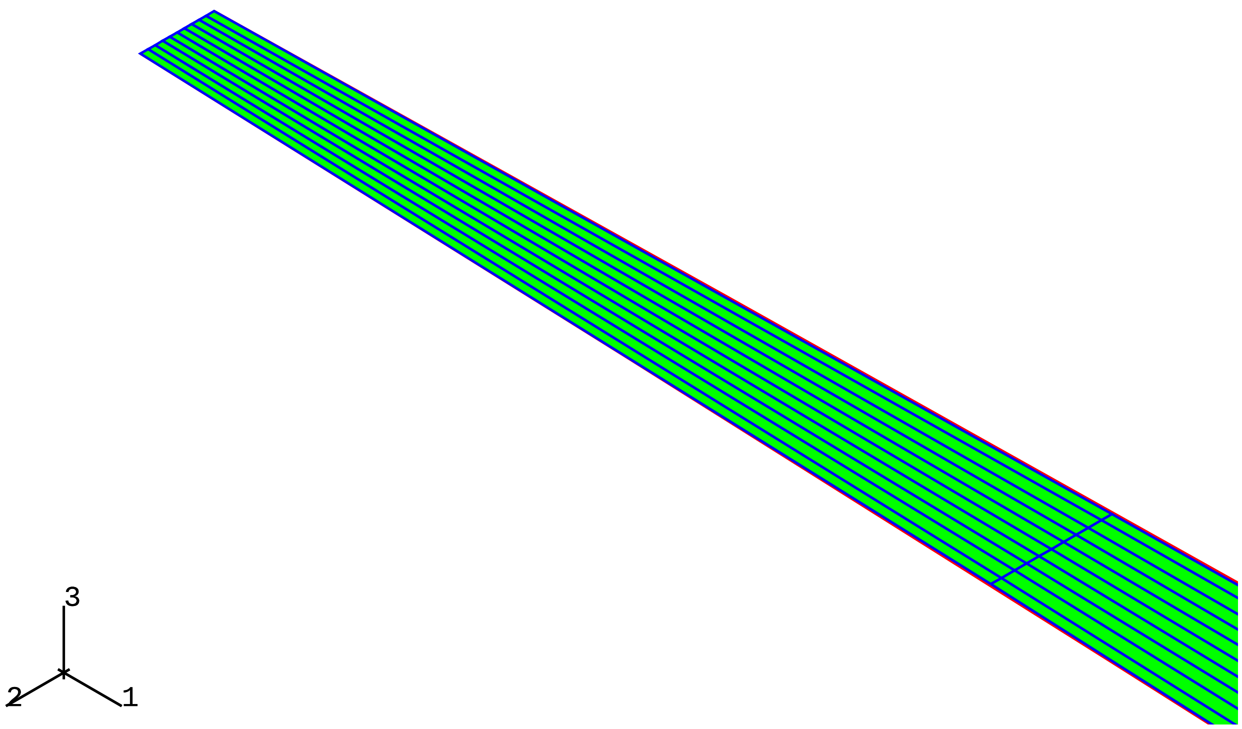

Figura 2: *Vista tridimensional de un detalle (los 10 últimos elementos, al vértice de la cúpula) del Modelo de Elementos Finitos. En rojo las vigas radiales, en verde la chapa compuesta (acero y hormigón), y en azul la discretización.*

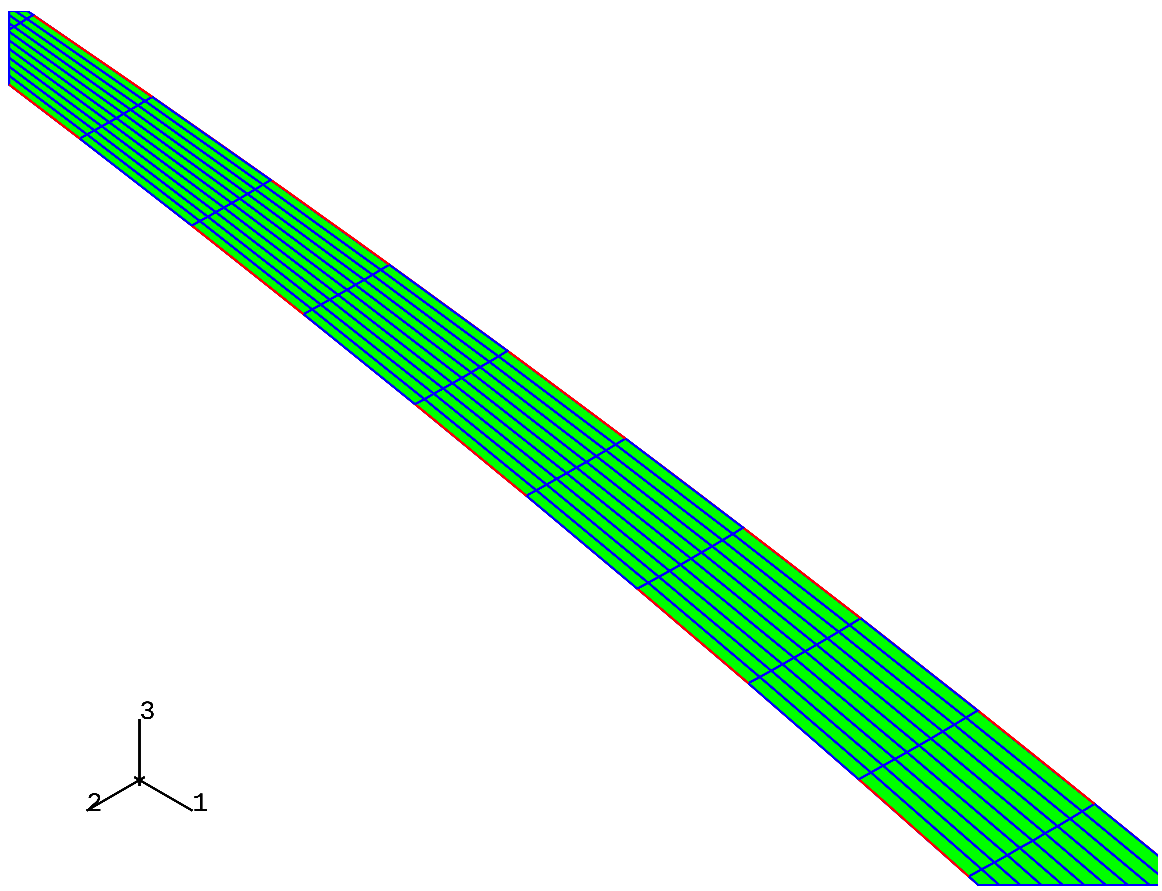

Figura 3: *Vista tridimensional de un detalle (entre los radios* $6,430$ *m y* $12,950$ *m) del Modelo de Elementos Finitos. En rojo las vigas radiales, en verde la chapa compuesta (acero y hormigón), y en azul la discretización.*

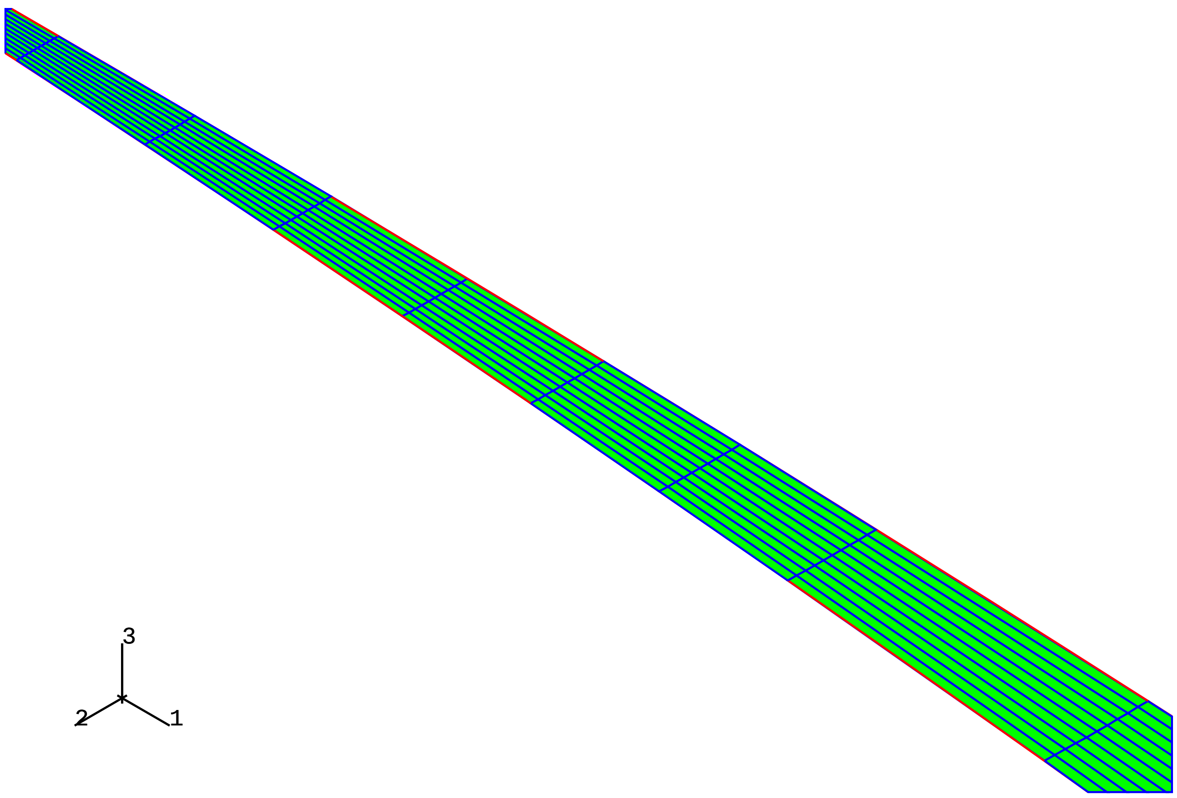

Figura 4: *Vista tridimensional de un detalle (entre los radios* $1,802$ *m y* $4,451$ *m) del Modelo de Elementos Finitos: Refinamiento de la malla. En rojo las vigas radiales, en verde la chapa compuesta (acero y hormigón), y en azul la discretización. En este detalle se observa el refinamiento de la malla.*

