



COMPORTAMIENTO Y APLICACIÓN DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS SINTÉTICAS EN DISTINTAS TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES

AUTORES

CORONEL, LOURDES MARGARITA
GALASSI, BRUNO JAVIER
WANDELOW, GONZALO GABRIEL

TUTOR DE TRABAJO

ING. KRISTEL ROSHDESTWENSKY

TUTOR ACADÉMICO

MG. ING. ALEJANDRO RUBERTO

ASESOR

DR. ING. JUAN MANUEL PODESTA

AÑO 2024

Agradecimientos

A nuestras familias, cuyo amor, comprensión y apoyo incondicional fueron fundamentales durante todo este proceso. Gracias por su paciencia y confianza.

A la Mg. Ing. Kristel Roshdestwensky, tutora del trabajo, por su dedicación, orientación y valiosos consejos a lo largo de este proyecto, su compromiso fue fundamental para el desarrollo de la investigación. Al Mg. Ing. Alejandro Ruberto, tutor académico, por su conocimiento y su respaldo en cada etapa de este trabajo brindando su experiencia y su visión crítica y al Dr. Ing. Juan Manuel Podestá, asesor, por su constante disposición para ayudar y fomentar la precisión técnica necesaria en esta investigación.

A la empresa Melmix y a Viguetec por el apoyo brindado en la realización de los ensayos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

Finalmente, al personal del Laboratorio de Materiales y Estructuras (LABMAE) de Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) por su predisposición.

Resumen

La incorporación de fibras en el hormigón da lugar a un material de altas prestaciones que mejora su comportamiento estructural. Las fibras contribuyen a mejorar la distribución de tensiones dentro del hormigón, lo que se traduce en un incremento significativo en la tenacidad y una mayor capacidad para soportar cargas aplicadas.

Como objetivo principal del presente trabajo, se evalúa el comportamiento del hormigón reforzado con macrofibras sintéticas en diferentes tipologías estructurales. Particularmente se estudia su aplicación en la capa de compresión de losas de viguetas pretensadas como reemplazo de la armadura de repartición y control de temperatura, como así también en tubos estructurales como reemplazo o refuerzo estructural de la malla electrosoldada.

Los resultados obtenidos en las losas demuestran que las fibras de polipropileno compiten eficazmente con el refuerzo convencional, reduciendo costos, mejorando el rendimiento estructural en condiciones de servicio y superando la carga máxima para la que fueron diseñadas. Con respecto a los tubos, aunque el refuerzo con fibras resulta económicamente rentable, no ha demostrado mejorar la resistencia y el comportamiento post-fisuración.

Como complemento del programa experimental se realiza un modelado computacional de los ensayos, considerando al material como homogéneo en términos de su comportamiento macroscópico.

Palabras clave: macrofibras sintéticas, tenacidad, losas de viguetas pretensadas, tubos de hormigón, modelado numérico.

Índice

INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 1 - EL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS SINTÉTICAS	6
EVOLUCIÓN DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS	7
COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN CONVENCIONAL.....	8
COMPORTAMIENTO DEL HRF	9
CLASIFICACIÓN DEL HRF.....	13
CARACTERÍSTICAS DE LAS FIBRAS.....	15
COMPORTAMIENTO EN SERVICIO DEL HRF	17
DURABILIDAD DEL HRF.....	18
COMPORTAMIENTO EN ESTADO FRESCO.....	19
CAPÍTULO 2 - APLICACIÓN DEL HRFS EN LA CAPA DE COMPRESIÓN DE LOSAS DE VIGUETAS PRETENSADAS	22
SOBRE LAS LOSAS DE VIGUETAS PRETENSADAS	23
INCORPORACIÓN DE LAS FIBRAS EN LA CAPA DE COMPRESIÓN	24
COMPORTAMIENTO AL CORTE	26
CONSIDERACIONES REGLAMENTARIAS PARA LOSAS DE VIGUETAS PRETENSADAS.....	28
DOSIFICACIÓN DE FIBRAS.....	29
PROGRAMA EXPERIMENTAL (IRAM 11555 - 1996).....	34
PROCEDIMIENTO DE ENSAYO.....	38
ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
ANÁLISIS ECONÓMICO.....	48
CONCLUSIONES	49
CAPÍTULO 3 - APLICACIÓN DEL HRFS EN TUBOS ESTRUCTURALES	51
SOBRE LOS TUBOS ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN ARMADO	52
INCORPORACIÓN DE LAS FIBRAS EN LOS TUBOS DE HORMIGÓN	54
CONSIDERACIONES REGLAMENTARIAS DE LOS TUBOS ESTRUCTURALES	55
ELECCIÓN DE DIÁMETROS Y DOSIFICACIÓN DE FIBRAS.....	58
PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	60
PROCESO DE ELABORACIÓN	61
TRANSPORTE, MANIPULACIÓN Y RECEPCIÓN	65
PROCEDIMIENTO DE ENSAYO Y RESULTADOS.....	67
ANÁLISIS ECONÓMICO.....	74
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	75
CAPÍTULO 4 – ASPECTOS AMBIENTALES	77
INTRODUCCIÓN	78
ANÁLISIS DE LOS FACTORES AMBIENTALES.....	79
CONCLUSIONES	81
CAPÍTULO 5 – MODELADO NUMÉRICO	83
INTRODUCCIÓN	84
ALCANCES DEL MODELADO	85
MODELADO DE LOSAS CON VIGUETAS PRETENSADAS	87
MODELADO DE TUBOS DE HORMIGÓN	91
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	94

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
SOBRE LA DOSIS INCORPORADA Y LA ELABORACIÓN DEL HRFS.....	97
SOBRE LAS FIBRAS SELECCIONADAS	97
SOBRE LA INCORPORACIÓN DE LAS FIBRAS EN LAS LOSAS DE VIGUETAS PRETENSADAS.....	98
SOBRE LA INCORPORACIÓN DE LAS FIBRAS EN LOS TUBOS ESTRUCTURALES	99
SOBRE LOS ENSAYOS REALIZADOS	100
SOBRE EL ANÁLISIS AMBIENTAL.....	101
SOBRE EL ANÁLISIS ECONÓMICO	102
SOBRE EL MODELADO NUMÉRICO	102
BIBLIOGRAFÍA	104
ANEXO A.....	109
PROPIEDADES DEL HORMIGÓN UTILIZADO	110
CONTROL DE CALIDAD DE LOS MATERIALES UTILIZADOS EN LA DOSIFICACIÓN	111
RESULTADOS DE ENSAYO “FLEXIÓN EN PRIMAS CON ENTALLADURA” (EN 14651).....	114
ANEXO B.....	117
DETALLE DEL ANÁLISIS ECONÓMICO	118
ANEXO C	122
ANEXO D.....	154

Introducción

El hormigón convencional constituye un material frágil, especialmente debido a su comportamiento limitado frente a esfuerzos de tracción, es por esta razón que se incorporan barras de acero en su matriz en diferentes tipologías estructurales para control de fisuras o repartición uniforme de las cargas.

Para estos casos, el hormigón reforzado con fibras representa una alternativa, ya que la inclusión de las mismas en la mezcla aumenta su tenacidad y reduce la aparición de fisuras, aportando así beneficios adicionales y compensando las deficiencias principales del hormigón convencional permitiendo en ciertas ocasiones sustituir la armadura.

Desde hace varios años, el HRF es empleado en numerosas aplicaciones en todo el mundo tanto solo como combinado con armadura convencional, entre ellas aparecen la construcción y refuerzo de pavimentos, pisos industriales, estructuras hidráulicas, estabilizado de taludes, revestimiento de túneles y elementos premoldeados; en este trabajo se estudiarán particularmente los casos de tubos estructurales y losas de viguetas pretensadas.

CAPÍTULO

1

El hormigón reforzado con fibras sintéticas

Evolución del hormigón reforzado con fibras

La utilización de materiales reforzados con fibras en la construcción se remonta a miles de años iniciada por los mesopotámicos; en aquellos tiempos, se destacaba el uso de fibras vegetales en ladrillos de arcilla y pelos de animales en morteros de cemento, donde se observó su eficiencia para mejorar la resistencia de los materiales frágiles al aumentar su ductilidad. A lo largo del tiempo, se han desarrollado diferentes tipos de fibras y matrices con el objetivo de replicar o incluso mejorar el comportamiento de los materiales tradicionales.

El hormigón, uno de los materiales más utilizados en la construcción, ha sido objeto de numerosas investigaciones centradas en la incorporación de refuerzos; así, en la década de 1960, tras años de estudios y ensayos, surgió el hormigón reforzado con fibras (HRF). Las primeras fibras estudiadas fueron las de acero, debido a su fácil obtención y excelentes propiedades estructurales, lo que permitió su aplicación en pavimentos, losas, túneles y puentes; sin embargo, a pesar de sus ventajas, estas fibras presentan algunos problemas como la tendencia a la corrosión lo que reducía su durabilidad.

En búsqueda de alternativas, a partir de la década de 1970 se comenzaron a utilizar fibras sintéticas elaboradas a partir de polímeros. Estas fibras, inicialmente de corta longitud (microfibras) se empleaban para absorber la contracción plástica, proporcionar protección contra el fuego y prevenir el desprendimiento del hormigón, pero aunque resultaban eficaces en estos aspectos, presentaban un bajo módulo de elasticidad y una débil adherencia al hormigón, lo que limitaba su aplicación en soluciones estructurales.

No fue hasta la década de 1990 cuando aparecieron las primeras macrofibras sintéticas, caracterizadas por su mayor longitud y superiores propiedades estructurales, como un mayor módulo de elasticidad y una mejor adherencia al hormigón. Estas fibras lograron competir con las de acero ya que ofrecían ventajas como una mayor resistencia química y un menor peso.

En los años siguientes, el crecimiento de la industria de los polímeros impulsó nuevas investigaciones orientadas a mejorar aún más la resistencia, la adherencia, reducir el peso y aumentar la durabilidad de estas fibras. En la actualidad ya existen casos en la Ingeniería donde el uso del hormigón reforzado con fibras sintéticas (HRFS) ha demostrado ser más ventajoso que el de las fibras de acero (HRFA) como el de la reconstrucción de la catedral de La Laguna en las Islas Canarias, España.

Hasta el día de hoy se sigue investigando el uso de fibras sintéticas en la construcción de manera constante debido al continuo desarrollo de nuevos materiales y técnicas constructivas, buscando que en el futuro su uso pueda ser normalizado y se determinen los casos donde sean mejor aplicadas.

Comportamiento del hormigón convencional

Según el reglamento CIRSOC 201-2005, el hormigón *“es una mezcla homogénea compuesta por una pasta de cemento y agua, con agregados gruesos y finos, que en estado fresco tiene cohesión y trabajabilidad y que luego, por el fraguado y el endurecimiento de la pasta cementicia, adquiere resistencia mecánica y a las acciones del ambiente (durabilidad)”*. La resistencia del hormigón está principalmente relacionada con su capacidad para soportar esfuerzos de compresión, propiedad que se mide mediante f_c (resistencia característica) la cual representa la carga máxima que el material puede resistir sin fallar medida a los 28 días de edad. Este comportamiento es especialmente destacable, ya que el hormigón exhibe un rendimiento satisfactorio en compresión; sin embargo, la resistencia a tracción es prácticamente despreciable, por lo que al estar sometido a estos esfuerzos, incluso con cargas relativamente bajas, suelen aparecer fisuras que afectan su comportamiento y pueden llevar a la falla general del material lo que lo convierte en frágil caracterizado por su limitada capacidad de deformación antes de la rotura.

Por otro lado, la tenacidad se define como la capacidad de un material para absorber energía durante la deformación antes de la rotura y matemáticamente se puede interpretar como el área bajo la curva tensión-deformación. En este contexto, la Figura 1.1 muestra la curva tensión-deformación de un hormigón convencional, en la que se puede observar que al formarse la primera fisura la resistencia del material

experimenta una caída abrupta, lo que pone de manifiesto la baja tenacidad del hormigón; esto representa un riesgo significativo en su uso en obras de construcción, lo que motiva la inclusión de refuerzos que asuman la carga de tracción y mejoren tanto la tenacidad como la ductilidad.

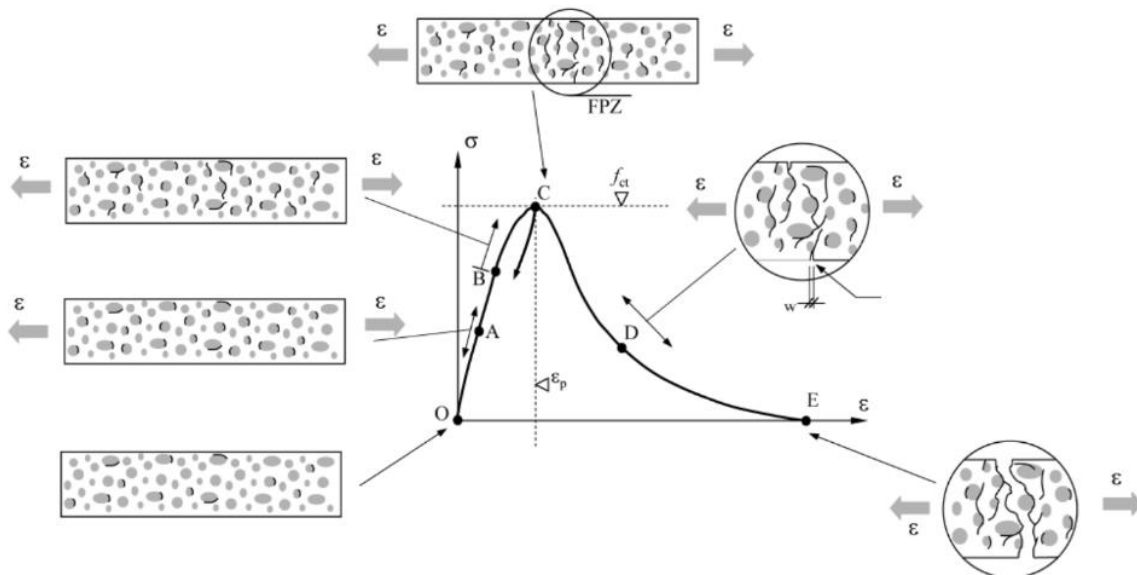


Fig. 1.1 - Comportamiento tensión - deformación del hormigón sin fibras (Habel, 2004)

Comportamiento del HRF

El hormigón reforzado con fibras (HRF) da lugar a un material de altas prestaciones que mejora su comportamiento estructural (Zerbino, 2010). Las fibras se incorporan en la matriz de forma aleatoria y la misma queda conformada como se observa en la Figura 1.2.

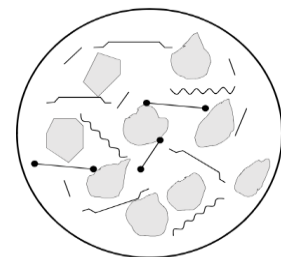


Fig. 1.2 HRF (Zerbino, 2010).

Como se mencionó previamente, el hormigón convencional presenta un comportamiento deficiente frente a esfuerzos de tracción, lo que se traduce en la formación de fisuras bajo cargas relativamente bajas; para abordar este inconveniente, la incorporación de fibras en la mezcla de hormigón confiere una capacidad mejorada para la transferencia de cargas durante el periodo post-fisuración. Antes de que se produzcan fisuras, no se observan cambios significativos en el comportamiento del hormigón convencional en comparación con el HRF, sin embargo, una vez que aparece la primera fisura las fibras comienzan a desempeñar un papel importante al "coser" la

fisura y actuar como un puente de carga, transfiriendo las tensiones a través de ellas y evitando la falla repentina del material (Fig. 1.3).

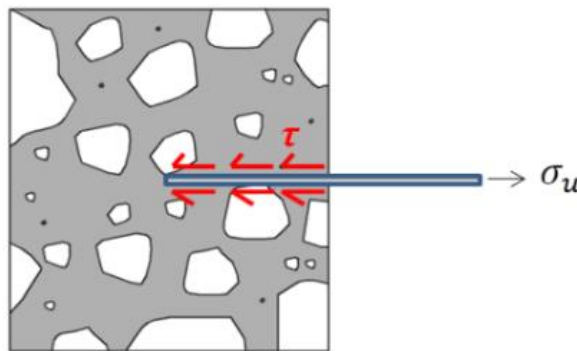


Fig. 1.3 - Transmisión de esfuerzos por parte de la fibra (Marcos Garcia, 2015)

La transmisión de esfuerzos entre las fibras y la matriz en materiales compuestos se basa en varios mecanismos, como la adhesión, la fricción y el anclaje mecánico, siendo el arrancamiento progresivo de las fibras el proceso predominante que ocurre cuando la fibra se desliza fuera de la matriz antes de romperse (Zerbino, 2020). Este comportamiento es deseable, ya que las fibras están diseñadas para trabajar en un rango de resistencia que favorece su extracción de la matriz en lugar de su rotura, lo que optimiza el rendimiento del material con una cantidad mínima de fibras además de facilitar su incorporación y dispersión homogénea en la mezcla.