para imponer las condiciones de contorno de tipo “simetría” en los dos bordes según los meridianos. La discretización ha sido uniforme salvo en los 50 últimos elementos hacia el vértice de la cúpula donde se ha refinado la malla, figura 4 (recomendado para evitar una distorsión excesiva de los elementos finitos).

Las vigas longitudinales

Se han modelizado dos perfiles IPE-400 como rigidizadores. Estos elementos están situados en dos planos de simetría verticales, según los meridianos extremos del modelo (gajo). En el modelo, estos perfiles han sido considerados como elementos vigas de tres nodos tipo B31 de sección en I. Un total de 30 elementos para cada viga han sido considerados en la discretización, figura 5. Por considerar la mitad del modulo de elasticidad de las dos vigas en el modelo, los esfuerzos (cortantes, momentos flectores, esfuerzos normales) reales en las vigas completas serán el doble de sus valores obtenidos por los cálculos en el presente modelo.

La viga circunferencial

Un sólo perfil IPN-140 ha sido modelizado como viga de refuerzo. ha sido considerado como elemento viga de tres nodos tipo B31 de sección en I. Un total de 30 elementos ha sido usados en la discretización. La figura 5 se indica la modelización de estas vigas.

Conexión entre elementos

Para definir la excentricidad entre el eje de la lámina compuesta y la base de las vigas, considerandólas entonces como rigidizadores de la lámina, la conexión entre los dos conjuntos ha sido realizada mediante la condición de tipo *MPC, BEAM que obliga a los nodos paralelos y que ocupan la misma posición en ambos elementos, a tener los mismos grados de libertad, teniendo en cuenta la presencia de una viga rígida entre los nodos, con la excentricidad que corresponde.

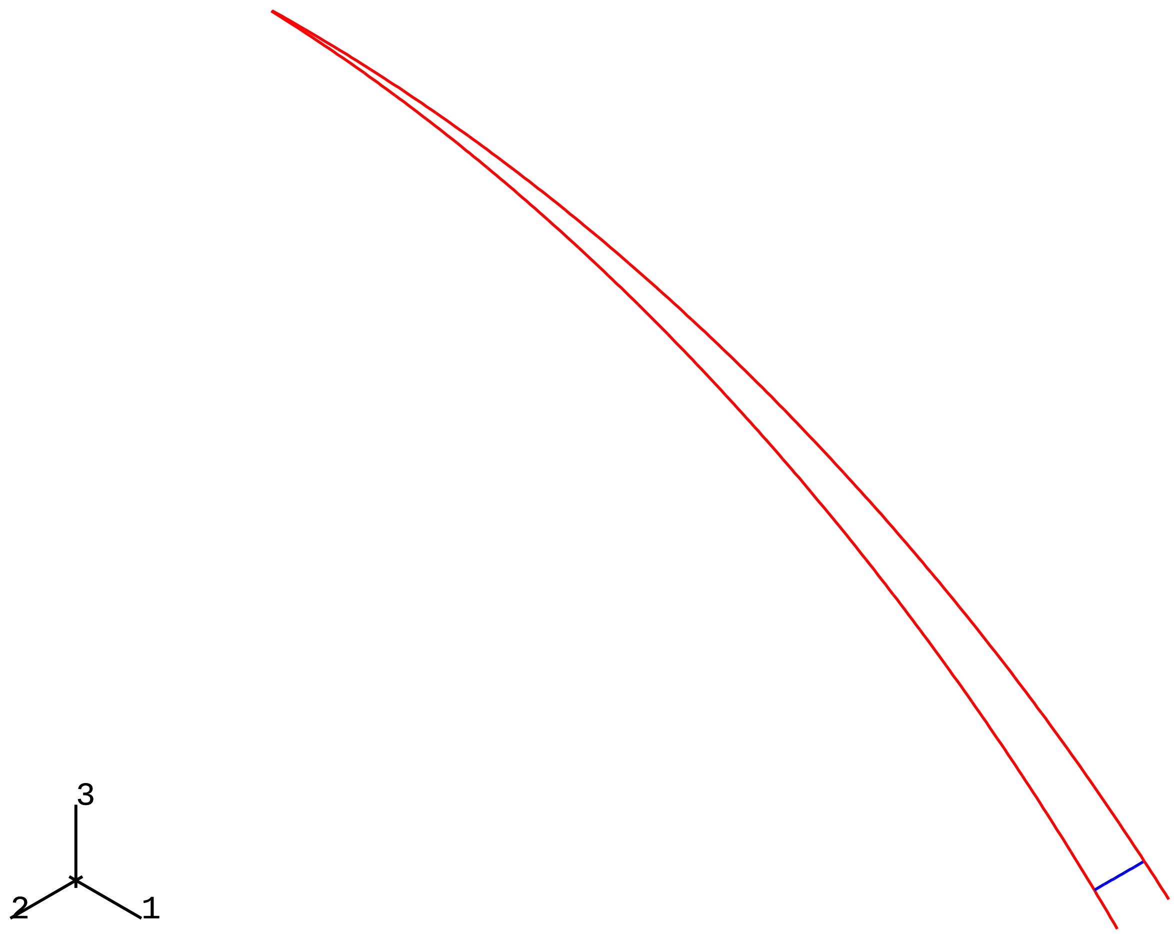

Figura 5: *Vista tridimensional del Modelo de Elementos Finitos de las las vigas radiales y de la viga circunferencial.*

Condiciones de contorno

Se han impuesto dos tipos de condiciones de contorno:

(a) Apoyo simple.

  i. En el caso de que se trate de cargas repartidas o concentradas, se ha impuesto condiciones que impiden translación según los tres ejes globales dejando los giros libres de producirse;

  ii. En el caso de que se trate de un gradiente de temperatura, se ha estudiado dos casos:

    A. apoyo simple;

    B. apoyo particular que permite un movimiento según el eje $Ox(1)$, es decir según el radio del muro de hormigón y eje de simetría del modelo.

(b) Simetría. A los dos bordes del gajo se imponen condiciones de simetria. Estas condiciones impiden una translación y dos giros. Además el vértice tiene que tener un único movimiento permitido según el eje $Oz(3)$ global, lo que elimina los 3 giros y 2 translaciones.

3 Propiedades de los materiales;

Se han utilizado dos materiales:

(a) **El hormigón H-400**

  i. Módulo de elasticidad: $E = 3,5 \cdot 10^{10}\,\mathrm{N/m^2}$;

  ii. Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,25$;

  iii. Coeficiente de dilatación: $\alpha = 1,07 \cdot 10^{-5}\,{}^\circ\mathrm{C}^{-1}$;

  iv. Densidad: $\rho = 2500\,\mathrm{kg/m^3}$.

(b) **El acero al carbono**

  i. Módulo de elasticidad: $E = 2,1 \cdot 10^{11}\,\mathrm{N/m^2}$;

  ii. Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,3$;

  iii. Coeficiente de dilatación: $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5}\,{}^\circ\mathrm{C}^{-1}$;

  iv. Densidad: $\rho = 7850\,\mathrm{kg/m^3}$;

  v. Límite elástico: $\sigma_y = 262\,\mathrm{N/mm^2}$.

4 Presentación de los resultados

4.1 Cortante en las secciones cerca de la carga aplicada

Aquí se examina la situación en la cual la carga aplicada es repartida y está colocada a nivel de los 11 nudos que constituyen la línea circunferencial de radio $r = 23,53$ m a partir del eje de la cúpula. En el caso anisótropo se ha sumado la contribución del cortante existente en las vigas según el ancho eficaz [3], lo que explica el salto o la discontinuidad en la parte central de la curva donde la influencia del cortante debido a las vigas no se considera. Se observa, como era de esperar, un incremento local del cortante en el modelo anisótropo en la zona influida por las vigas meridionales.