En este contexto, para que el proceso dominante sea el arrancamiento, su resistencia a tracción y capacidad de deformación deben ser superiores a las de la matriz, permitiendo que soporten mayores esfuerzos antes de la falla y que sigan tomando carga pos-fisuración.

Es importante destacar que, aunque la carga a la que se desarrolla la primera fisura no varía de manera sustancial, se puede observar un aumento en la capacidad residual del HRF, fenómeno el cual se traduce en una mejora de la tenacidad. Este incremento dependerá del tipo de fibras utilizadas, del material y de la dosis aplicada.

La Figura 1.4 ilustra el comportamiento tensión-deformación del hormigón convencional en comparación con diferentes HRF que presentan dosis variadas, evidenciando las ventajas que esta modificación aporta a la matriz del hormigón.

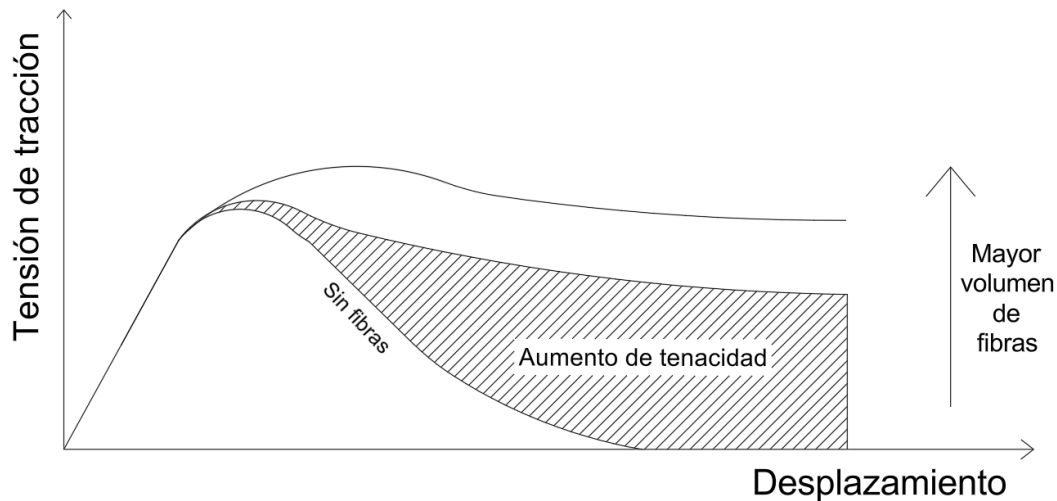


Fig. 1.4 - Aumento de tenacidad por parte de las fibras (Elaboración propia, 2024)

La valoración de la contribución de las fibras se realiza mediante ensayos de flexión, los cuales permiten evaluar el aumento de la capacidad residual del material; este enfoque es especialmente relevante porque, durante la flexión, el hormigón experimenta esfuerzos de tracción indirecta lo que facilita la evaluación del efecto de las fibras en la mejora de la resistencia a la fisuración y la absorción de energía. En consecuencia, las pruebas de flexión se consideran una herramienta integral para analizar el desempeño del HRF, ya que permiten capturar su capacidad para mantener la integridad estructural bajo condiciones de carga exigentes.

A comienzos del siglo XXI, se llevó a cabo un proyecto europeo con el objetivo de desarrollar un método estandarizado para realizar estos ensayos y obtener parámetros útiles para el diseño estructural del HRF (RILEM TC 162-TDF 2002a y 2002b) en este marco, el comité propuso el uso de un prisma de 150x150 mm de sección, con una entalladura de 25 mm de profundidad en el centro de la cara en tensión, cargado en el centro sobre un tramo de 500 mm entre apoyos. La ventaja de este enfoque es que la entalladura guía la fractura, evitando deformaciones no lineales significativas en el resto de la muestra y permitiendo que toda la energía disipada se atribuya a la propagación de la fisura. Además, este diseño facilita la evaluación de la tenacidad mediante la apertura de fisura conocida como CMOD (Crack Mouth Opening Displacement).

Hoy en día, existe un consenso generalizado en medir la capacidad post-pico en función de tensiones residuales, es decir, registrando cargas posteriores a la fisuración

para ciertas deflexiones o CMOD que se asocian con condiciones de servicio o estado límite último y a partir de estas mediciones se calcula la tensión de flexión asumiendo que toda la sección permanece intacta. Esta metodología fue formalizada en la norma EN 14651-2005 (Fig. 1.5) que establece el método recomendado por el fib Model Code 2010 (MC2010) para caracterizar el HRF. Aunque esta norma está dirigida específicamente a hormigones reforzados con fibras metálicas y mixtas, se utiliza ampliamente en investigaciones sobre el comportamiento de fibras sintéticas.

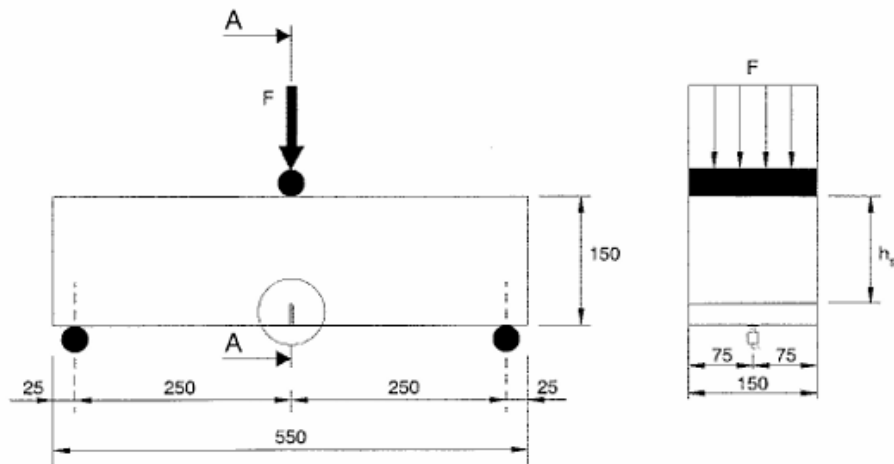


Fig. 1.5 - Aparato de ensayo. (EN 14651-2005)

Como resultado del ensayo, se obtiene la curva carga-apertura de fisura (CMOD) a partir de la cual se evalúa la resistencia residual del hormigón reforzado con fibras (Fig. 1.6)

La resistencia residual a flexión viene dada por la siguiente expresión:

$$f_{R,j} = \frac{3 F_j l}{2 b h_{sp}^2}$$

- $f_{R,j}$: resistencia residual a flexión correspondiente con $CMOD = CMOD_j$.
- F_j : carga correspondiente a $CMOD = CMOD_j$.
- l : longitud entre apoyos, en mm.
- b : ancho de la sección, en mm.
- h_{sp} : distancia entre el extremo de la fisura y la parte superior de la probeta.

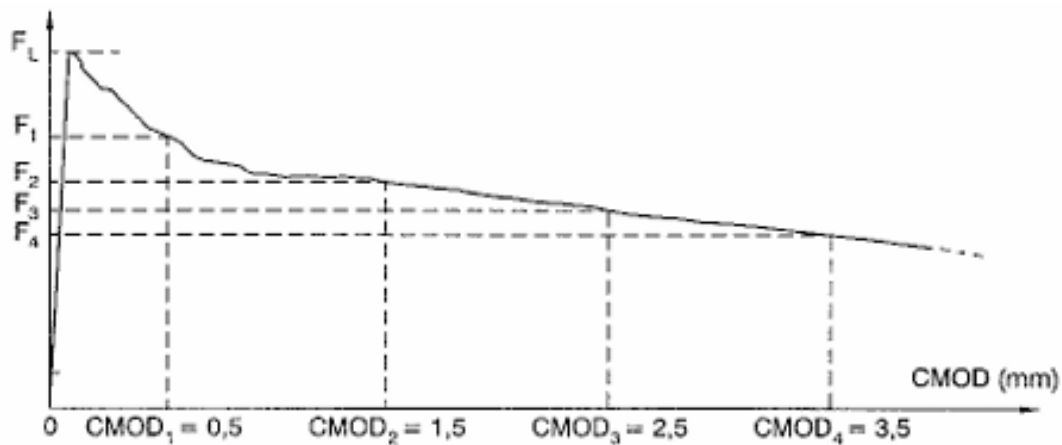


Fig. 1.6 - Curva carga - apertura de fisura (CMOD) - (EN 14651-2005)

Como se observa en la Figura 1.6, los valores de resistencia residual se determinan a partir de las distintas aperturas de fisura y las cargas correspondientes a cada medición. La carga de la primera fisura se define como la máxima registrada para una apertura inferior a 0,5 mm y si se desea transformar el diagrama carga-CMOD en un diagrama de carga-deformación se puede utilizar la siguiente expresión:

$$\delta = 0,85 * CMOD (mm) + 0,04.$$

Clasificación del HRF

El reglamento internacional fib Model Code 2010 (MC2010) presenta una propuesta interesante para la clasificación de los diferentes HRF basándose en las propiedades residuales que se obtienen del ensayo a flexión de la norma EN 14651 (2004). Según la norma europea, se calculan cuatro tensiones residuales para distintas aperturas de fisura, pero el reglamento MC2010 realiza una simplificación y clasifica basándose en sólo dos resistencias residuales (Fig. 1.7), f_{r1k} para un $CMOD = 0,5$ mm, y f_{r3k} para un $CMOD = 2,5$ mm que caracteriza el comportamiento del HRF en Estado Límite de Servicio (ELS) y en Estado Límite Último (ELU) respectivamente (Fig 1.7). La clasificación indica los siguientes valores para clase de servicio (f_{r1k}) 1 - 1,5 - 2 - 2,5 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 (MPa) y además, relaciones f_{3k}/f_{r1k} identificadas por las letras a, b, c, d, e:

- a si $0.5 \leq \frac{f_{R3k}}{f_{R1k}} \leq 0.7$
- b si $0.7 \leq \frac{f_{R3k}}{f_{R1k}} \leq 0.9$
- c si $0.9 \leq \frac{f_{R3k}}{f_{R1k}} \leq 1.1$
- d si $1.1 \leq \frac{f_{R3k}}{f_{R1k}} \leq 1.3$
- e si $1.3 \leq \frac{f_{R3k}}{f_{R1k}}$

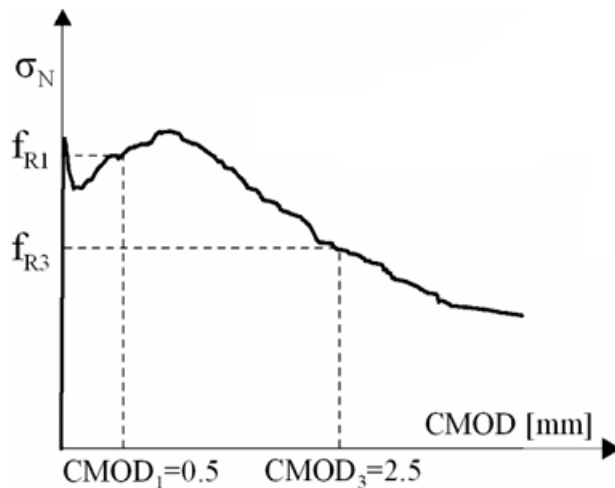


Fig. 1.7 - Curva tensión - CMOD (MC 2010)

En la figura 1.8 se presentan los resultados de ensayos realizados con **fibras de polipropileno** para distintas dosificaciones: 3 kg/m³, 6 kg/m³ y 10 kg/m³ (Blazy, J.; Drobiec, L., 2021) Se puede observar que el aumento en la dosificación de fibras otorga al hormigón una mayor resistencia postcrítica y tenacidad debido a que la cantidad de filamentos que atraviesa la fisura en formación incrementa con la dosis aplicada.

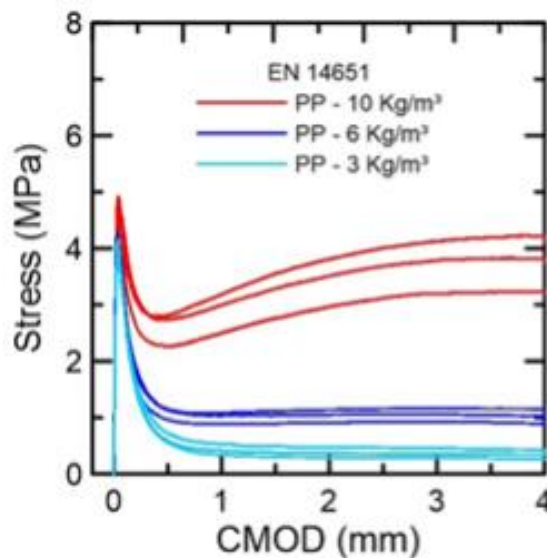


Fig. 1.8 - Resultados de ensayo según EN 14651 - (Blazy, J.; Drobiec, L., 2021)

Los ensayos realizados muestran una variación prácticamente nula en el módulo de elasticidad del hormigón además de un incremento muy bajo en la carga máxima que puede soportar a tracción, fenómeno que se puede dar en casos particulares para dosis muy altas de fibras.

La resistencia a compresión no se ve prácticamente modificada por la incorporación en un hormigón reforzado con fibras sintéticas (HRFS) con respecto a la resistencia de un hormigón convencional de similares características. Como se explicó anteriormente, las fibras comienzan a tener incidencia luego de la formación de la primera fisura, por lo tanto, en compresión, es lógico que su aporte no sea significativo.

En cuanto al rendimiento a cortante, considerando el comportamiento de las bielas de tracción, es razonable anticipar que el HRFS podría superar al de un hormigón convencional; no obstante y al compararlo con el refuerzo convencional de acero, es poco probable que se observe un aumento significativo en la resistencia ya que las fibras poliméricas no logran igualar las propiedades mecánicas del acero.

Por otro lado, a diferencia de las armaduras tradicionales que comienzan a actuar únicamente una vez que se produce la fisuración del hormigón, las fibras juegan un papel importante al reducir el período inicial de fisuración; este efecto no solo mejora el comportamiento en servicio de las estructuras, sino que permite considerar una disminución en el porcentaje de acero utilizado. Así, se abre la posibilidad de competir en términos de costos y ahorro constructivo, haciendo del hormigón reforzado con fibras una alternativa viable en el diseño de estructuras.

Características de las fibras

Las fibras sintéticas se han convertido en una opción popular para reforzar materiales cementosos, debido a su costo accesible y eficacia, lo que las vuelve una alternativa viable frente a las fibras de acero y vidrio (Zheng & Feldman, 1995). Entre las más utilizadas se encuentran las fibras de polipropileno (PP), polietileno (PE), acrílicos (PAN) y poliéster (PES) que presentan propiedades variadas, especialmente en cuanto al módulo de elasticidad, propiedad importante para su desempeño en compuestos cementosos. En este contexto, aunque un mayor módulo de elasticidad facilita el refuerzo, investigaciones han demostrado que incluso las fibras de bajo módulo, como las de polipropileno, pueden mejorar características como la deformación, tenacidad, resistencia al impacto y control de fisuración, propiedades que en muchos casos, son más relevantes que un pequeño aumento en la resistencia a tracción (ACI Committee 544, 2010).

Las fibras sintéticas se dividen en dos categorías principales: micro y macro. Las **microfibras** (Fig. 1.9) se utilizan en dosis bajas (alrededor del 0,2% del volumen de hormigón o 0,6 kg/m³) y están diseñadas para mejorar la cohesión del hormigón fresco, evitando fisuras por contracción plástica que aunque no ofrecen refuerzo estructural significativo para fisuras térmicas o por secado, son útiles para prevenir el desmoronamiento del hormigón y protegerlo pasivamente contra incendios (Liu et al., 2008). En cambio, las **macrofibras** (Fig. 1.10), con dosis más altas (de 0,2% a 1% en volumen, o entre 2 y 12 kg/m³), tienen un mayor tamaño y módulo de elasticidad, lo que las hace efectivas para controlar las fisuras en el hormigón endurecido donde gracias a su mayor resistencia a la tracción y rigidez, son más eficaces para reforzar el hormigón (Zerbino, 2010).



Fig. 1.9 - Microfibras sintéticas (Polyfibers)



Fig. 1.10 - Macrofibras sintéticas. (Gexim)

El polipropileno (PP) se destaca como una de las fibras sintéticas más utilizadas en la industria del hormigón, gracias a su versatilidad y propiedades. En primer lugar, es químicamente inerte y estable en el entorno alcalino del hormigón, lo que previene reacciones adversas con los compuestos del cemento y en consecuencia garantiza una mayor durabilidad a largo plazo; posee carácter hidrófobo lo que implica que no absorbe agua evitando el deterioro en condiciones de humedad o congelación y además, proporcionan mayor resistencia al fuego durante un incendio dado que al fundirse en el hormigón crean canales capilares que permiten la liberación controlada del vapor de agua producido por el calor, reduciendo la presión interna y evitando así fracturas repentinas del material (Manual SikaFiber, 2014). Por otro lado, la fácil

integración de las fibras de polipropileno en las mezclas de hormigón no solo facilita su manejo, sino que también contribuye a la reducción de costos.

A pesar de las ventajas nombradas anteriormente, las fibras de acero siguen siendo las más utilizadas en la industria de la construcción (ACI Committee 544, 2010) Por ello, se mencionan las principales diferencias entre ambos tipos, ya que el objetivo principal de este trabajo es fundamentar la utilización de las fibras de polipropileno; dicha comparación se presenta en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 - Comparación entre distintos materiales de fibras (según el proveedor MAPEI).

Característica	Fibras de polipropileno	Fibras de acero
Módulo de elasticidad	3,9 GPa	200 GPa
Resistencia a la tracción	0,45 GPa	1,10 GPa
Diámetro	0,80 mm	0,85 mm
Longitud	42 mm	50 mm
Dosis	1-5 kg/m ³	>20 kg/m ³

Si bien las fibras de acero presentan propiedades mecánicas superiores, su función principal no es aumentar la resistencia del hormigón, sino su desempeño en servicio y reducir los efectos de la fisuración. Así, aunque las fibras de acero son robustas, no están diseñadas para incrementar significativamente la resistencia estructural del hormigón. Por otro lado, en términos de propiedades geométricas, ambos tipos de fibras presentan dimensiones similares; esta semejanza sugiere que ambas pueden desempeñar funciones comparables en el control de la fisuración del hormigón.

Comportamiento en servicio del HRF

Una de las principales ventajas del uso de macrofibras sintéticas como refuerzo en el hormigón es su distribución uniforme dentro de la matriz, a diferencia de las barras de acero cuyo posicionamiento es puntual. Esta distribución mejora la transferencia de fuerzas a través de las fisuras, reduciendo la intensidad de la discontinuidad mecánica y la tensión en la interfaz; característica que se vuelve especialmente relevante en el estado límite de servicio (ELS) donde las fibras gracias

a su capacidad para transferir esfuerzos, generan fisuras más estrechas y menos espaciadas que las que se forman en el hormigón armado.

Como resultado, se logra un aumento de la rigidez y una menor deformación estructural, lo que favorece el rendimiento a largo plazo de las estructuras. En este sentido, Meda et al. (2019) analiza cómo la inclusión de fibras poliméricas disminuye la flecha en servicio. Por otro lado, también ejercen una acción de costura sobre las juntas de contracción y los daños reflejos, lo que contribuye a incrementar la vida en servicio de las estructuras.

Durabilidad del HRF

La durabilidad del HRF influye en la seguridad y funcionalidad de las estructuras y para evaluarla adecuadamente se analiza tanto el envejecimiento de las fibras como su comportamiento frente al deterioro del hormigón.

El envejecimiento se refiere a los cambios en las propiedades de las fibras provocados por diversas condiciones ambientales, lo que puede comprometer la capacidad portante de los elementos estructurales, especialmente en aquellos que dependen exclusivamente de las fibras como refuerzo. En este sentido, un estudio de ACI 244.5R (2010) indica que las fibras poliméricas son más susceptibles al envejecimiento en comparación con las metálicas que están protegidas por el entorno alcalino del hormigón. Además, las fibras de polipropileno presentan un comportamiento viscoelástico, lo que puede resultar en fluencia cuando están sometidas a tensiones prolongadas (ASM International, 1988) sin embargo, dado que las concentraciones de fibras en el hormigón son generalmente bajas, oscilando entre el 0,1% y el 1% en volumen, su impacto es mínimo tanto en la fluencia del hormigón bajo compresión como en el envejecimiento, asegurando así la integridad estructural a lo largo del tiempo.

La permeabilidad del hormigón se ve afectada por la presencia de fisuras; en este contexto, investigaciones de Bentur y Mindess (1990) y Mindess et al. (2003) han demostrado que el hormigón reforzado con fibras es efectivo en aplicaciones que requieren impermeabilidad; así, el refuerzo con fibras no solo mejora la resistencia al crecimiento de grietas sino que puede aumentar la rugosidad superficial y favorecer la ramificación de las mismas. Para evaluar el impacto directo de las fibras en la

durabilidad, Sanjuán et al. (1997) realizaron experimentos con fibras de polipropileno en estructuras con refuerzo de acero, encontrando que las matrices reforzadas mostraron menos agrietamiento y tasas de corrosión más bajas al ser expuestas a condiciones severas; estos resultados indican que las fibras son efectivas para mitigar los mecanismos de deterioro relacionados con la permeabilidad.

Por otro lado, las fibras poliméricas no presentan problemas de corrosión y no se han reportado incidentes significativos de degradación de las mismas en el medio alcalino del hormigón (Concrete Society, 2007) sin embargo, pueden degradarse si el HRFS se expone a temperaturas elevadas que superen el punto de fusión de las fibras, lo que podría llevar a su desaparición, pero este fenómeno favorece su comportamiento frente al fuego asegurando la integridad estructural del hormigón.

Comportamiento en estado fresco

El comportamiento del hormigón reforzado con fibras en estado fresco presenta características que alteran sus propiedades. Según Zerbino (2020) las fibras modifican la cohesión del hormigón y afectan los parámetros de exudación, generando un efecto cohesivo que retiene el agua cerca de la superficie, lo que retrasa la evaporación y favorece la hidratación del cemento, resultando en una mezcla más homogénea que estabiliza el movimiento de las partículas sólidas; como consecuencia, disminuye la velocidad de exudación y el asentamiento plástico.

Las macrofibras no solo aportan capacidad residual al hormigón en estado endurecido, sino que pueden ayudar a reducir fisuras en estado plástico, controlando su formación debido a la contracción por secado; en este contexto, un estudio comparativo realizado por Mora et al. (2011) indicó que tanto las fibras de acero como las de polipropileno pueden disminuir el ancho de fisuras en estado fresco en aproximadamente un 50%.

En cuanto a la dosificación, si bien se ha observado que las propiedades mecánicas del hormigón incrementan con dosis más altas de fibras, hay que considerar que el volumen que se puede incorporar depende del tamaño máximo del agregado utilizado; a medida que el tamaño del agregado aumenta, el volumen de la matriz se ve reducido, lo que limita el espacio disponible para las fibras. Generalmente, la dosis adecuada de fibras oscila entre el 0,5% y el 1% del volumen de hormigón.

La incorporación se realiza prestando atención en la planta dosificadora para lograr una distribución uniforme en la mezcla; en lugar de añadir las fibras abruptamente, es preferible integrarlas de manera gradual. No es necesario utilizar cantidades excesivas de fibras, una dosis adecuada dentro del rango mencionado es suficiente para obtener los beneficios deseados en el rendimiento del hormigón porque si se superan los porcentajes mencionados, se pueden generar problemas de segregación y pérdida de trabajabilidad. En este sentido, la razón agua/cemento suele oscilar entre 0,3-0,5 y para mantener estas relaciones en el HRF se debe recurrir al uso de aditivos reductores de agua.

Por otro lado, las fibras requieren espacio para acomodarse en la masa del hormigón; si se realiza un deficiente mezclado o se incorporan de manera abrupta es probable que se produzca la formación de fibras concentradas “erizos” (Fig. 1.11).



Fig. 1.11 - Formación de “erizos” en la mezcla (Elaboración propia, 2024)

Una pequeña cantidad de “erizos” en el hormigón no afecta prácticamente a su comportamiento en estado endurecido y en muchas ocasiones basta con detectarlos en la mezcla y retirarlos fácilmente; sin embargo, si hay gran cantidad, el hormigón no alcanzará las prestaciones pretendidas.

En caso de que el hormigón sea bombeado (Fig. 1.11) estas formaciones suponen

un problema serio ya que luego del proceso de hormigonado pueden quedar atrapadas dentro de la manguera de la bomba; este problema se soluciona simplemente realizando una limpieza de la bomba y de la manguera luego de terminado el proceso para impedir que afecte a futuros usos de la máquina.

En la elaboración, manejo en obra y control de calidad (Fig. 1.12 y 1.13) en estado fresco del HRF deben respetarse las buenas prácticas establecidas para el hormigón convencional (ACI 544.3R 1993).



Fig. 1.12 - Equipo de bombeo utilizado
(Hormigones Melmix)



Fig. 1.13 - Medición del asentamiento por el cono de Abrams. (Hormigones Melmix)

CAPÍTULO

2

*Aplicación del HRFS en la capa de
compresión de losas de viguetas pretensadas*

Sobre las losas de viguetas pretensadas

El sistema de losa representa una solución constructiva que combina viguetas de hormigón pretensadas con bovedillas y una capa de hormigón de pequeño espesor. Este método es ampliamente valorado en la construcción por su bajo peso propio y su facilidad de armado, lo cual no solo simplifica el proceso constructivo, sino que también contribuye a reducir significativamente los costos frente a una losa convencional.

El mismo ofrece ventajas en términos de rapidez de montaje, eficiencia estructural y versatilidad de diseño y además, al utilizar viguetas pretensadas, el sistema puede soportar mayores cargas con menor deformación lo que se traduce en una estructura más resistente y duradera. Por otro lado, la ligereza del sistema de bovedillas permite construir losas con menos material sin comprometer la seguridad, optimizando así el uso de los recursos y el tiempo de construcción.

La vigueta es un elemento prefabricado de hormigón pretensado, que forma parte de la estructura resistente de la losa, la misma presenta una sección transversal en forma de "T" invertida cuya función es absorber los esfuerzos de tracción generados por las cargas actuantes. Respecto a su fabricación, la misma responde a estrictos controles de calidad tanto para el hormigón (H35 s/cirsoc 201-2005), el acero de pretensado (normas IRAM - IAS U500-07) y los procesos de tesado, moldeado, curado con vapor, corte, acopio y despacho.

Las bovedillas o bloques de relleno son elementos aligerantes del sistema y pueden ser de diversos materiales: cerámicos, cemento o poliestireno, estas se apoyan directamente sobre las viguetas y aportan a la losa aislamiento térmico y acústico y reducción de peso (proporcional al material con el que están fabricados) pero no cumplen funciones específicas de resistencia dentro del paquete estructural.

La capa de compresión es el espesor de hormigón que se coloca sobre las viguetas y las bovedillas; su espesor varía desde un mínimo de 4 cm hasta 6 cm y como su nombre lo indica, toma los esfuerzos de compresión generados por las cargas actuantes, este hormigón debe tener al menos una resistencia específica de 17 Mpa.

En la práctica habitual de construcción es común incorporar una malla electrosoldada como armadura de repartición dentro de la capa de compresión (Fig. 2.1); esta malla cumple dos funciones: distribuir uniformemente las cargas y prevenir la aparición de fisuras actuando como una barrera de contención para las tensiones internas y aumentando la resistencia de la losa ante los movimientos o deformaciones que podrían generarse en el proceso de fraguado ante variaciones térmicas.

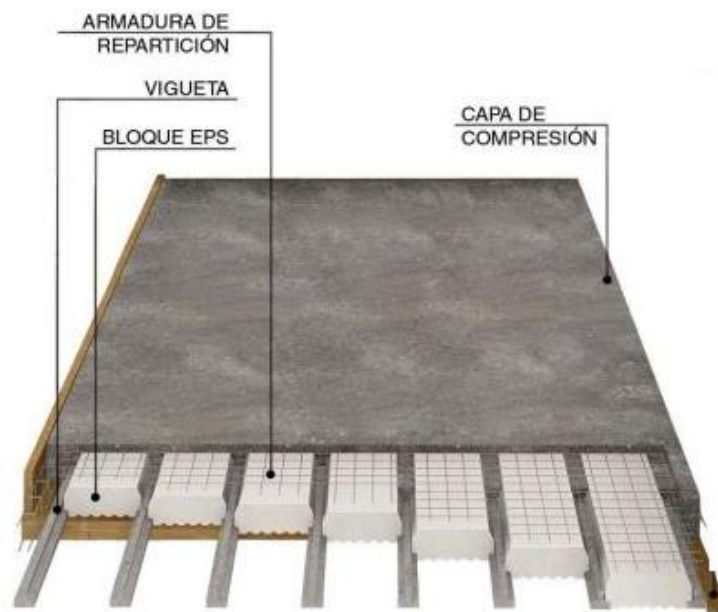


Fig. 2.1 - Sistema constructivo de la losa (Fuente: Tecnopor).

El sistema compuesto trabaja en una dirección donde las cargas se transmiten perpendicular a la longitud de las viguetas y como las mismas conforman el recubrimiento de la armadura principal se colocan en la dirección corta donde se producen los momentos mayores. En la actualidad, existen configuraciones de viguetas en dos direcciones, sin embargo, este documento no lo abordará.

Incorporación de las fibras en la capa de compresión

En el presente estudio, se propone el reemplazo de la malla electrosoldada por fibras sintéticas con el objetivo de optimizar los costos asociados al material y al montaje del sistema y mejorar ciertas propiedades mecánicas, como la resistencia a la fisuración y la durabilidad del hormigón. En este caso, como reemplazo de la armadura de repartición, se propone la colocación de macrofibras sintéticas las cuales se distribuyen en el hormigón de manera homogénea (Fig. 2.2).

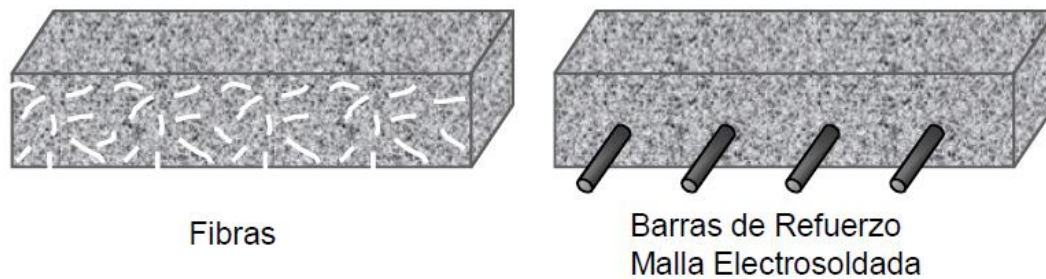


Fig. 2.2 - Comparación de refuerzos en capa de compresión (Euclid Chemical).

El uso de malla electrosoldada implica costos elevados tanto en materiales como en mano de obra ya que el acero es un recurso costoso y su correcta colocación requiere personal capacitado en obra.

En algunas ocasiones la malla suele instalarse incorrectamente sobre el elemento de relleno por soportes inadecuados o porque los trabajadores pisan sobre ella durante el proceso de construcción, lo que compromete su efectividad en la prevención de fisuras y en la distribución de cargas. En este sentido las fibras representan una alternativa interesante ya que se distribuyen homogéneamente en la masa de hormigón reforzando de manera uniforme el conjunto en lugar de concentrarse en una ubicación específica.

Según Bina y Teixeira (2002) dentro de las ventajas que presenta el sistema constructivo con fibras, se destacan las siguientes:

- *Eliminación de la etapa de colocación de armaduras*: disminución de la mano de obra, el tiempo de montaje y el uso de insumos (como mallas soldadas, espaciadores, barras de transferencia y soportes).
- *Optimización del espacio en obra y almacenamiento de materiales*: se reduce la cantidad de herramientas y materias primas necesarias para el montaje de armaduras, lo cual optimiza el uso del espacio en el sitio de construcción.
- *Simplificación del proceso de colado*: se facilita el acceso de los equipos de vertido en las áreas a hormigonar y al no haber armaduras, se simplifica la vibración del hormigón.
- *Reducción del riesgo de patologías por corrosión*: se minimizan problemas de corrosión al eliminar la malla colocada en la capa de compresión y disminuir la fisuración.