4.1.1 Caso isótropo y anisótropo: sección situada a un radio $r = 25,89$ m

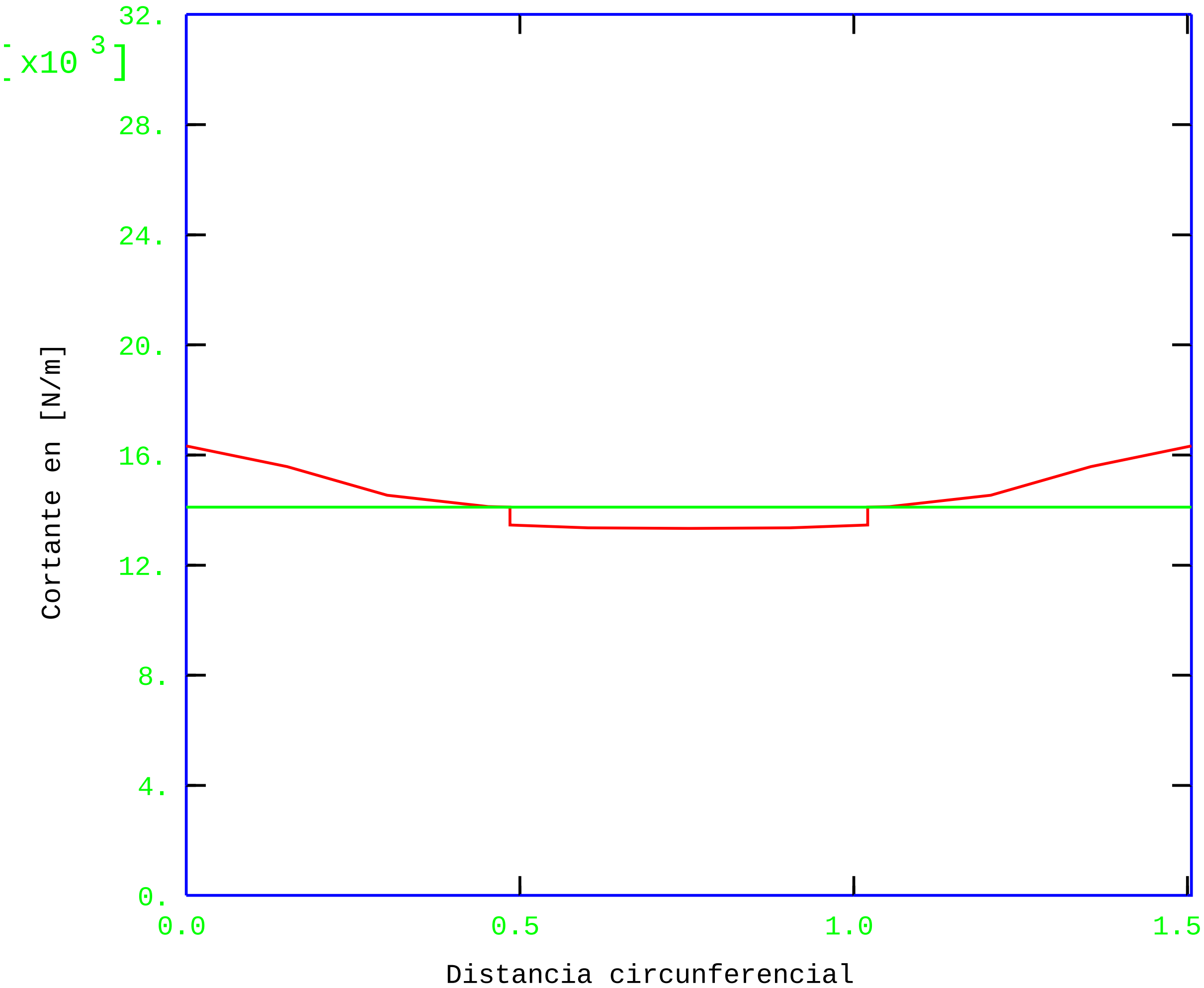

Figura 6: *Distribución del Cortante en [N/m] a lo largo de la línea circunferencial a nivel del radio* $25,89$ *m: en verde la curva del caso isótropo y en rojo la del caso anisótropo.*

4.1.2 Caso isótropo y anisótropo: sección situada a un radio $r = 21,12$ m

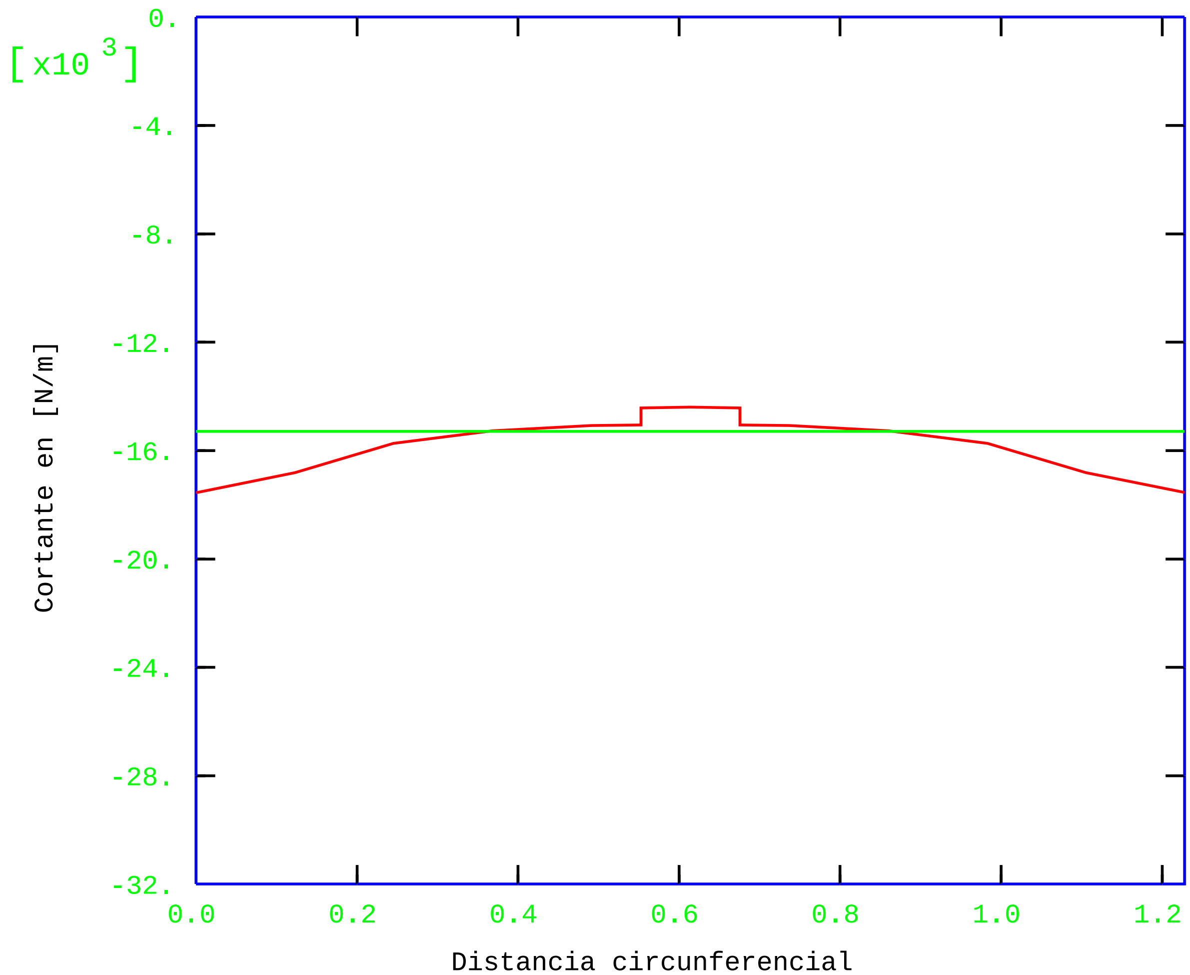

Figura 7: *Distribución del Cortante en [N/m] a lo largo de la línea circunferencial a nivel del radio* $21,12$ *m: en verde la curva del caso isótropo y en rojo la del caso anisótropo.*