El tamaño de las macrofibras a utilizar y sus separaciones puede no alcanzar a desviar o modificar el comportamiento de las micro grietas generadas en el estado plástico; sin embargo, como fue mencionado en el *Capítulo 1 - Comportamiento en estado fresco*, al incorporar macrofibras se afectan los parámetros de exudación generando un efecto cohesivo que retiene el agua cerca de la superficie lo que retrasa la evaporación disminuyendo los efectos de retracción; además Kakooei (2012) recomienda en el caso del hormigón convencional utilizar fibras, particularmente sintéticas, como método más efectivo y aceptable para prevenir la formación de fisuras causadas por la retracción.

Du Plessis (2015) realizó estudios para evaluar los efectos de las macrofibras sintéticas en losas y los resultados demostraron ventajas significativas en el control del tamaño y la extensión de las fisuras, al mejorar la capacidad del material para distribuir los esfuerzos de manera más uniforme. En particular, se observó que la incorporación de macrofibras permitió un aumento en el espaciamiento entre juntas, lo que llevó a una mayor cantidad de fisuras, pero de menor tamaño. Este comportamiento es beneficioso ya que las fisuras más finas contribuyen a mejorar la durabilidad de la losa, al reducir la permeabilidad y limitar la penetración de agentes externos que puedan acelerar el deterioro del hormigón.

Comportamiento al corte

En las losas, los esfuerzos de corte suelen ser relativamente bajos en comparación con las solicitaciones por flexión; sin embargo en zonas cercanas a los apoyos o donde se concentran cargas puntuales, el esfuerzo de corte puede incrementarse significativamente, lo que hace necesario evaluar su comportamiento para asegurar la integridad estructural.

En el caso de losas con viguetas pretensadas, la resistencia al corte se cubre principalmente por la capacidad del hormigón para resistir el corte vertical. Bajo las condiciones de carga de servicio, cuando el hormigón aún no está fisurado, se puede asumir que la relación entre tensiones y deformaciones sigue una ley lineal.

En este estado la sección trabaja en su mayoría de forma comprimida o débilmente traccionada, donde en las zonas sometidas a corte las tensiones tangenciales a lo largo del alma siguen una distribución parabólica con un máximo en el centro de gravedad de la sección, el cual para el caso de la losa de viguetas pretensadas se ubica sobre el nervio del HRF (Fig. 2.3) por lo que la resistencia principal a cortante será proporcionada por el mismo.

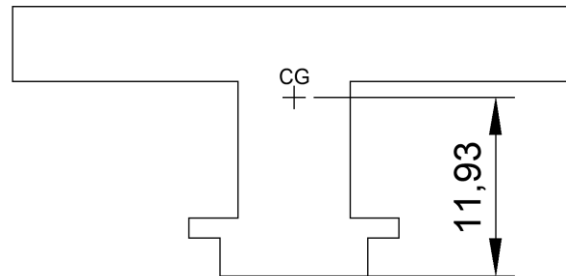


Fig. 2.3 Centro de gravedad sección homogeneizada

Cuando la sección se fisura, el aporte al esfuerzo de corte proviene principalmente de la zona comprimida, las diagonales fisuradas y el efecto pasador de la armadura longitudinal a tracción; es por esto que, la determinación del esfuerzo de corte último (V_c) se realiza considerando el punto en el que el hormigón fisura debido a tracción, lo cual ocurre cuando la tensión de flexotracción en la fibra inferior supera el valor crítico o cuando la tracción en el alma alcanza su valor máximo en zonas de alta sollicitación de corte y bajo momento flector.

Este fenómeno es especialmente relevante en elementos pretensados ya que la pretensión impide la descompresión de la fibra inferior; así, en ciertos casos, la fisuración se inicia antes en el alma del forjado debido a las tensiones de tracción generadas por el esfuerzo cortante combinado con el momento flector.

Para evaluar el rendimiento del HRF frente a esfuerzos cortantes, Roshdestwensky y Zerbino (2022) estudiaron el caso de macrofibras sintéticas con una dosificación de 3 kg/m^3 en vigas de hormigón armado. Los resultados experimentales demostraron que la incorporación produjo un aumento en la resistencia al corte promedio de 21% y se observó una disminución de los anchos de fisuras promedio de 33%, lo que indica un aporte significativo por parte de las fibras al corte. Considerando

este aumento de resistencia, es razonable esperar un incremento en la capacidad de las losas, especialmente en situaciones donde la fisuración se inicia primero en el alma.

En este trabajo, no se evaluará la capacidad cortante; sin embargo, se sugiere que futuras investigaciones consideren su influencia.

Consideraciones reglamentarias para losas de viguetas pretensadas

El Reglamento **CIRSOC 201/2005** aborda las losas de viguetas pretensadas en el capítulo 9.5.5 - *Construcción en etapas*. Este capítulo se aplica a elementos solicitados a flexión construidos en etapas, ya sean prefabricados u hormigonados in situ, donde se destaca lo siguiente:

1. Se permite tratar estos elementos como monolíticos para el cálculo de flechas, lo que indica un comportamiento estructural similar al de una losa convencional.
2. No se distingue entre elementos apuntalados y no apuntalados en el proceso constructivo y los mismos deben dimensionarse para resistir las cargas en todas las etapas, antes de alcanzar la resistencia de diseño.
3. Se debe controlar la fisuración y evitar separación entre los elementos.

No especifica la contribución de la malla de refuerzo en el cálculo de las losas de viguetas pretensadas porque su aporte a la resistencia estructural no se considera un requisito formal, sin embargo sí aplica requisitos para controlar la fisuración; de esta manera, existe una cierta flexibilidad en el diseño reglamentario que permite considerar alternativas de utilización de refuerzos como fibras de polipropileno, que como se ha dicho anteriormente, pueden proporcionar un control efectivo de fisuras y contribuir a la repartición de esfuerzos.

Por otro lado, la norma **EN 15037**, en la sección B.2.2 “*With non-resisting blocks*”, regula la colocación de malla electrosoldada en la capa de compresión para cargas superiores a $2,5 \text{ kN/m}^2$, exigiendo un área de sección transversal de $0,5 \text{ cm}^2/\text{m}$; además establece que si la carga no excede $2,5 \text{ kN/m}^2$ y la luz de la losa se mantiene hasta 6 metros se permite reemplazar la malla por fibras de refuerzo, como las de polipropileno. Esta disposición introduce una connotación reglamentaria que valida

la posibilidad de reemplazo, lo que puede ser fundamental para su implementación en Argentina, donde actualmente no se han descrito normativas al respecto.

El **Fib Model Code/2010** (MC2010) establece que las fibras pueden sustituir total o parcialmente las barras de refuerzo en el estado límite último (ELU), siempre que se cumplan las condiciones de resistencia residual obtenidas del ensayo EN 14651 (detallado en el Capítulo 1) específicamente que: $fR1k/fLk \geq 0,4$ y $fR3k/fR1k \geq 0,5$ donde fLk representa el valor característico de la resistencia del primer pico del ensayo; $fR1k$ y $fR3k$ las tensiones que producen una apertura de fisura de 0,5 y 2,5 mm respectivamente. Además el MC2010 señala que el refuerzo con fibras es adecuado para estructuras como las losas, que presentan zonas de difusión de esfuerzos y dado que es el único documento que regula el uso de fibras como aporte estructural sin especificar el material, se realizarán cálculos basados en los conceptos descritos para evaluar la propuesta en función de los ensayos.

Dosificación de fibras

En este trabajo, la dosificación de fibras seleccionada para la capa de compresión para un hormigón con resistencia característica de 20 MPa (H20) es de 3 kg/m³ cuyo valor se fundamenta en lo descrito en el *Capítulo 1 - Comportamiento del HRF en estado fresco*: aumentar la dosis podría mejorar el comportamiento post-fisuración aunque requeriría ajustes en la relación agua/cemento para mantener la trabajabilidad y además, una dosis menor no supone un refuerzo deseable.

A fin de caracterizar el HRF según lo establecido por el MC2010, se elaboraron 6 probetas prismáticas (Fig. 2.4), las cuales fueron enviadas al *Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica* (LEMIT) donde se realizaron los ensayos para el HRF utilizado en la capa de compresión, cuyos resultados se pueden observar en la figura 2.5 junto a las relaciones mencionadas anteriormente.



Fig. 2.4 Probetas prismáticas
(Elaboración propia, 2024)

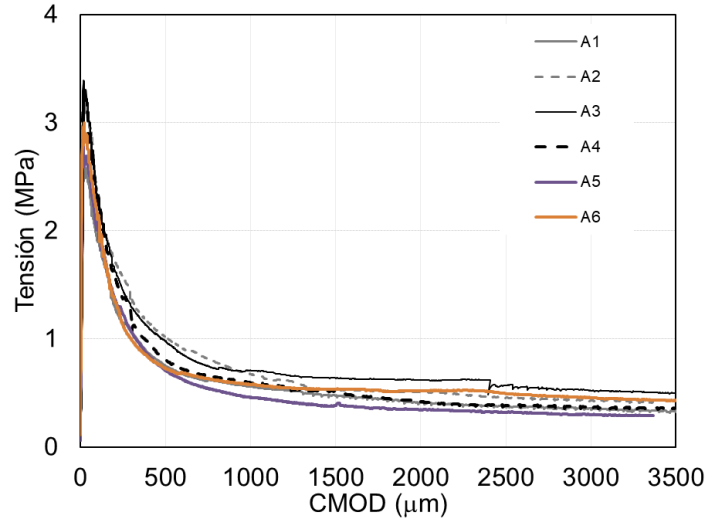


Fig. 2.5 Curva tensión - CMOD (LEMIT) H₂O - 3 kg/m³

Clasificación: HRF clase 0,5 - a

A continuación se analiza según lo mencionado en el apartado anterior, las relaciones entre tensiones residuales y máximas alcanzadas.

$$\begin{aligned} f_{R1k}/f_{Lk} &= 0,27 < 0,4 \\ f_{R3k}/f_{R1k} &= 0,41 < 0,5 \end{aligned}$$

(Resultados promediados de 5
probetas prismáticas ensayadas)

Se observa que las dosis de fibras adoptadas no cumplen con lo requerido para reemplazar en su totalidad o parcialmente a la armadura; sin embargo la propuesta no consiste en reemplazar la armadura resistente a tracción (proporcionada por el refuerzo de las viguetas) y considerando que los esfuerzos de tracción presentes en la capa de compresión por efecto Poisson son insignificantes dada la geometría y la posibilidad de distribución de tensiones bidimensional, se mantiene la dosis de 3 kg/m³ para reemplazar la malla.

A continuación, se presentan los ensayos para medir el control de calidad y las resistencias alcanzadas del HRF frente al convencional.

1. Control de calidad

Como criterio de recepción del hormigón se llevaron a cabo ensayos en estado fresco para el hormigón convencional y para el HRF. En primera instancia, mediante el ajuste mínimo de la dosis de aditivo superfluidificante en obra para la consistencia

de trabajo deseada se obtuvo el mismo asentamiento (18cm) a través del ensayo de Cono de Abrams (Fig. 2.6).



Fig. 2.6 - Medición del asentamiento. Izq: Hormigón sin refuerzo, Der: HRF - (Elab. propia, 2024).

Se realizó el control de temperatura del hormigón según lo establecido en el reglamento CIRSOC 201-2005; el mismo exige que en estado fresco la temperatura del hormigón inmediatamente después de su colocación y compactación no supere los 30°C.

En este caso, la temperatura de ambos hormigones fue de 24,5°C, cumpliendo con los requisitos establecidos y encontrándose en buenas condiciones (Fig. 2.7).



Fig. 2.7- Medición de la temperatura

2. Ensayos de compresión uniaxial (IRAM 1546-2013)

Para evaluar la resistencia a compresión del hormigón se ensayaron probetas a 2, 7, 28 y 35 días, según el ensayo descrito por la norma IRAM 1546-2013; los resultados se adjuntan en la tabla 2.1 para el caso del hormigón convencional, y en la tabla 2.2 para el hormigón con fibras.

Tabla 2.1 - Resultados de ensayo de rotura a compresión del producto H20. (Melmix, 2024)

Hormigón	Edad (días)	Diametro (mm)	Tension de rotura individual (MPa)	Tension de rotura (MPa)
H20	2	150	2,5	2,5
	7	100	14,4	14,2
			13,9	
	28	100	20	20
			20	
35	100	20	20	

Tabla 2.2 - Resultados de ensayo de rotura a compresión del producto H20 + 3 kg/m³ MACROFIBRA 0,6mm NTH. (Melmix, 2024)

Hormigón	Edad (días)	Diametro (mm)	Tension de rotura individual (MPa)	Tension de rotura (MPa)
H20 + 3kg/m ³ Macrofibras sintéticas	2	150	2,5	2,5
	7	100	11,8	12,4
			12,9	
	28	100	19,5	19,5
			19,5	
35	100	20	20	

Según los resultados obtenidos, se observa que la resistencia a compresión no se modifica sustancialmente con la presencia de fibras siguiendo lo descrito en *Capítulo 1 - Comportamiento mecánico*. Aún así, existe una diferencia en el modo de falla ya que el desprendimiento del hormigón con fibras fue mucho menor (Fig. 2.8).



Fig. 2.8 - Modo de falla de HRF
(Elaboración propia, 2024)

3. Ensayo de rotura a tracción por flexión (IRAM 1547-1992)

El ensayo de rotura a tracción por flexión se lleva a cabo siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 1547-1992. Los resultados a la edad de 28 días de las probetas se adjuntan en la tabla 2.3 para el caso del hormigón convencional y en la tabla 2.4 para el caso de hormigón con fibras.

Tabla 2.3 - Resultados de ensayo de rotura a tracción por flexión del producto H20. (Melmix, 2024)

Hormigón	Edad (días)	L (cm)	b (cm)	h (cm)	Tension de rotura individual (kg/cm ²)	Tension de rotura (kg/cm ²)	Tension de rotura* (kg/cm ²)
H20	28	45	15	15	44,3	39,9	43,7
		45	15	15	43		
		45	15	15	32,4		

Tabla 2.4 - Resultados de ensayo de rotura a tracción por flexión del producto H20 + 3kg/m³ MACROFIBRA 0,6mm NTH. (Melmix, 2024)

Hormigón	Edad (días)	L (cm)	b (cm)	h (cm)	Tension de rotura individual (kg/cm ²)	Tension de rotura (kg/cm ²)
H20 + 3kg/m ³ Macrofibras sintéticas	28	45	15	15	41,8	43,9
		45	15	15	46,8	
		45	15	15	43	

A partir de los resultados del ensayo a flexión, se observa que la incorporación de fibras incrementó la carga última en 10%. Sin embargo, este aumento se atribuye a que la tercera probeta con hormigón convencional presentó resultados anormalmente bajos, posiblemente debido a una mala confección. Desechando la muestra defectuosa se cuentan con las mismas tensiones promedio para ambos hormigones.

Como se explicó en el *Capítulo 1 - El hormigón reforzado con fibras*, se espera que la resistencia última a flexión no varíe, ya que el aporte de las fibras se manifiesta principalmente en el período post-fisuración, el cual no se evalúa en este ensayo.

4. Ensayo de rotura a tracción por compresión diametral (IRAM 1568-1995)

Se realizó el ensayo de rotura a tracción por compresión diametral según la norma IRAM 1658-1995 para ambos hormigones, los resultados se observan en la tabla 2.5 para el caso del hormigón convencional y en la tabla 2.6 para el caso del hormigón con fibras.

Se puede apreciar que la carga última a tracción aumenta solo en 5%, por lo que no se ve prácticamente afectada por la presencia de las fibras.

Tabla 2.5 - Resultados de ensayo de rotura a tracción por compresión diametral del producto H20. (Melmix, 2024)

Hormigón	Edad (días)	Diámetro (mm)	L (mm)	Tension de rotura individual (MPa)	Tension de rotura (MPa)
H20	28	150	140	1,36	1,33
		150	140	1,3	

Tabla 2.6 - Resultados de ensayo de rotura a tracción por compresión diametral del producto H20 + 3kg/m³ MACROFIBRA 0,6mm NTH. (Melmix, 2024)

Hormigón	Edad (días)	Diámetro (mm)	L (mm)	Tension de rotura individual (MPa)	Tension de rotura (MPa)
H20 + 3kg/m ³ Macrofibras	28	150	140	1,49	1,37
		150	140	1,24	

Programa experimental (IRAM 11555 - 1996)

El objetivo del programa experimental es evaluar si la incorporación de fibras de polipropileno en la capa de compresión puede sustituir la malla de refuerzo. Los ensayos se llevarán a cabo siguiendo la norma IRAM 11555 (1996), este reglamento detalla la disposición de la losa como se muestra en la figura 2.9.

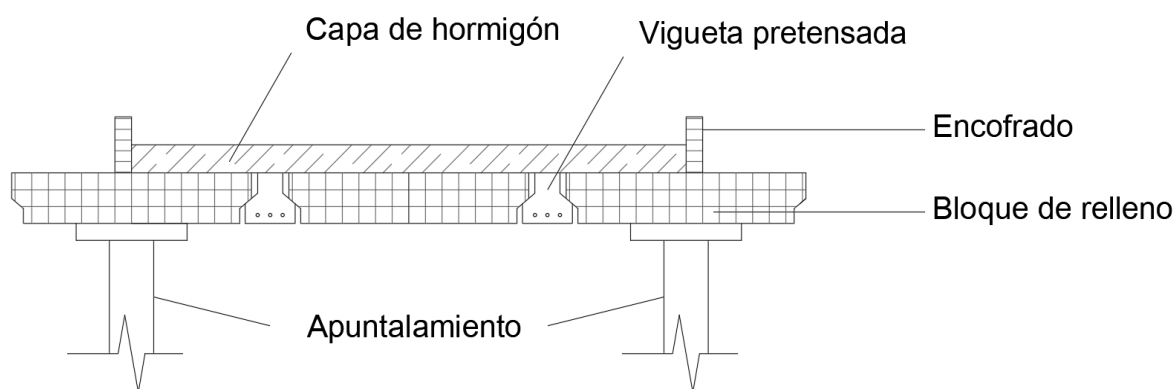


Fig. 2.9 - Sección del forjado (Adaptado de IRAM 11555)

Las losas ensayadas tienen un espesor total de 18 centímetros, compuesto por una capa de compresión de 5 cm, viguetas pretensadas de 9 cm y bovedillas de poliestireno expandido de 13 cm (Fig. 2.10); las viguetas seleccionadas presentan una resistencia característica de 35 MPa con 3 cordones de acero C1950 RN de

dimensiones 2x2,25 mm (Fig. 2.11); la capa de compresión está diseñada para alcanzar una resistencia de 20 Mpa y la dosificación del hormigón utilizado se encuentra en detalle en el *Anexo A*.

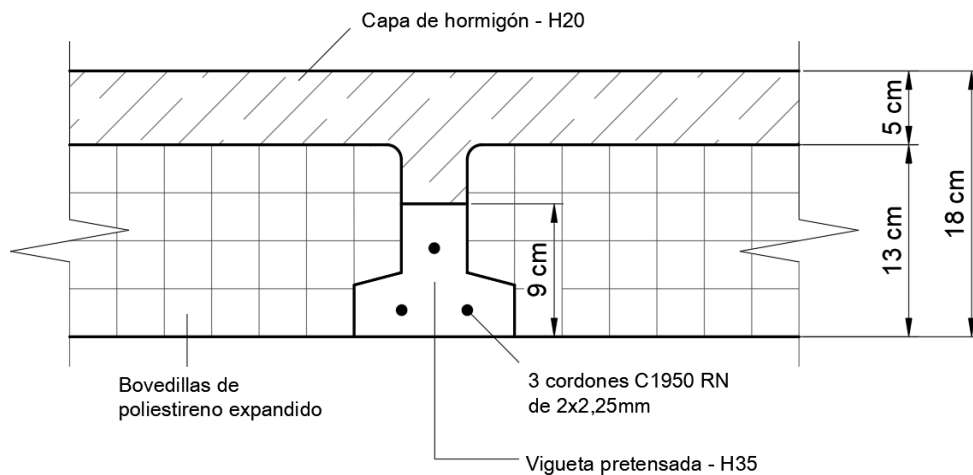


Fig. 2.10 - Características del forjado (*Elaboración propia, 2024*)

Se realizaron dos forjados variando el material utilizado para el refuerzo en la distribución de cargas. En el primero se empleó malla electrosoldada de 6 mm de diámetro y separación de 15 cm (Fig. 2.12) y en el segundo se incorporaron fibras de polipropileno (Fig. 2.13) con una dosificación de 3 kg/m³ mezcladas en el hormigón fresco; las características de las fibras utilizadas se detallan en la tabla 2.7.



Fig. 2.11 Viguetas. Empresa Viguetec: Serie 1.

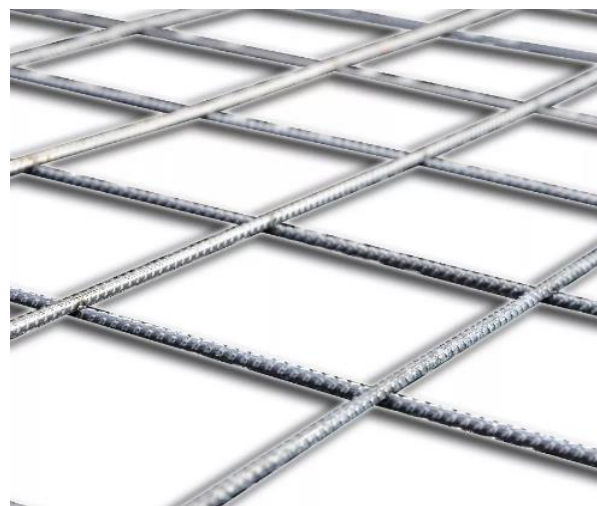


Fig. 2.12 Malla Sima Hierro Acindar.

Tabla 2.7 - Propiedades macrofibras corrugadas de Niceza y Taverna Hnos S.A.

Diámetro (μm)	600 μm
Longitud (mm)	50 ± 10mm
Materia prima	Copolímero de polipropileno
Tipo	100% virgen
Cantidad de fibras por kg	76.000 ± 1.000 kg/m ³
Resistencia a la tracción (MPa)	550 MPa
Módulo de elasticidad (GPa)	6,90 MPa
Absorción del agua	Nula
Densidad (gr/cm³)	0,92 gr/cm ³
Resistencia a ácidos y álcalis	Excelente



Fig. 2.13 Macrofibras poliméricas

Se incluye también una tercera muestra, forjado N°3 (Roshdestwensky, 2019) cuya capa de compresión utiliza hormigón sin refuerzo. La configuración de este ensayo es comparable a los realizados en el presente estudio, por lo que sus resultados servirán como referencia para evaluar las mejoras que ofrecen las dos primeras alternativas. Las características de los tres forjados descritos se resumen en la tabla 2.8.

Tabla 2.8 - Características de los forjados

Forjado	N°1	N°2	N°3
Luz de cálculo	3,6 m	3,6 m	3,8 m
Vigueta	Altura 9cm - 3 cordones 2x25 mm C 1950 RN	Altura 9cm - 3 cordones 2x25 mm C 1950 RN	Altura 9cm - 3 cordones 2x25 mm C 1950 RN
Separación entre viguetas	50 cm	50 cm	50 cm
Ladrillón	Polietileno expandido (100x50x13)	Polietileno expandido (100x50x13)	Polietileno expandido (100x50x13)
Capa de compresión	Altura 5 cm - Hormigón H20 (35 días) Refuerzo malla electrosoldada 6 mm 20x30	Altura 5 cm - Hormigón H20 (35 días) Refuerzo macrofibras sintéticas MAPEI	Altura 5 cm - Hormigón H30 7 días (Equivalente a H20 a 28 días)

Para el armado del forjado (Fig. 2.14) se utilizó una estructura de apoyo diseñada para soportar las cargas máximas esperadas en el ensayo. Se destaca importante garantizar la inmovilidad de los apoyos ya que cualquier descenso podría

comprometer la precisión de las mediciones de deformación. En ambas muestras, se optó por una estructura de acero reforzada con tirantes de madera en los laterales.



Fig. 2.14 Configuración del ensayo (Elaboración propia, 2024)

El hormigón para la capa de compresión fue bombeado sin vibración, enrasando la superficie para asegurar una distribución uniforme. En ambos forjados (Fig. 2.15 - Fig. 2.16) no se presentaron inconvenientes durante el bombeo ni problemas adicionales.



Fig. 2.15 Forjado N° 1 con malla



Fig. 2.16 Forjado N° 2 con HRF

Procedimiento de ensayo

Para evaluar el comportamiento a flexión, el ensayo consiste en aplicar una carga constante en los tercios de la luz incrementándose por escalones y registrando las deformaciones instantáneas con flexímetros ubicados en el centro de la luz del forjado, colocando un flexímetro por cada vigueta para obtener una deflexión promedio (Fig. 2.17).

Una vez alcanzada la carga de servicio se descarga el forjado y se registran las deformaciones residuales, continuando el ensayo hasta la rotura. Con las mediciones de los tiempos en cada escalón de carga, se puede confeccionar un gráfico de carga-tiempo como el indicado en la figura 2.18.



Fig. 2.17 Flexímetro (Elab propia, 2024)

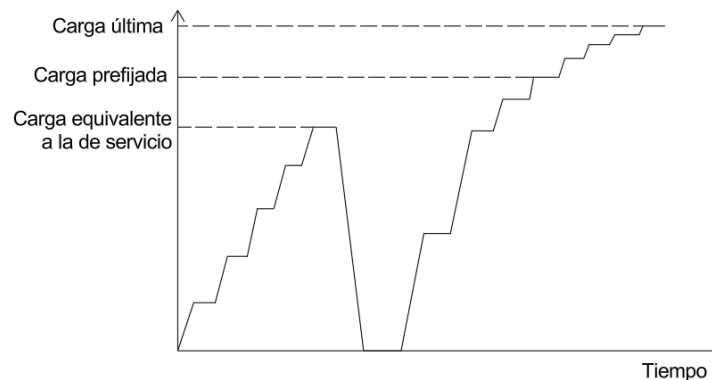


Fig. 2.18 Diagrama de carga (IRAM 11555)

Cálculo de capacidad de carga según CIRSOC 201-2005:

Se realizó la estimación de la carga de rotura de los forjados. La malla de repartición en la capa de compresión no cumple una función estructural dentro de la losa, es por esta razón que al realizar el cálculo teórico de la capacidad de carga no se la considera; de este modo, el cálculo teórico para el hormigón sin refuerzo, el hormigón reforzado con fibras (HRF) y el hormigón con malla de repartición es el mismo. Los parámetros utilizados para el cálculo se observan en la tabla 2.9, los mismos fueron obtenidos siguiendo los diagramas que se observan en las figuras 2.19 y 2.20.

Tabla 2.9 - Características de la sección.

Características de la sección		Cordones (C1950RN)	
c (altura cc)	50 mm	Sección	7,95 mm ²
h viguetas	90 mm	fpu	1966 Mpa
b (ancho sección)	1000 mm	fpy	1600 MPa
n° viguetas	2	fpy/fpu	0,81
h ladrillón	130 mm	Carácterística hormigón	
Aps	47,7 mm ²	fc	20 Mpa

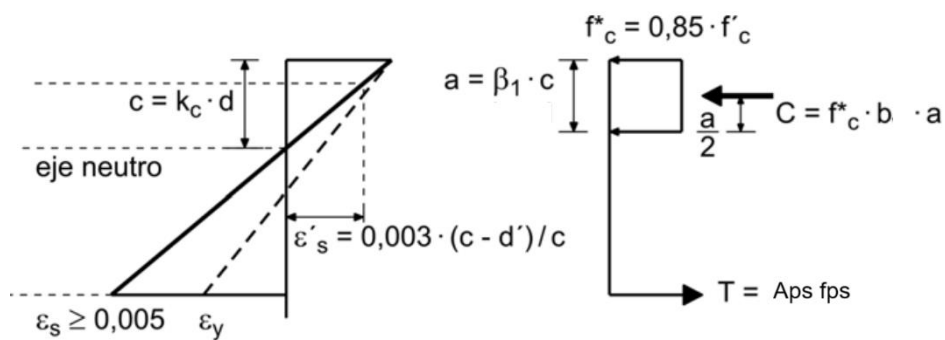


Fig 2.19 - Parámetros de cálculo (Cirsoc 201 - 2005)

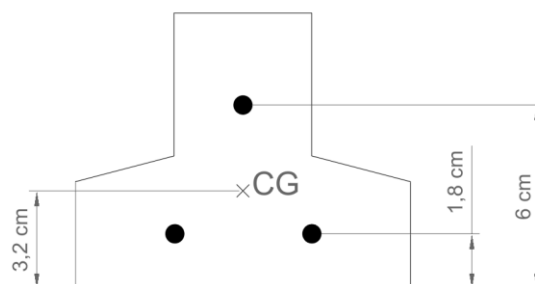


Fig 2.20 - Baricentro de la armadura tesa

$$dp = 148 \text{ mm}; \beta_1 = 0,85; \gamma_p = 0,55; pp = \frac{A_{ps}}{(b * dp)} = 0,00032; fps = 1925,7 \text{ MPa}$$

$$T = fps * A_{ps} = 91856 \text{ N}; a = \frac{T}{0,85 * b * f_c} = 5,4 \text{ mm} \quad Mn = T (dp - \frac{a}{2}) = 1362 \text{ kgm.}$$

Para poder estimar la sobrecarga que resiste el forjado, se debe descontar al momento nominal el generado por el peso propio: $PP = 178 \text{ kg/m}^3$. Suponiendo una estructura simplemente apoyada con carga distribuida, el momento producido por el peso propio es igual a:

$$M_{pp} = \frac{PP * l^2}{8} = \frac{178 \text{ kg/m} * 3,6m^2}{8} = 288,36 \text{ kgm}$$

Finalmente, se realiza el cálculo del momento resistente por sobrecarga (M_{sob}) y se determina la carga P que resiste, teniendo en cuenta el esquema del ensayo, donde la estructura está cargada en los tercios de la luz (Fig. 2.21)

$$M_{sob} = Mn - M_{pp} = 1362 \text{ Kgm} - 288,36 \text{ Kgm} = 1073,5 \text{ Kgm}$$

$$M_{sob} = P * \frac{l}{3} \rightarrow P = M_{sob} * \frac{3}{l} = 1073 \text{ Kgm} * \frac{3}{3,6m} = 894,6 \text{ kg}$$

Siendo el total de sobrecarga que debe resistir $\rightarrow P_{total} = 2P = 1739 \text{ kg}$

En las tablas 2.10, 2.11 y 2.12 se presentan los resultados de los ensayos realizados donde se observan los escalones de carga aplicados tanto en estado de servicio como en rotura, así como el promedio de deflexiones correspondientes.