4.2 Cortante en secciones lejos de la carga aplicada

4.2.1 Caso isótropo y anisótropo: sección situada a un radio $r = 13,59$ m

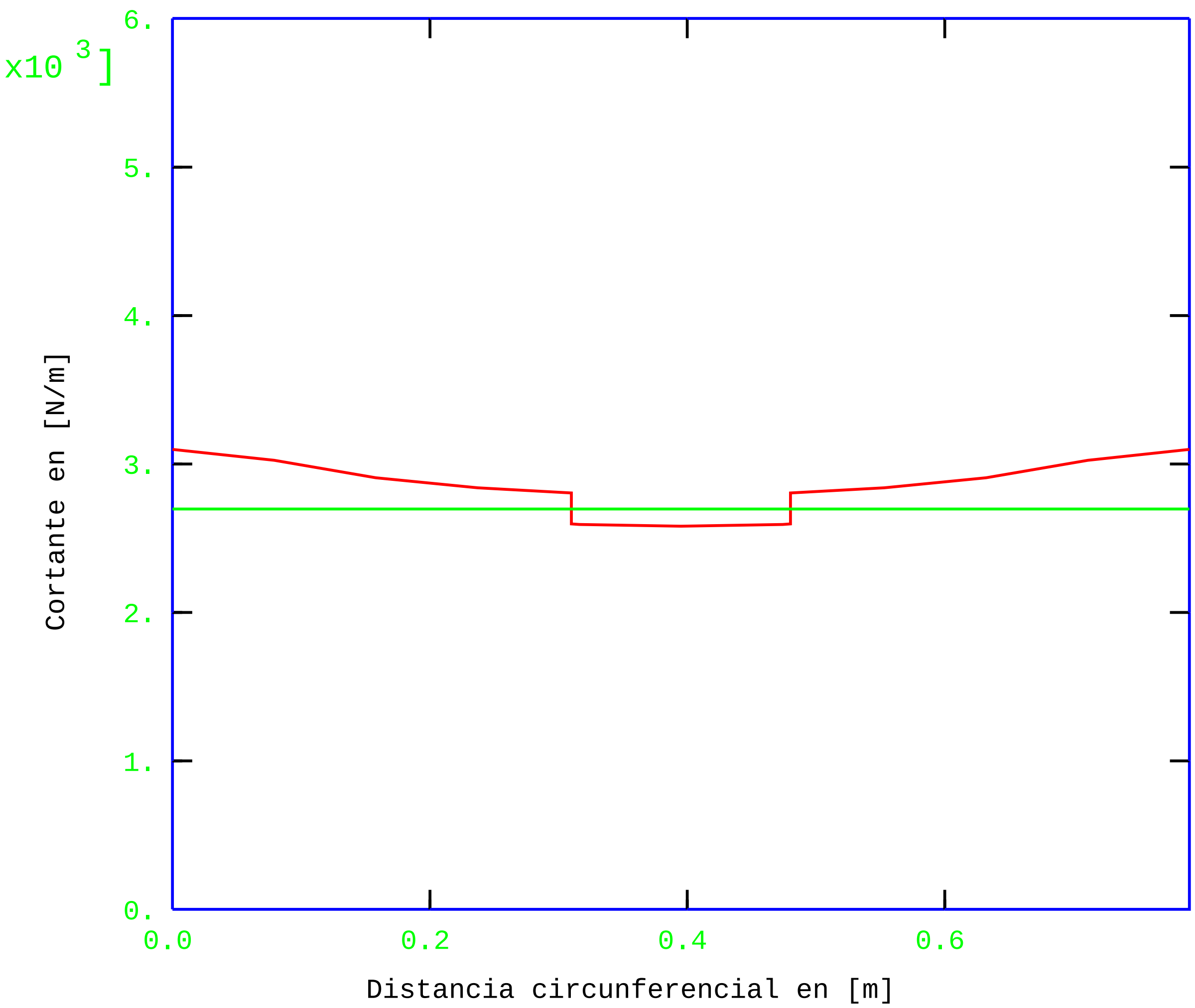

Figura 8: *Distribución del Cortante en [N/m] a lo largo de la línea circunferencial a nivel del radio* $13,59$ *m: en verde la curva del caso isótropo y en rojo la del caso anisótropo.*

4.2.2 Caso isótropo y anisótropo: sección situada a un radio $r = 31,49$ m

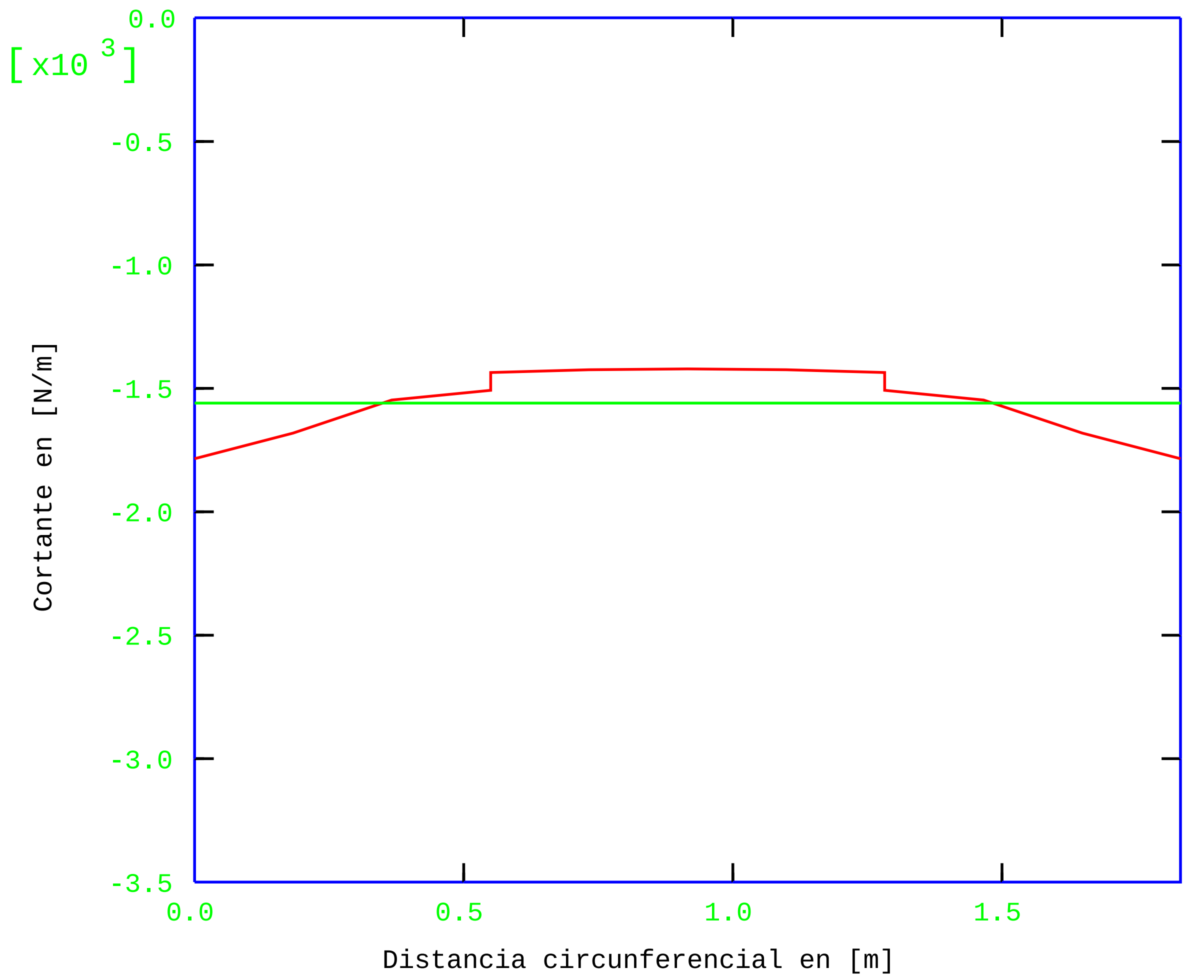

Figura 9: *Distribución del Corte en [N/m] a lo largo de la línea circunferencial a nivel del radio* $21,12$ *m: en verde la curva del caso isótropo y en rojo la del caso anisótropo.*