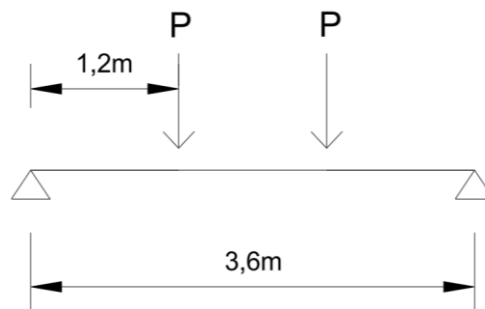


Fig. 2.21. Configuración de ensayo (IRAM 11555)

Tabla 2.10 - Resultados de ensayo forjado N°1

CARGAS DE TRABAJO							
Luz de calculo:	3,6 m	Peso propio	178 kg/m ²				
Momento total admisible	845 kgm/m	Momento de peso propio	288 kgm/m				
Momento total de rotura	1332 kgm/m	Tipo H° de CC:	H20 + Malla 6mm 20x30				
Diagrama de Cuerpo Libre	CARGA EN TERCIOS						
Carga admisible:	928 kg	Carga de rotura:	1739 kg				
ENSAYO DE CARGA							
Fecha de ensayo:	7/10/2024	Fecha de hormigonado CC:	2/9/2024				
Edad CC:	35	Fecha de fabricación V:	1/8/2024				
CARGA ADMISIBLE							
Bolsas o Pesas	Carga (kg)	Carga acumulada (kg)	Deflexión (di)		Promedio deflexiones (mm)	¿Fisura?	Escalón
0	67	67	0	0	0	No	0
2 (50kg) + Tercios	67+100	167	4	18	0,11	No	1
4 (50kg)	200	367	46	62	0,54	No	2
4 (50kg)	200	567	92	92	0,92	No	3
3 (50kg) + 1 (25kg)	175	742	123	116	1,195	No	4
3 (50kg) + 1 (25kg)	175	917	176	179	1,775	No	5
-	-	0	32	51	0,415	No	Descargado
CARGA ROTURA							
Bolsas o Pesas	Carga (kg)	Carga acumulada (kg)	Deflexión (di)		Promedio deflexiones (mm)	¿Fisura?	Escalón
30 (50kg) + Tercios	67+1500	1567	-	-	-	-	1
2 (50kg)	100	1667	-	-	-	-	2
2 (50kg)	100	1767	-	-	-	-	3
1 (50kg)	50	1817	-	-	-	-	4
8 (25kg)	200	2017	-	-	-	-	5
7 (25kg)	175	2192	-	-	-	Si	6
8 (25kg)	200	2392	-	-	-	Si	7
7 (25kg)	175	2567	-	-	-	Si	8
10 (25kg)	250	2817	-	-	-	Si	9
10 (25kg)	250	3067	-	-	-	Si	10
2 (50kg)	100	3167	-	-	-	Si	11
3 (50kg)	150	3317	-	-	-	Rotura	12

En la figura 2.22 se observa la curva carga - desplazamiento del forjado N° 1, realizada para el estado de servicio. Al llegar a los 750 kg se observa un cambio en la pendiente de la carga, indicando el límite de proporcionalidad elástico. Aquí se alcanzaron desplazamientos cercanos a los 1,77 mm para la carga máxima de servicio obtenida de 917 kg, con deformaciones residuales de 0,41 mm al producirse la descarga.

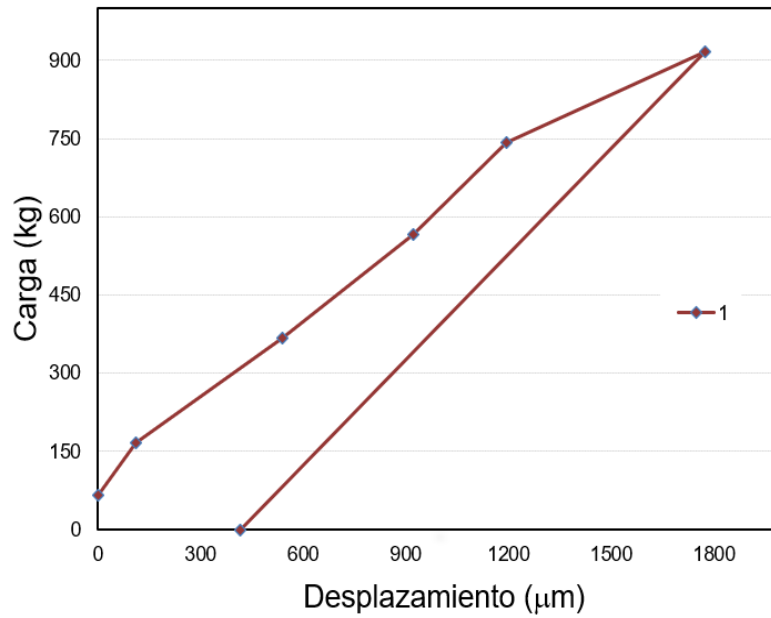


Fig. 2.22 Carga-desplazamiento forjado N°1.

En cuanto al estado último resistente, se registraron fisuras por primera vez al alcanzar una carga de 2197 kg, alcanzando la carga de rotura con 3317 kg (Fig. 2.23). La falla de la estructura se dio por flexión, apreciándose la rotura en el centro de la luz (Fig.2.24).



Fig. 2.23 Carga máxima forjado N°1 (3317 kg)



Fig. 2.24 Modo de rotura por flexión forjado N1.

Tabla 2.11 - Resultados de ensayo forjado N°2.

CARGAS DE TRABAJO							
Luz de calculo:	3,6 m		Peso propio		178 kg/m ²		
Momento total admisible	845 kgm/m		Momento de peso propio		288 kgm/m		
Momento total de rotura	1332 kgm/m		Tipo H° de CC:		H20 + Fibra sintética		
Diagrama de Cuerpo Libre	CARGA EN TERCIOS						
Carga admisible:	928 kg		Carga de rotura:		1739 kg		
ENSAYO DE CARGA							
Fecha de ensayo:	7/10/2024		Fecha de hormigonado CC:		2/9/2024		
Edad CC:	35		Fecha de fabricación V:		1/8/2024		
CARGA ADMISIBLE							
Bolsas o Pesas	Carga (kg)	Carga acumulada (kg)	Deflexión (div)		Promedio deflexiones (mm)	¿Fisura?	Escalón
0	67	67	0	0	0	No	0
2 (50kg) + Tercios	67+100	167	10	0	0,05	No	1
4 (50kg)	200	367	44	16	0,3	No	2
4 (50kg)	200	567	72	46	0,59	No	3
3 (50kg) + 1 (25kg)	175	742	111	72	0,915	No	4
3 (50kg) + 1 (25kg)	175	917	149	103	1,26	No	5
-	-	0	23	0	0,115	No	Descargado
CARGA ROTURA							
Bolsas o Pesas	Carga (kg)	Carga acumulada (kg)	Deflexión (div)		Promedio deflexiones (mm)	¿Fisura?	Escalón
30 (50kg) + Tercios	67+1500	1567	-	-	-	-	1
2 (50kg)	100	1667	-	-	-	-	2
2 (50kg)	100	1767	-	-	-	-	3
2 (50kg)	100	1867	-	-	-	-	4
8 (25kg)	200	2067	-	-	-	-	5
8 (25kg)	200	2267	-	-	-	-	6
4 (25kg)	100	2367	-	-	-	-	7
1 (25kg)	25	2392	-	-	-	-	8
1 (25kg)	25	2417	-	-	-	-	9
1 (25kg)	25	2442	-	-	-	-	10
1 (25kg)	25	2467	-	-	-	Rotura	11

En la figura 2.25 se observa la curva carga - desplazamiento del forjado N° 2, realizada para el estado de servicio. En este caso no se identifica un claro límite de proporcionalidad en la carga. Aquí se alcanzaron desplazamientos cercanos a los 1,26 mm para la carga máxima de servicio obtenida de 917 kg, con deformaciones residuales de 0,11 mm al producirse la descarga.

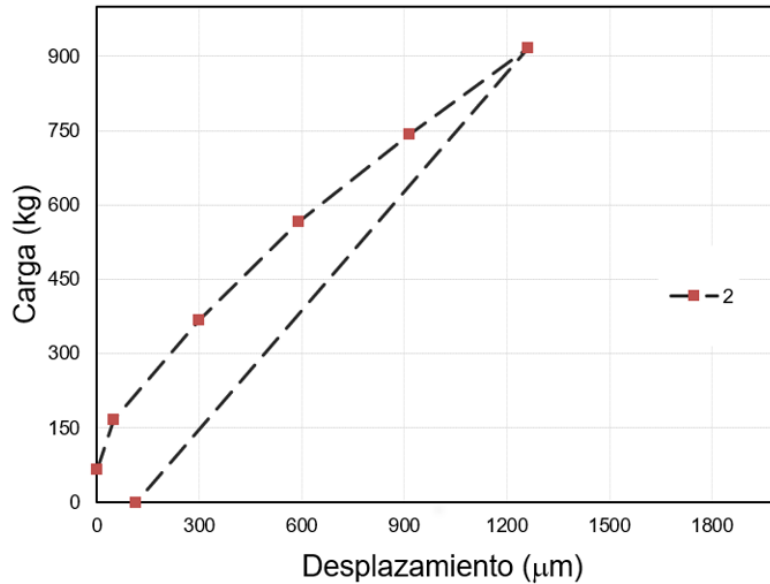


Fig. 2.25 Carga-desplazamiento forjado N°2.

En cuanto al estado último resistente, se registraron fisuras por primera vez al alcanzar una carga de 2467 kg, alcanzando la carga de rotura con 2467 kg (Fig. 2.26). La falla de la estructura se dio por flexión, apreciándose la rotura en el centro de la luz (Fig.2.27).



Fig. 2.26. Carga máxima Forjado N°2 (2467 kg)



Fig. 2.27. Modo de rotura Forjado N°2

Tabla 2.12 - Resultados de ensayo forjado N°3.

CARGAS DE TRABAJO							
Luz de calculo:	3,8 m	Peso propio			178 kg/m ²		
Momento total admisible	845 kgm/m	Momento de peso propio			321 kgm/m		
Momento total de rotura	1335 kgm/m	Tipo H° de CC			H20		
Diagrama de Cuerpo Libre	CARGA EN TERCIOS				(H30 a 7 días)		
Carga admisible:	827 kg	Carga de rotura:			1601 kg		
ENSAYO DE CARGA							
Fecha de ensayo:	4/5/2019	Fecha de hormigonado CC:			27/4/2019		
Edad CC	7 días	Fecha de fabricación V:			13/3/2019		
CARGA ADMISIBLE							
Bolsas o Pesas	Carga (kg)	Carga acumulada (kg)	Deflexión (div)		Promedio deflexiones (mm)	¿Fisura?	Escalón
0	0	0	0	0	0	No	0
2 (25kg) + Tercios	90+50	140	35	30	0,325	No	1
5 (25kg)	125	265	53	57	0,55	No	2
5 (25kg)	125	390	76	80	0,78	No	3
5 (25kg)	125	515	100	105	1,025	No	4
5 (25kg)	125	640	131	139	1,35	No	5
-	0	-	21	21	0,21	No	Descargado
CARGA ROTURA							
Bolsas o Pesas	Carga (kg)	Carga acumulada (kg)	Deflexión (div)		Promedio deflexiones (mm)	¿Fisura?	Escalón
10 (25kg) + Tercios	90+250	340	-	-	-	No	1
13 (25kg)	325	665	-	-	-	No	2
10 (25kg)	250	915	-	-	-	No	3
10 (25kg)	250	1165	-	-	-	Si	4
7 (25kg)	175	1340	-	-	-	Si	5
8 (20kg)	160	1500	-	-	-	Si	6
5 (20kg)	100	1600	-	-	-	Si	7
5 (20kg)	100	1700	-	-	-	Si	8
3 (20kg)	60	1760	-	-	-	Si	9
3 (20kg)	60	1820	-	-	-	Si	10
3 (20kg)	60	1880	-	-	-	Rotura	11

En la figura 2.28 se observa la curva carga - desplazamiento del forjado N° 3, realizada para el estado de servicio. Al llegar a los 525 kg se observa cambio en la pendiente de la carga, indicando el límite de proporcionalidad elástico. Aquí se alcanzaron desplazamientos cercanos a los 1,35 mm para la carga de servicio de 640 kg, con deformaciones residuales de 0,21 mm.

En cuanto al estado último resistente, se registraron fisuras por primera vez al alcanzar una carga de 1165 kg, alcanzando la carga de rotura con 1880 kg. La falla de la estructura se dio por flexión, apreciándose la rotura en el centro de la luz.

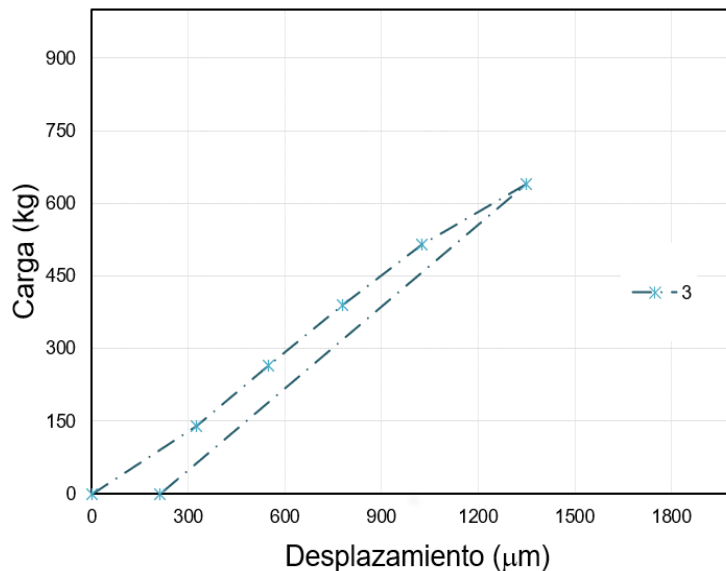


Fig. 2.28 Carga-desplazamiento forjado N°3.

El forjado N°3, presenta una longitud ligeramente superior en comparación con los forjados N°1 y N°2, lo que resulta en un mayor peso propio y una menor carga admisible; sin embargo, aunque los resultados no son directamente comparables con los otros forjados, se ha decidido incluirlos con el objetivo de obtener información adicional que pueda resultar relevante para el análisis.

Análisis de resultados

Comportamiento en servicio:

Con los resultados obtenidos, se graficaron las curvas del comportamiento en servicio en un mismo gráfico (Fig. 2.29) con el fin de comparar el comportamiento de los forjados.

Los resultados indican que el forjado N° 2 reforzado con fibras, presentó el mejor comportamiento en términos de deformaciones de servicio, ya que tanto la deformación pico como la residual fueron menores. Aún con una carga admisible menor el forjado N°3 presentó deformaciones menores que el forjado N°1, indicando la deficiencia de este último en estado de servicio.

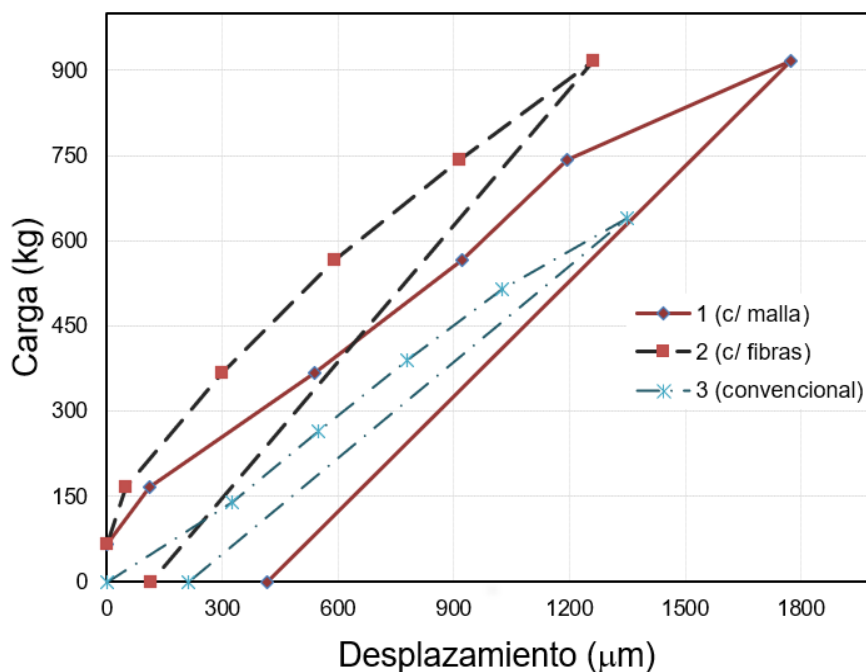


Fig. 2.29 Curva Carga - desplazamiento de los tres forjados.

Comportamiento en rotura:

En lo que respecta al estado límite último, se observó el significativo aporte que ofrecen tanto la malla como las fibras al rendimiento del elemento estructural. Comparado con los valores teóricos y los resultados del forjado sin refuerzo, se registró un incremento notable en la carga de rotura; si bien están comparados bajo condiciones geométricas distintas, se observan aumentos de la misma del orden de 70% para el refuerzo con malla y de 40% para el refuerzo con fibras sintéticas. Es importante aclarar que en el forjado con malla, a pesar de que la carga de rotura fue muy elevada, las deformaciones que se observaron visualmente en los últimos escalones son incompatibles con la funcionalidad de la estructura.

Asimismo, de acuerdo con lo estipulado en la norma EN 15037, la cuantía mínima de malla requerida es de $0,5 \text{ cm}^2/\text{m}$ ($\phi 4$ cada 25cm) Sin embargo, la cuantía dispuesta en los ensayos (y de práctica habitual) fue de $1,88 \text{ cm}^2/\text{m}$ ($\phi 6$ cada 15cm) casi cuatro veces mayor, lo que indica un posible sobredimensionamiento en la utilización de la malla, por lo que se podría pensar que si se utilizase la armadura mínima, el aumento de la carga última sería más aproximado al orden del aumento ocasionado por las fibras.