4.3 Distribución General del Cortante

4.3.1 Caso anisótropo: en todas secciones

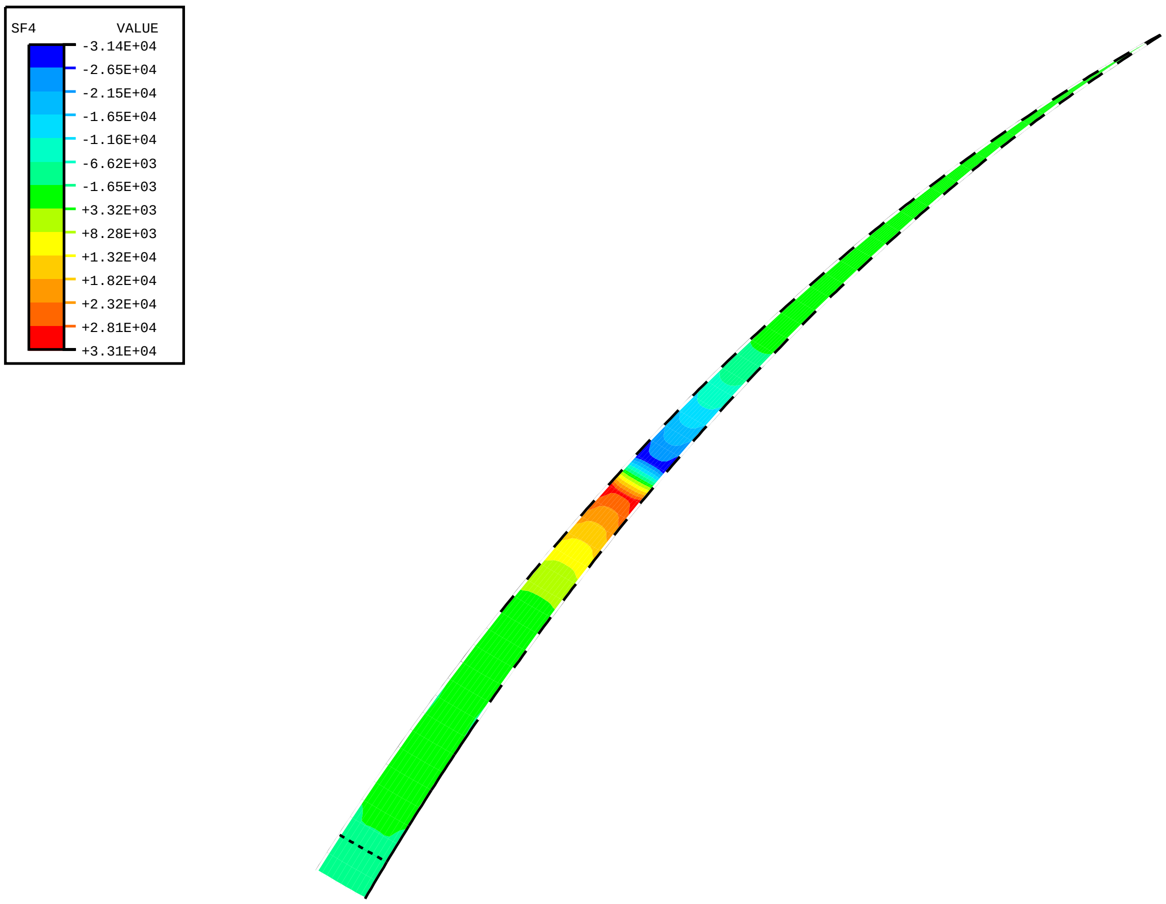

Figura 10: *Distribución General del Cortante en [N/m].*

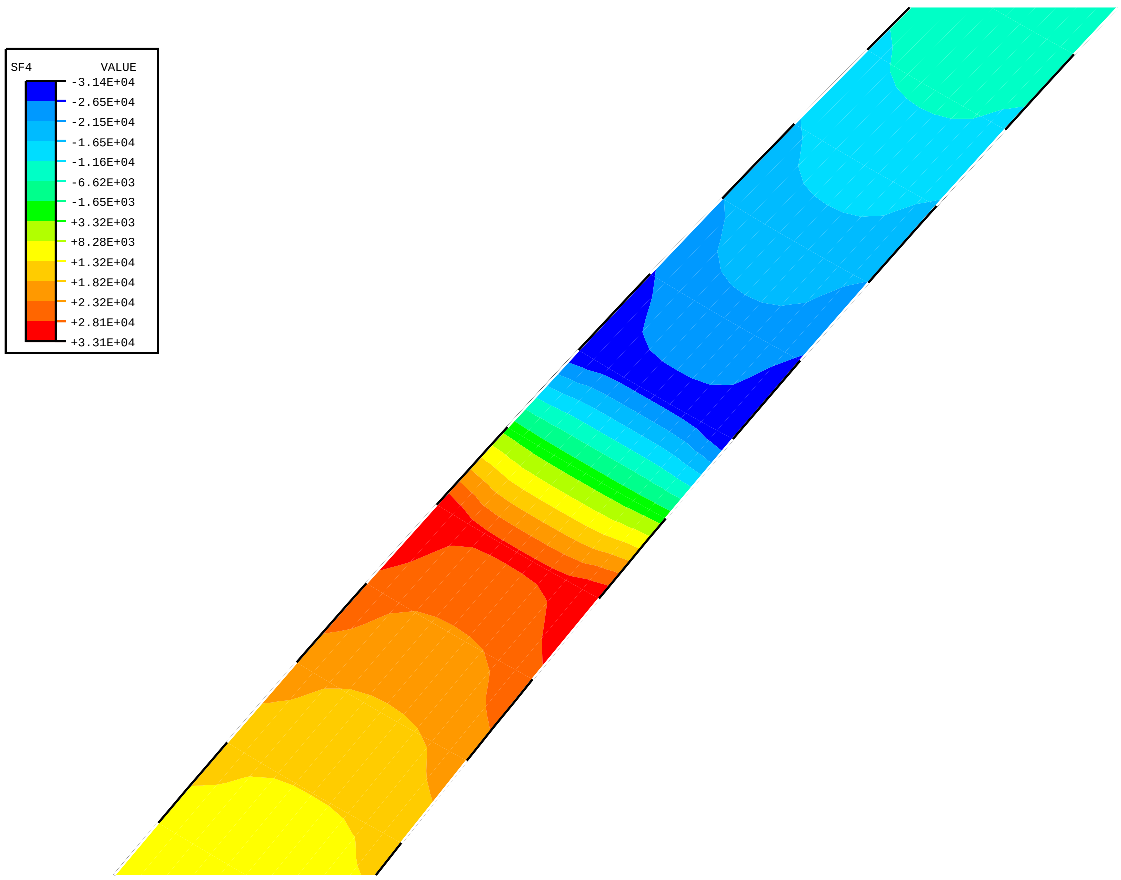

Figura 11: *Detalle de la distribución General del Cortante en [N/m] alrededor de la zona donde se aplica la carga.*