Los resultados obtenidos se alinearon con lo esperado, ya que como se mencionó en el *Capítulo 1 - Comportamiento mecánico*, las fibras no lograron igualar las propiedades del acero, obteniendo una resistencia última menor en aproximadamente 25%. Sin embargo, a diferencia de las armaduras tradicionales, que solo comienzan a actuar tras la fisuración del hormigón, las fibras contribuyen a retrasar este proceso inicial, mejorando así el comportamiento en servicio de las estructuras.

Análisis económico

Para realizar el análisis económico se tomó de referencia los precios de materiales y jornales (UOCRA) actualizados a *octubre de 2024* en pesos argentinos. Como se puede apreciar en las tablas 2.13 y 2.14, la diferencia de precios en los materiales viene dada por la incorporación de fibras sintéticas o malla tipo “SIMA” en la capa de compresión dependiendo de cada alternativa.

En cuanto a la mano de obra, se considera el tiempo de armado de la malla en la alternativa tradicional (20 min/m²) por lo que el tiempo de mano de obra aumenta.

Tabla 2.13 - Análisis económico para alternativa con fibra

Materiales				
Item	Unidad	Costo unitario	Cantidad para 1m ² de losa	Precio para 1m ² de losa
Fibras sintéticas	kg	\$ 7.900,00	0,15	\$ 1.185,00
Viguetas	ml	\$ 5.000,00	2	\$ 10.000,00
Ladrillos isopor 13cm altura	Ud	\$ 6.000,00	2	\$ 12.000,00
Clavos de 2 1/2"	Kg	\$ 3.670,00	1,5	\$ 5.505,00
Alambre No 17	Kg	\$ 3.805,00	1	\$ 3.805,00
Tirantes de pino nacional 3x3	ml	\$ 3.061,00	5	\$ 15.305,00
Fenolicos de 3/4"	m2	\$ 22.348,00	1	\$ 22.348,00
Gasoil (Desenconfante)	ltrs	\$ 1.235,00	0,5	\$ 617,50
Hormigon elaborado H20	m3	\$ 150.000,00	0,05	\$ 7.500,00
TOTAL				\$ 78.265,50

Mano de obra				
	Unidad	Cantidad	Jornales UOCRA (c/ cargas sociales)	Precio
Oficial armado	h	1,470	\$ 7.396,00	\$ 10.872,12
Ayudante armado	h	2,670	\$ 6.261,00	\$ 16.716,87
TOTAL				\$ 27.588,99

$$Total\ m^2\ de\ losa\ c/fibras = \$105.854$$

Tabla 2.14 - Análisis económico para alternativa con malla.

Materiales				
Item	Unidad	Costo unitario	Cantidad para 1m ² de losa	Precio para 1m ² de losa
Malla tipo "SIMA" 6 15X15 2,40X6m	m2	\$ 9.500,00	1,3	\$ 12.350,00
Viguetas	ml	\$ 5.000,00	2	\$ 10.000,00
Ladrillos isopor 13cm altura	Ud	\$ 6.000,00	2	\$ 12.000,00
Clavos de 2 1/2"	Kg	\$ 3.670,00	1,5	\$ 5.505,00
Alambre No 17	Kg	\$ 3.805,00	1	\$ 3.805,00
Tirantes de pino nacional 3x3	ml	\$ 3.061,00	5	\$ 15.305,00
Fenolicos de 3/4"	m2	\$ 22.348,00	1	\$ 22.348,00
Gasoil (Desenconfante)	ltrs	\$ 1.235,00	0,5	\$ 617,50
Hormigon elaborado H20	m3	\$ 150.000,00	0,05	\$ 7.500,00
TOTAL				\$ 89.430,50

Mano de obra				
	Unidad	Cantidad	Jornales UOCRA (c/ cargas sociales)	Precio
Oficial armado	h	1,800	\$ 7.396,00	\$ 13.312,80
Ayudante armado	h	3,000	\$ 6.261,00	\$ 18.783,00
TOTAL				\$ 32.095,80

Total m² de losa c/malla = \$121.526

Tabla 2.15 - Comparativa entre alternativas

Losa	Costo-Costo (por m ²)	Ahorro por m ²	%
Con fibras	\$ 105.854,49	\$ 15.671,81	13%
Con malla	\$ 121.526,30		

En la tabla 2.15, se puede observar la comparativa entre alternativas. La losa de viguetas con refuerzo de fibras presenta un ahorro de 13% del costo-costo por metro cuadrado si se compara con la alternativa tradicional, lo cual es un valor importante teniendo en cuenta las dimensiones usuales de las losas.

Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que las fibras de polipropileno compiten eficazmente con el refuerzo convencional, reduciendo costos, mejorando el rendimiento estructural en condiciones de servicio y superando en 42% la carga máxima para la que fueron diseñadas. La experiencia en el uso de fibras en losas sobre el suelo respalda su comportamiento favorable en entrepisos, convirtiéndolas en una opción viable y segura. Además el polipropileno destaca por su resistencia a la corrosión y su desempeño en diversas condiciones de exposición, incluidas situaciones de fuego y se obtiene una terminación más rugosa de las losas que facilita la adherencia de las capas superiores.

Respecto al modo de rotura, las losas reforzadas con malla de acero mostraron una notable ductilidad al soportar esfuerzos de tracción ante grandes deformaciones. En contraste, las fibras de polipropileno, distribuidas en todas direcciones y diseñadas para mejorar el comportamiento de la capa de compresión, carecen de una orientación preferencial que favorezca la ductilidad. Aunque la ductilidad lograda con fibras es inferior a la obtenida con la malla de acero, se considera suficiente para permitir deformaciones que alerten de una posible falla estructural.

El modo de falla en las losas convencionales es frágil, lo que hace necesaria la aplicación de refuerzos en la capa de compresión, aunque incrementa notablemente los costos. Ante esto, las losas con fibras representan una alternativa rentable, ofreciendo un mejor comportamiento en servicio y un rendimiento comparable en términos de rotura.

CAPÍTULO

3

Aplicación del HRFS en tubos estructurales

Sobre los tubos estructurales de hormigón armado

Los tubos o caños de hormigón desempeñan un papel importante en la Ingeniería Civil en el ámbito de las infraestructuras hidráulicas y sus aplicaciones se dan de forma subterránea y con paso de fluidos como sistemas de drenaje, en el cual cumplen el doble propósito de canalizar el agua y soportar el peso de capas de terreno, vehículos o incluso estructuras sobre ellos, donde se requiere resistencia a la corrosión y estabilidad estructural en el tiempo.

La geometría más difundida es la circular (Fig. 3.1) y dentro de la industria se pueden encontrar diámetros y longitudes variables, por lo que su elección se da dependiendo de la necesidad del proyecto en el cual se aplique.



Fig. 3.1 - *Tubo estructural de hormigón (Colmenar, 2024)*

Se trata de estructuras rígidas cuya resistencia depende principalmente de la geometría del propio tubo ya que su baja deformabilidad vertical, menor al 2% del diámetro interno, impide generar reacciones significativas en el terreno circundante (Plastic Pipes Institute, 2017). Esto contrasta con las tuberías flexibles que debido a su mayor deformabilidad experimentan un aumento en el diámetro horizontal y generan desplazamientos que movilizan los empujes pasivos del suelo incrementando la resistencia a través de la interacción con el terreno.

En general, las tuberías están sometidas a las presiones ejercidas por el terreno (Fig. 3.2.a) y a sobrecargas que pueden presentarse durante su funcionamiento, lo que genera principalmente solicitaciones de flexión cuyos esfuerzos constituyen la causa más probable de falla.

Según Al Rikabi et al. (2017), quienes ensayaron 36 tubos con diferentes configuraciones, observaron que durante la falla las tuberías desarrollan primero fisuras verticales en las superficies interiores seguidas de fisuras horizontales en las superficies exteriores, generalmente a media altura, como se muestra en la figura 3.2.b.

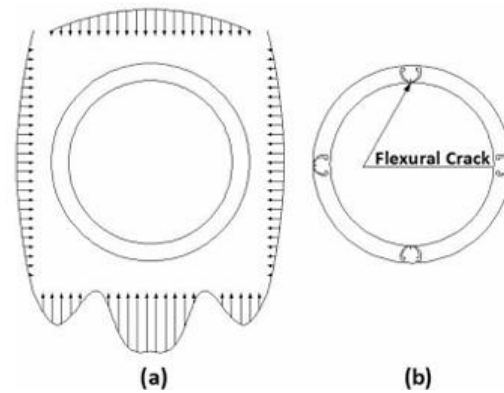


Fig. 3.2 - a) tensiones sobre tubos estructurales b) formación de fisuras en tubos estructurales (Peyvandi et al, 2014)

Para contrarrestar esta deficiencia, cuentan con un sistema de refuerzo interno compuesto por armadura longitudinal y transversal cuya disposición varía en función de la geometría del tubo (Fig 3.3).

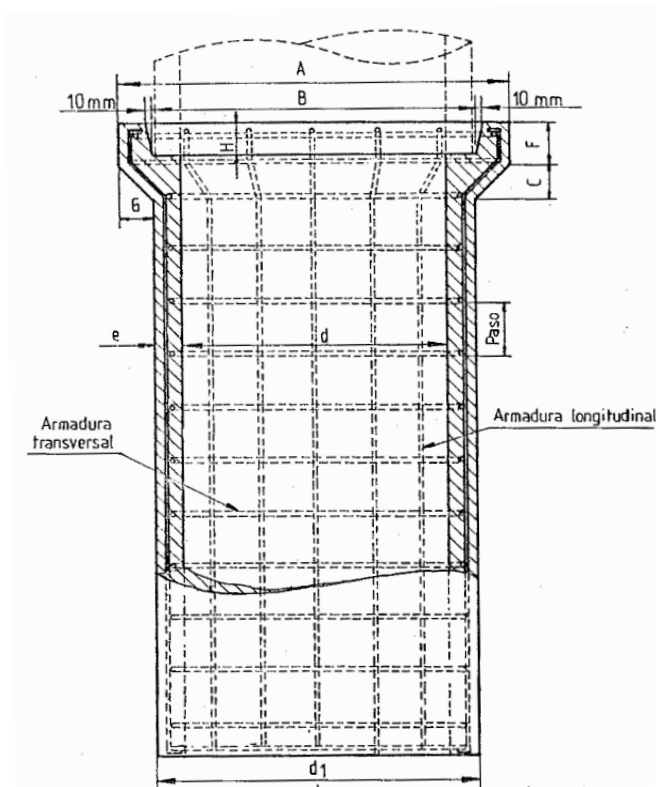


Fig. 3.3. Armadura transversal y longitudinal (IRAM 11629)

Otros modos de falla comienzan a surgir para tuberías de grandes diámetros (mayores a 900 mm) como la asociada a la tensión radial y el corte diagonal (Fig.3.4). En estos casos la armadura convencional por sí sola no es suficiente, y es más probable que aparezcan fisuras en el tubo (Al Rikabi, 2017). Además, pueden producirse fisuras en la superficie debido a los efectos de deformación térmica.

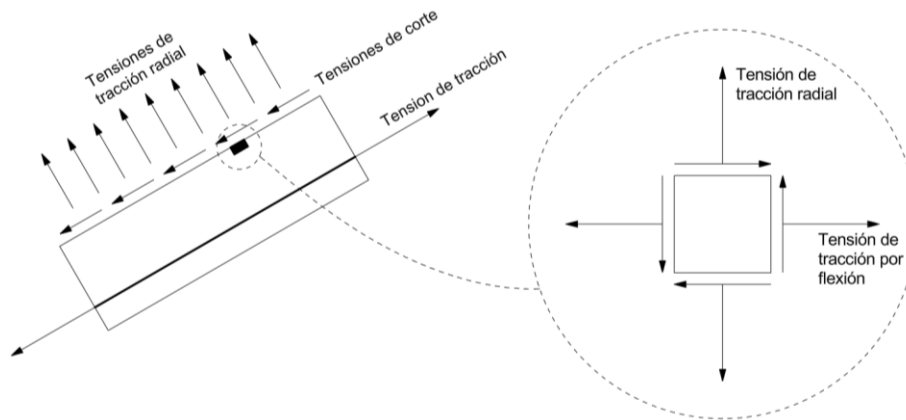


Fig. 3.4 - Esfuerzos sobre la circunferencia del tubo. (Adaptado de Al Rikabi et al., 2017)

Incorporación de las fibras en los tubos de hormigón

Los tubos de hormigón suelen instalarse en entornos agresivos y pueden transportar fluidos químicamente reactivos, exposición que representa una de las principales desventajas de las tuberías de hormigón armado, ya que las fisuras favorecen la filtración de contaminantes y la corrosión de la armadura interna, comprometiendo la estabilidad estructural de las tuberías y aumentando los costos de mantenimiento y reparación.

Para reducir la fisuración, se requiere un aumento de la cuantía de acero y del espesor del tubo, lo que deriva en volúmenes excesivos de hormigón e incrementos de costos.

En este contexto han surgido alternativas de refuerzos, como las fibras, que permiten reducir la fisuración sin aumentar el espesor, sustituyendo parcial o totalmente a la armadura tradicional (Wilson, 2014). Este ahorro de armadura facilita la manipulación y montaje, disminuyendo los tiempos de trabajo y asegurando el cumplimiento de separaciones y recubrimientos mínimos fijados por los códigos, lo que conlleva una importante reducción de costos.

En los tubos reforzados con fibras (TRF) la alternativa más difundida es la incorporación de fibras de acero. Diversos estudios, como los realizados por Ercoli et al. (2014) han demostrado que la sustitución de la armadura convencional por fibras de acero es viable, aunque persiste el problema de la corrosión cuando las fibras están expuestas a entornos agresivos lo que puede generar manchas de óxido en la superficie del tubo.

Como solución, se ha evaluado la incorporación de fibras de polipropileno y aunque el conocimiento sobre su rendimiento está en fases iniciales, varios estudios han analizado diferentes dosis de fibras, diámetros de tubos y combinaciones de reemplazo parcial o total de la armadura. Los resultados indican que la inclusión de fibras sintéticas mejoran la capacidad de carga, el comportamiento post-fisuración, la ductilidad y la rigidez de los tubos de hormigón (Al Rikabi et al., 2017) en concordancia con lo abordado en el *Capítulo 1* sobre el efecto de las macrofibras sintéticas en el hormigón.

En el *Capítulo 1 - Durabilidad de HRF*, se mencionó que el HRF es efectivo en aplicaciones que requieran impermeabilidad gracias a su capacidad para contrarrestar el crecimiento de fisuras. Las fibras de polipropileno, al no presentar problemas de corrosión ni mostrar incompatibilidad con el medio alcalino del hormigón, se posicionan entonces como un refuerzo interesante para caños de hormigón.

Por otro lado, en cuanto a la dosificación, Wilson et al. (2014) evidenciaron que al aumentar la cantidad de fibras, las tuberías experimentan una mayor resistencia post-fisuración y una reducción en la deflexión. Sin embargo este efecto solo se mantiene hasta alcanzar una dosis óptima y a partir de ese punto, un incremento adicional en la cantidad de fibras no mejora la resistencia y puede incluso reducirla.

Consideraciones reglamentarias de los tubos estructurales

En Argentina, la norma que regula los procesos de fabricación, clasificación y recepción de tubos de hormigón es la norma IRAM 11629 “*Caños de hormigón armado con malla soldada, doblada o en espiral, no pretensados*” destinada a la conducción de líquidos sin presión.

La norma clasifica a los tubos de acuerdo a la carga externa de prueba, a la carga de rotura, al diámetro interno y al largo útil; según estos parámetros se clasifican en tubos de clases I a IV donde el requerimiento de las mismas depende del tipo de proyecto a realizar. En cuanto a las resistencias exigidas, se establecen dos valores representativos para el control de la respuesta mecánica: la carga de prueba (F_c) y la carga mínima que el tubo debe soportar en el régimen de falla (F_u).

El método de ensayo que propone la norma se denomina método de las tres aristas, el cual se realiza con el mecanismo indicado en la figura 3.5 y debe ser capaz de aplicar la carga total a velocidad constante, aplicada en la mitad de la longitud del caño a ensayar. Los puntos de apoyo del tubo deben estar constituidos por tiras de caucho adheridas a dos vigas rígidas y fijas con el fin de repartir uniformemente las tensiones, mientras que el apoyo superior debe tener libertad de movimiento vertical.