4.3.2 Caso anisótropo: Cortante en las vigas

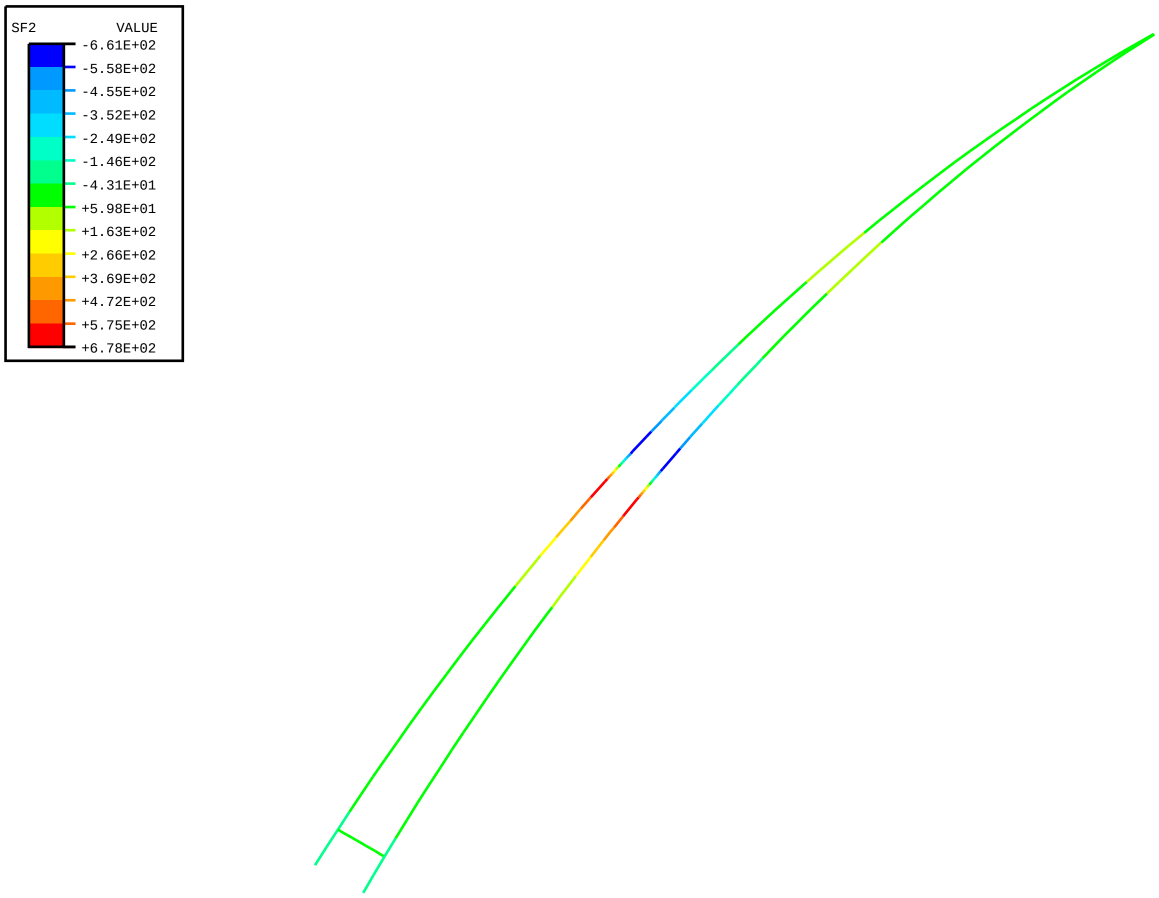

Figura 12: *Distribución General del Corte en las vigas en [N].*

4.3.3 Caso isótropo: Distribución del Cortante

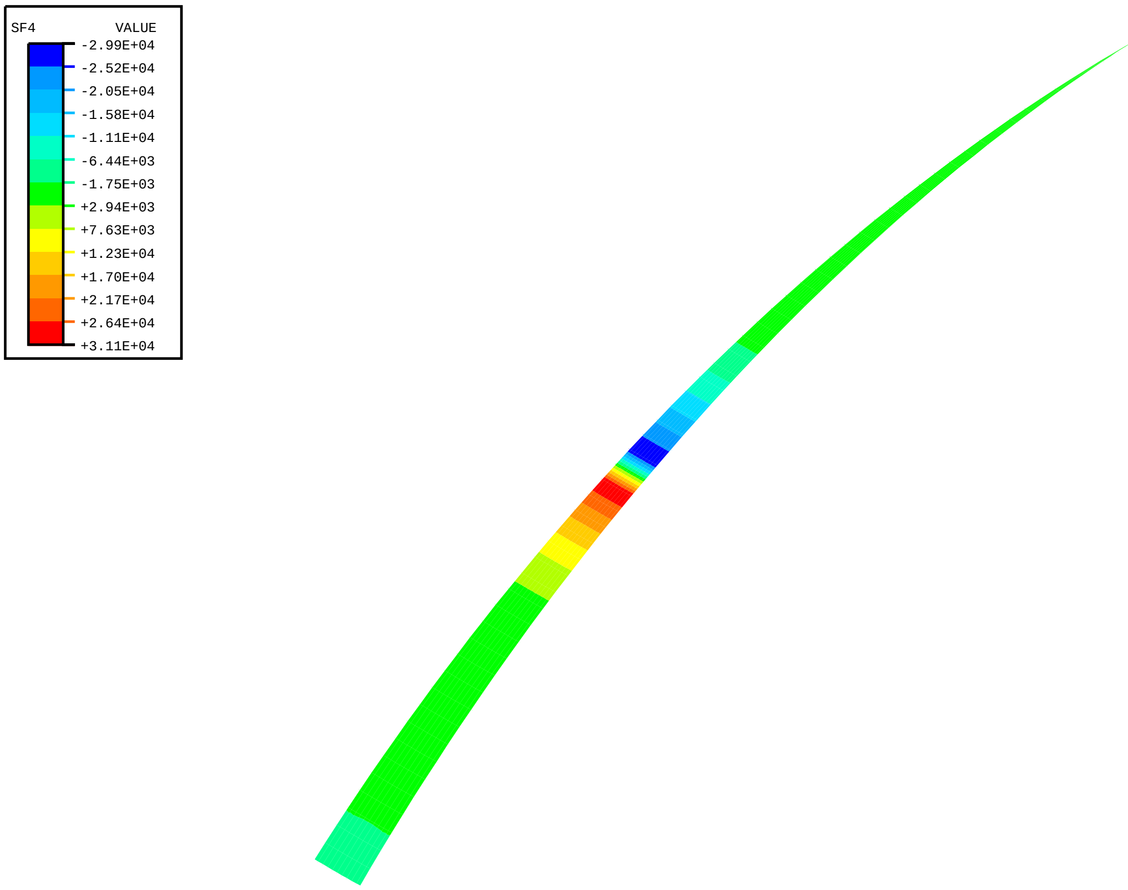

Figura 13: *Distribución General del Corte en [N/m].*

A continuación se presentan los resultados por el caso de que se trate de una carga puntual colocada al vértice del gajo.

4.4 Carga Puntual colocada en el vértice de la cúpula

4.4.1 Caso isótropo y anisótropo: sección situada a un radio $r = 31,49$ m

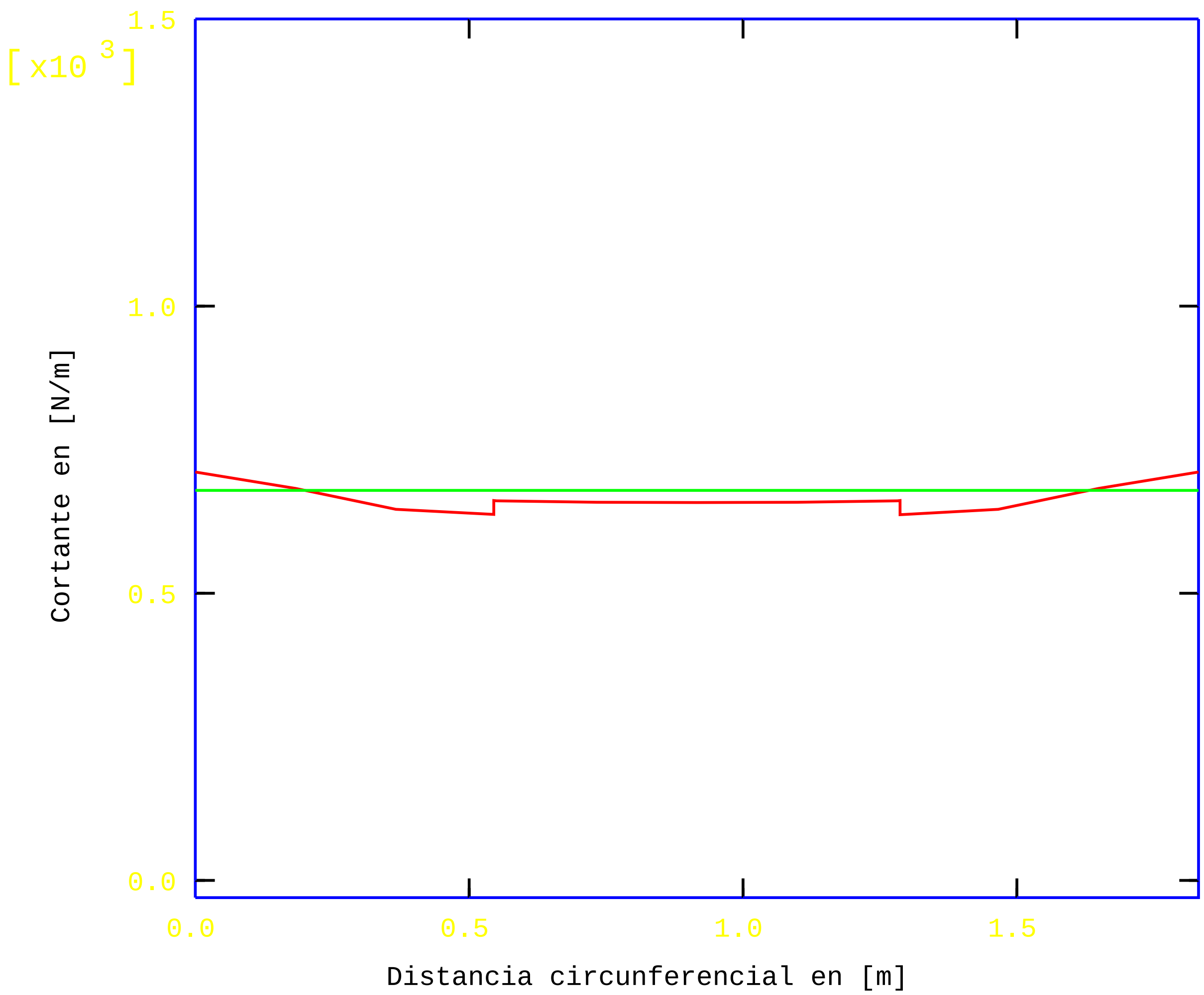

Figura 14: *Distribución del Cortante en [N/m] a lo largo de la línea circunferencial a nivel del radio 31,49 m: en verde la curva del caso isótropo y en rojo la del caso anisótropo.*

4.4.2 Caso isótropo y anisótropo: sección situada a un radio $r = 13,59$ m

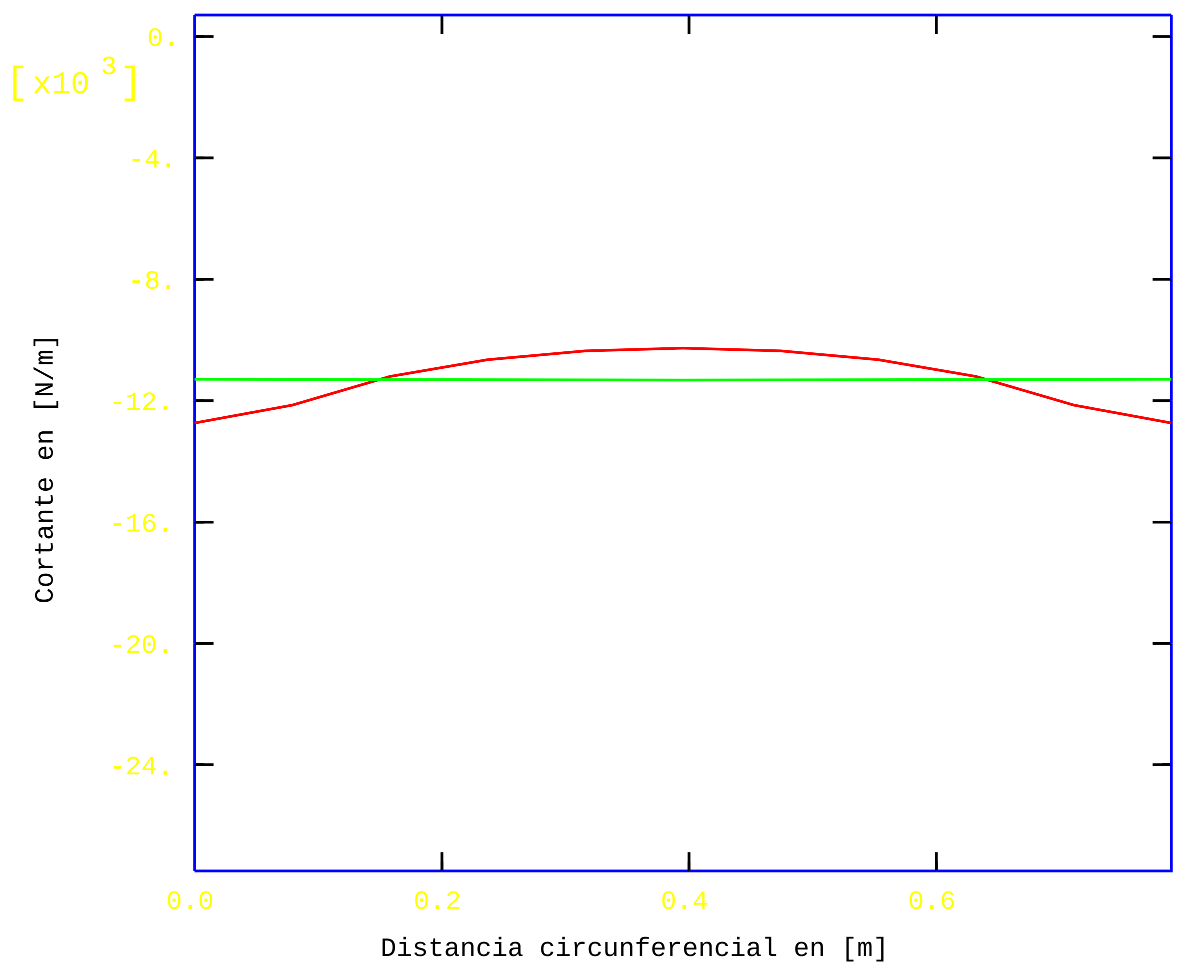

Figura 15: *Distribución del Corte en [N/m] a lo largo de la línea circunferencial a nivel del radio* $13,59$ *m: en verde la curva del caso isótropo y en rojo la del caso anisótropo.*

4.4.3 Caso isótropo y ansótropo: sección situada a nivel del apoyo

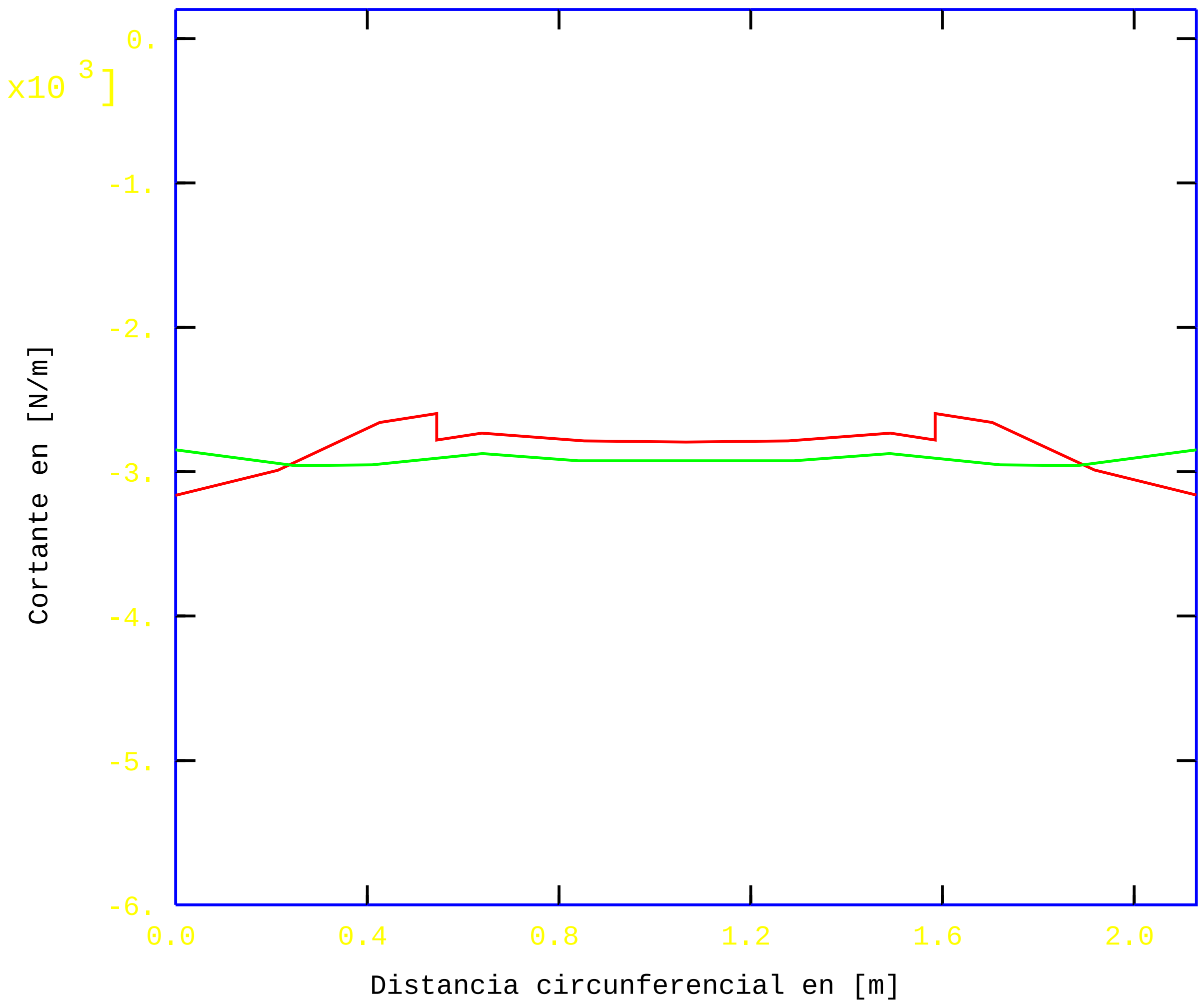

Figura 16: *Distribución del Cortante en [N/m] a lo largo de la línea circunferencial a nivel del radio* $13,59$ *m: en verde la curva del caso isótropo y en rojo la del caso anisótropo.*

4.5 Resumen de resultados para cargas repartidas y concentradas

Los resultados, en terminos de valores máximos del cortante en [N/m], pueden resumirse como:

Carga repartida			
Sección	isótropo	anisótropo	incremento local
A	14100	16330	15,8 %
B	−15290	−17550	14,8 %
C	2697	3099	14,9 %
D	−1560	−1785	14,4 %
Carga concentrada			
A1	679,3	711,5	04,7 %
B1	−11320	−12740	12,5 %
C1	−2959	−3163	06,9 %

4.6 Caso del gradiente de temperatura

El gradiente de temperatura considerado es de $13\,^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$ con una temperatura inicial de $16\,^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$. Lo que supone una temperatura de $16\,^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$ impuesta en la cara interna y de $29\,^{\circ}\mathrm{C}^{-1}$ impuesta en la cara externa.

4.6.1 Resultados en la losa compuesta: a nivel del muro, apoyo simple y apoyo con libertad de desplazamiento radial

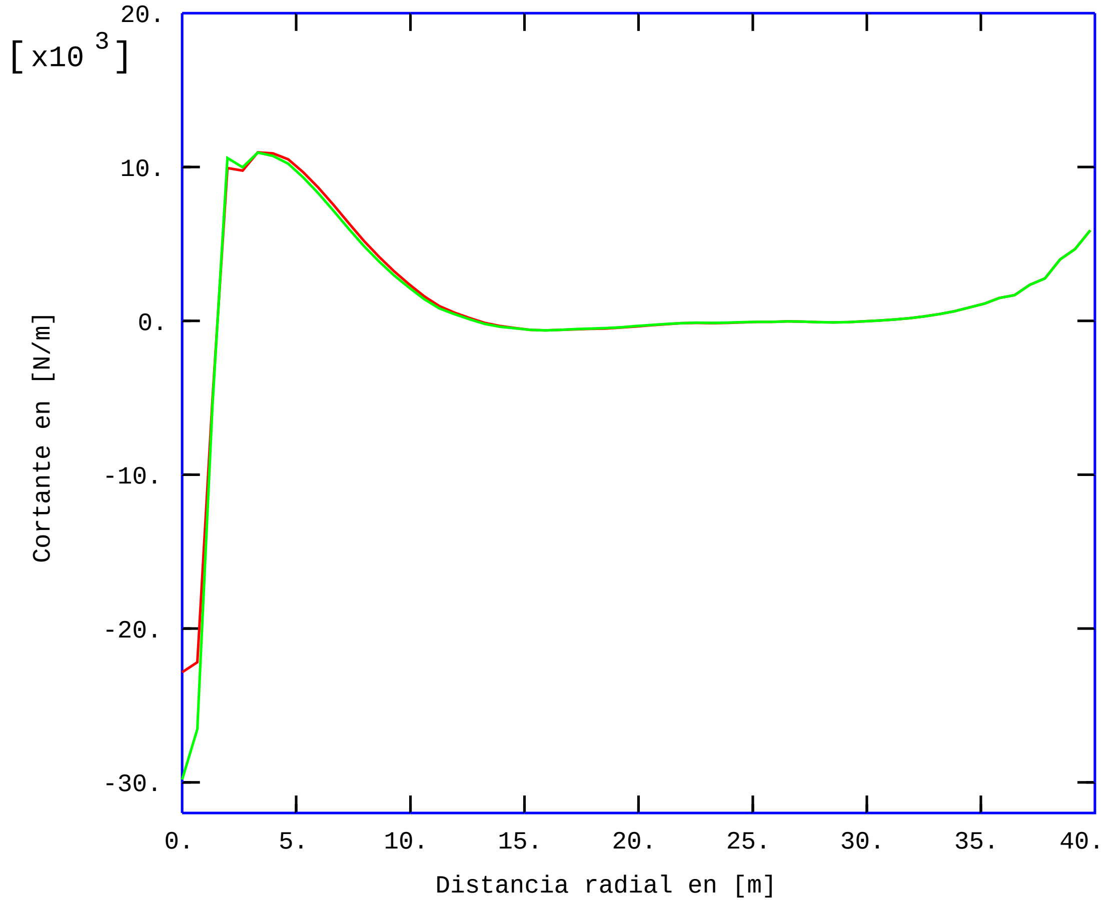

Figura 17: *Distribución del Cortante en [N/m] en la losa a lo largo del borde radial. En rojo el cortante en el caso de un apoyo simple y en verde el cortante en el caso de un apoyo con libertad de movimiento radial. El eje de abscisas refleja la distancia radial medida desde el apoyo en el muro hacia en interior de la cúpula*

4.6.2 Resultados en las vigas: a nivel del muro, apoyo simple y apoyo con libertad de desplazamiento radial

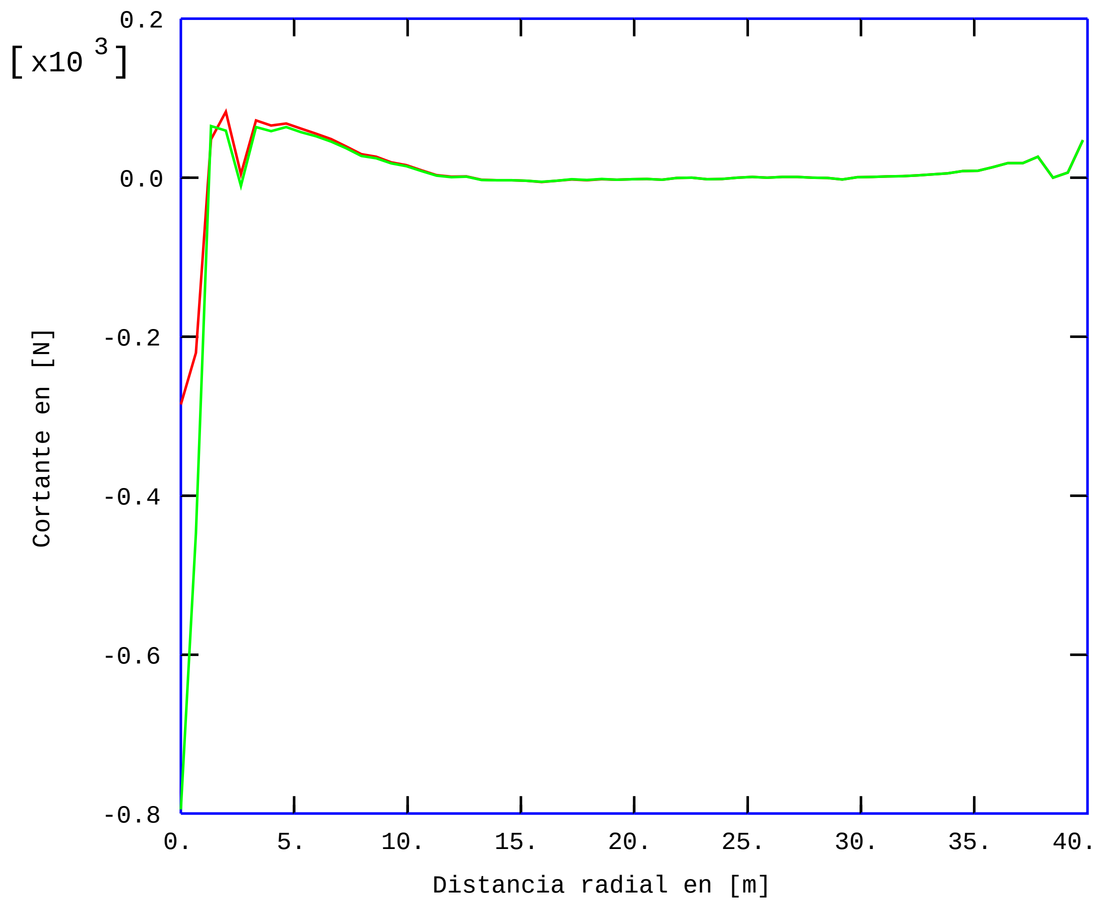

Figura 18: *Distribución del Cortante en [N] en la viga radial. En rojo el cortante en el caso de un apoyo simple y en verde el cortante en el caso de un apoyo con libertad de movimiento radial.*

5 Conclusión

(a) Tanto en el caso de la carga repartida como el de la carga concentrada, el coeficiente máximo del cortante debido a la presencia de las vigas como rigidizadores es de $1,158$, es decir, el incremento local de cortante es siempre menor que el 16 %;

(b) En los modelos con apoyo simple y apoyo con libertad de desplazamiento radial,a partir de una distancia de $0,8$ m desde el muro hacia el interior, la diferencia entre los resultados (en terminos del cortante) tanto en la losa que en las vigas es pequeña en el caso de que actue un gradiente de temperatura de $13\,°\mathrm{C}^{-1}$ con una temperatura incial de $16\,°\mathrm{C}^{-1}$. En cambio a una distancia menor de $0,8$ m los resultados difieren. Por el cortante en la losa y a nivel del apoyo la diferencia es de $-6970\,N = -29810 - (-22840)$ y en una de las vigas la diferencia es de $-509,6\,N = -794,8 - (-285,2)$.

Referencias

[1] *ABAQUS Theory, User's Manuals (Version 5.8).* Hibbit, Karlsson and Sorensen. HKS, Inc. 1998.

[2] *Tanque GNL Cartagena. Cálculo y diseño de la obra civil. Cúpula del Tanque Externo. Fases Constructivas.* Informe UPM-NC.3603 (rev.0). Grupo de Mecánica Computacional.

[3] *Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos para carreteras. Serie normativas. Ministerio de Fomento, Secretaría de Estado de Infraestructuras y Transportes, Dirección General de Carreteras.*1996.

Apéndice

Listado de los ficheros empleados en el cálculo

Las extensiones de los ficheros se interpretan como:
.inp : entrada de datos;
.jnp : mandatos del postproceso;
.dat : listado resultados requeridos y mensajes;
.mpl : gráficos de los resultados;
.res : fichero de “restart” o “inicio”;
.out : salida del postproceso. **anacleto:/datos/proyectos/gnl/cupula/hormigonado/gajo/prueba:**

En este camino, se encontrarán los ficheros siguientes:

(a) Ficheros de datos y de mandatos:

```
-rw-r--r--   1 sosthene projects   27035 Sep  6 13:26 aa1.inp
-rw-r--r--   1 sosthene projects     365 Sep  7 14:49 aa1.jnp
-rw-r--r--   1 sosthene projects   27049 Sep  6 13:28 aa2.inp
-rw-r--r--   1 sosthene projects     365 Sep  7 15:12 aa2.jnp
-rw-r--r--   1 sosthene projects   26832 Sep  6 13:30 aa3.inp
-rw-r--r--   1 sosthene projects     381 Sep  7 15:22 aa3.jnp
-rw-r--r--   1 sosthene projects   25382 Sep  6 13:31 aa4.inp
-rw-r--r--   1 sosthene projects     381 Sep  7 16:23 aa4.jnp
-rw-r--r--   1 sosthene projects   27238 Sep  6 13:32 aa5.inp
-rw-r--r--   1 sosthene projects   25221 Sep  6 13:33 aa6.inp
```

(b) Ficheros de gráficos:

```
-rw-r--r--   1 sosthene projects    8208 Sep  5 10:02 cv1.mpl
-rw-r--r--   1 sosthene projects    8208 Sep  5 10:45 cv2.mpl
-rw-r--r--   1 sosthene projects    8208 Sep  5 11:03 cv3.mpl
-rw-r--r--   1 sosthene projects    8208 Sep  5 11:07 cv4.mpl

-rw-r--r--   1 sosthene projects   28728 Sep  5 14:36 cc1.mpl
-rw-r--r--   1 sosthene projects   28728 Sep  5 15:11 cc2.mpl
-rw-r--r--   1 sosthene projects    8208 Sep  5 15:12 cc3.mpl
```

(c) Ficheros de “restart”:

```
-rw-r--r--   1 sosthene projects 7208960 Sep  7 14:46 oaa1.res
-rw-r--r--   1 sosthene projects 7208960 Sep  7 14:56 oaa2.res
-rw-r--r--   1 sosthene projects 6881280 Sep  7 10:30 oconvigaspc.res
```

(d) Ficheros de listado de los resultados:

```
-rw-r--r--   1 sosthene projects   88033 Sep  7 14:46 oaa1.dat
-rw-r--r--   1 sosthene projects   88041 Sep  7 14:56 oaa2.dat
-rw-r--r--   1 sosthene projects   87153 Sep  7 10:30 oconvigaspc.dat
```