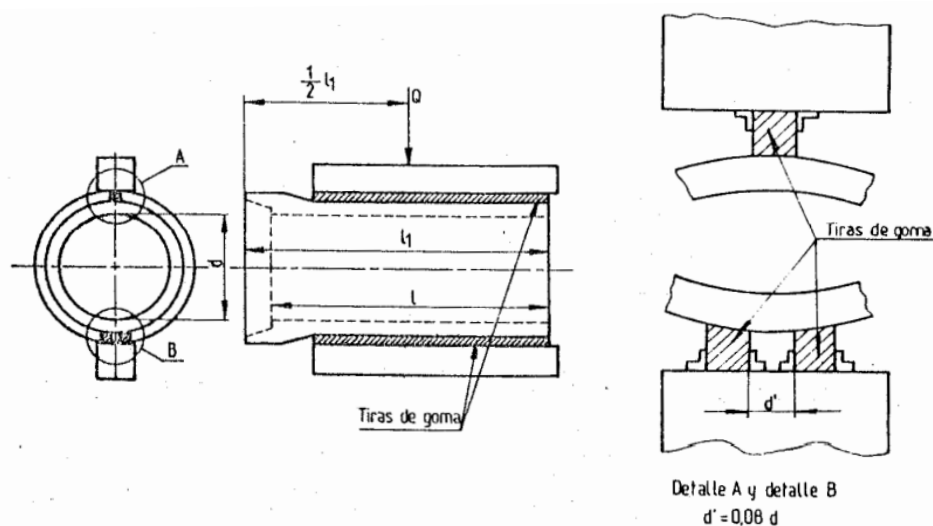


Fig. 3.5 - Detalle del ensayo (IRAM 11629-1995)

Si bien la norma IRAM 11629 no trata el uso de fibras como refuerzo estructural, es de utilidad lo descrito como procedimiento de ensayo y las consideraciones sobre la resistencia requerida para cada clase de tubo.

En cuanto al uso de fibras se toma como referencia la norma EN 1916-2002, que especifica el empleo de fibras de acero.

Debido a la falta de normativa específica, se considera que sus disposiciones son aplicables al uso de fibras sintéticas.

La norma detalla los procedimientos para realizar los ensayos en tubos de hormigón según el tipo de refuerzo empleado:

- Tubos reforzados con fibras: se aplica la carga de prueba (F_c), que se mantiene durante un minuto y se inspecciona la tubería para detectar fisuras. Si no se observan fisuras, se incrementa la carga hasta alcanzar la máxima de rotura (F_u). Una vez que la carga sostenida disminuye al 95 % o menos de la registrada, se descarga y recarga hasta la carga de prueba. Se mantiene durante un minuto y se registra si la tubería resiste la carga aplicada durante ese tiempo (Fig. 3.6.a). La evaluación del comportamiento luego de la falla proporciona información sobre la ductilidad y la capacidad del tubo para resistir cargas fluctuantes.
- Tubos con refuerzo de acero: se aplica la carga de prueba (F_c), se inspecciona la existencia de fisuras y se mantiene la carga aplicada durante un minuto. Luego, se incrementa la carga hasta la rotura (F_u) y se registra su valor (Fig. 3.6.b).
- Tubos sin refuerzo: se aplica directamente la carga de rotura (F_u) y se registra su valor, debido a su modo de falla frágil (Fig. 3.6.c).

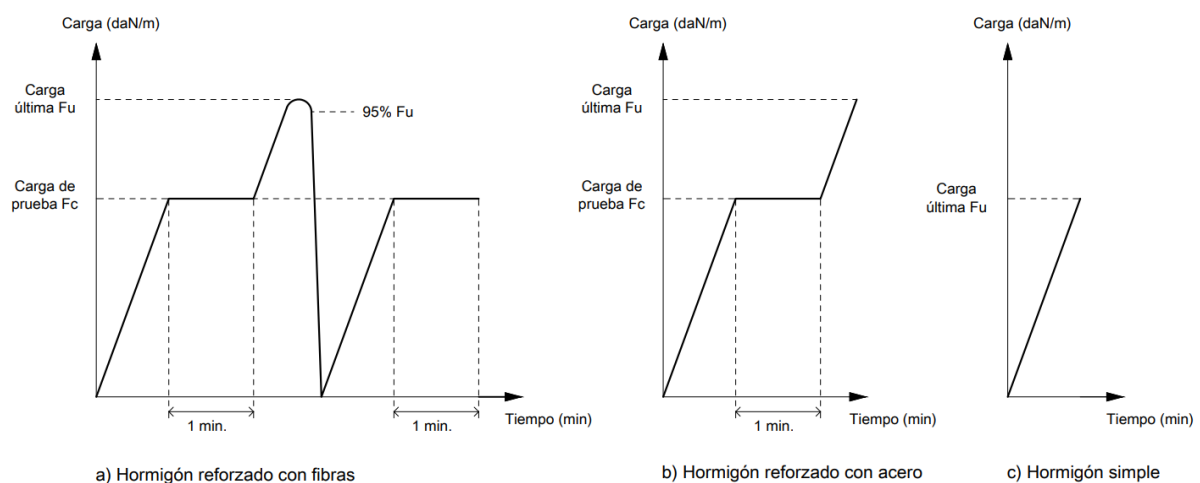


Fig. 3.6 - Esquema de cargas (Adaptado de EN 1916-2002)

Un aspecto clave es que, para los tubos reforzados con fibras, no se permiten agrietamientos en servicio si se cumple con los requisitos de resistencia en la primera etapa de prueba, lo que contrasta con los tubos de acero donde se permiten anchos de fisuración de hasta 0,3 mm.

Por otro lado, los TRF se someten a un proceso de descarga-recarga una vez que se ha alcanzado F_u para asegurar que el tubo no solo pueda soportar cargas, sino que también presente un comportamiento predecible y manejable una vez que se retiran las mismas (Figueiredo, 2011). Este proceso de descarga-recarga es difícil de reproducir sin un sistema de medición adecuado que pueda controlar los desplazamientos. Bajo este contexto, varios autores como De la Fuente (2015) sostienen que los resultados de la respuesta post-fallo no dependen significativamente del tipo de prueba (cíclica o continua) lo que representa un avance importante en el método de evaluación de tubos reforzados con fibras (Fig. 3.7).

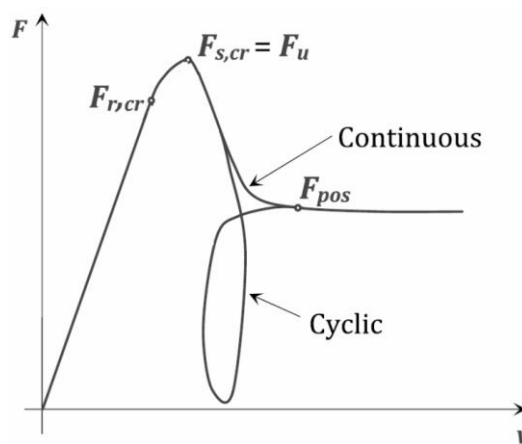


Fig. 3.7 - Diferencias ensayo continuo y cíclico (de la Fuente et al., 2015)

Por su parte, el Fib Model Code/2010 (MC2010) establece que las fibras pueden sustituir total o parcialmente las barras de refuerzo en el estado límite último (ELU), siempre que se cumplan las condiciones de resistencia residual obtenidas del ensayo EN 14651 (detallado en *Capítulo 1 - Comportamiento del HRF*) específicamente que: $fR1k/fLk \geq 0,4$ y $fR3k/fR1k \geq 0,5$, donde fLk representa el valor característico de la resistencia del primer pico del ensayo; $fR1k$ y $fR3k$ las tensiones que producen una apertura de fisura de 0,5 y 2,5 mm respectivamente.

Elección de diámetros y dosificación de fibras

Como se explicó anteriormente, aumentar la dosis de fibras en el hormigón puede reducir la trabajabilidad y a su vez incrementar los costos de fabricación. Dado que el desmolde de los tubos se realiza inmediatamente después del colado, el hormigón debe tener un asentamiento nulo para mantener la forma del tubo, lo que

implica el uso de mezclas secas y poco trabajables; en este contexto, una dosis excesiva de fibras podría dificultar significativamente el proceso de fabricación.

Por otro lado, es necesario emplear una cantidad mínima de fibras que cumpla con los requisitos normativos de resistencia, el objetivo es hallar la dosificación de fibras óptima que permita obtener un equilibrio entre trabajabilidad, resistencia y economía en el hormigón.

Según los ensayos a flexión de Zerbino (2020) siguiendo la norma EN 1916-2002 con hormigones H30 y dosis variables de fibras de polipropileno (Fig. 3.8) se observó que para una dosis de 4 kg/m³ se cumple con las relaciones establecidas por el reglamento Fib Model Code 2010 para la sustitución total o parcial de las barras de refuerzo en el estado límite último.

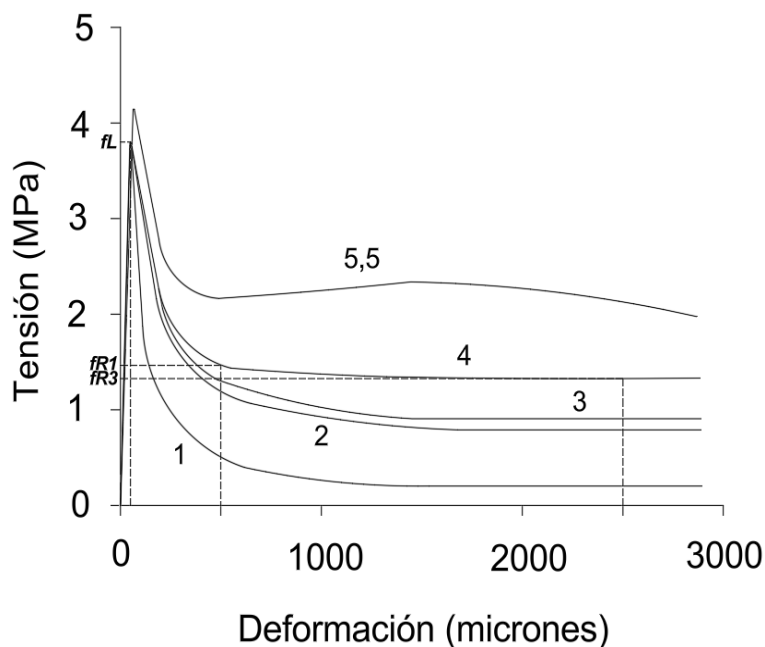


Fig. 3.8 - Curva T-D para distintas dosis (Zerbino, 2020)

De la figura se puede observar (para 4 kg/m³):

- $fr1 = 1,5 \text{ MPa}$
- $fr3 = 1,35 \text{ MPa}$
- $fL = 3,8 \text{ MPa}$

Relaciones propuestas por el Fib Model Code:

- $fr1/fL \approx 0,4 \geq 0,4$
- $fr3/fr1 = 0,9 \geq 0,5$

Se permite el reemplazo total de la armadura en ELU.

Clasificación:

$$\rightarrow 0,9 \leq fr3/fr1 < 1,1$$

(HRF clase 1,5 - c)

El fabricante de las fibras (NTH) recomienda una dosificación óptima de 3 a 4 kg/m³, basándose en ensayos de flexión que demuestran que, a partir de 4 kg/m³, no se observa un aumento significativo en la resistencia última. Por su parte, Wilson et al. (2014) corroboró estos resultados mediante ensayos realizados específicamente en tubos donde comprobó que al superar los 4,75 kg/m³ la resistencia disminuye si sigue aumentando la dosis.

Además, de la Fuente et al. (2013) propusieron un método de diseño donde demostraron que tubos reforzados solo con fibras de polipropileno, alcanzaron resistencias que varían entre 90 kN/m² y 60 kN/m² para diámetros de 40 y 60 cm respectivamente con valores de $f_{R1} \geq 1,5$ MPa y una relación de resistencias residuales superior a 0,9 ($f_{R4}/f_{R1} \geq 0,9$) lo que coincide con requisitos similares a los de tipo “c” del Fib Model Code 2010.

En cuanto a la geometría, Escariz et al. (2013) han comprobado que para tubos reforzados con fibras de polipropileno, los de diámetro menor a 600 mm alcanzaron clases de resistencia según la norma EN 1916 - 2002 con sustitución total de la armadura.

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, se decidió adoptar una dosificación de 4 kg/m³ para tubos de 40 y 60 centímetros.

Programa experimental

El objetivo del programa experimental es evaluar el aporte estructural de las fibras sintéticas en los tubos de hormigón, para ello, se fabricaron muestras con distintas configuraciones para los diámetros seleccionados: 2 tubos de HRF, 2 tubos de HRF con refuerzo de malla electrosoldada y 2 tubos solo con malla (Fig. 3.9).



Fig. 3.9 - Muestras elaboradas (Elaboración propia, 2024)

En la tabla 3.1 se presentan los tubos identificados mediante un código que detalla diámetro, espesor, longitud y tipo de refuerzo.

Tabla 3.1 - Características de las muestras elaboradas.

Código	Diámetro (cm)	Espesor (cm)	Longitud (cm)	Refuerzo
40-4,5-100-A	40	4,5	100	Malla electrosoldada
40-4,5-100-F	40	4,5	100	4 kg/m ³ fibras polipropileno
40-4,5-100-FA	40	4,5	100	4 kg/m ³ fibras polipropileno + Malla electrosoldada
60-6-120-A	60	6	120	Malla electrosoldada
60-6-120-F	60	6	120	4 kg/m ³ fibras polipropileno
60-6-120-FA	60	6	120	4 kg/m ³ fibras polipropileno + Malla electrosoldada

F: Hormigón reforzado con fibras, A: Hormigón reforzado con malla de acero, FA: Hormigón reforzado con fibras y malla de acero

Los tubos fabricados pertenecen a la clase I según la norma IRAM 11629 y cumplen con las características geométricas especificadas en dicha norma, tal como se detalla en la tabla 3.2.

Tabla. 3.2 - Tubos estructurales clase I (IRAM 11629-1995)

Caños		Armadura		Carga externa		
Diámetro interno d (mm)	Espesor e (mm)	Longitudinal		Transversal	De prueba (kg/m)	De rotura (kg/m)
		Inferior		Interior		
		N° de alambres	Diámetro (mm)	cm ² /m		
400	45	7	3,4	1,4	2000	3000
600	60	11	4	2,5	3000	4500

Proceso de elaboración

Para la elaboración, se utilizaron moldes metálicos sellados con presillas (Fig. 3.10) que para el caso de los tubos reforzados con armadura, ésta se coloca dentro del molde antes del hormigonado, prestando especial atención a su correcta ubicación para garantizar el cumplimiento de recubrimientos mínimos.



Fig 3.10 - Molde empleado para la elaboración

Los componentes del hormigón se mezclan conforme a la dosificación previamente establecida, destinada a cumplir los requisitos de resistencia para un H30.

Para el caso de los tubos de HRF, debe prestarse especial atención a la incorporación de las fibras dentro de la mezcla (Fig. 3.11) proceso que debe realizarse de manera paulatina para favorecer el mezclado. Si esto no se respeta, se fomenta la formación de “erizos” que reducen la dosis efectiva de fibra en el hormigón y pueden comprometer la integridad estructural del tubo, tal como se mencionó en el *Capítulo 1 - Comportamiento en estado fresco*.

En el presente estudio se comprobaron los fenómenos descritos anteriormente; inicialmente las fibras fueron incorporadas todas juntas en la mezcladora, lo que resultó en la formación de varios erizos durante el hormigonado (Fig. 3.12) por lo que el tubo realizado con este hormigón fue considerado defectuoso. Posteriormente, al incorporar las fibras de manera gradual, no se observaron erizos durante el hormigonado, lo que permite concluir que dicha práctica es indispensable en todos los trabajos realizados con HRF.



Fig. 3.11 - Incorporación de las fibras en la mezcla



Fig. 3.12 - Formación de erizos

El colado del hormigón se realiza descargándolo desde una tolva aérea fijada a un puente grúa (Fig. 3.13). Luego del colado se lleva a cabo la compactación de la mezcla por varillado de los operarios y vibrado del molde (Fig. 3.14) durante 5 a 10 minutos, siendo un tiempo prolongado al tratarse de un hormigón con relación agua/cemento menor a 0,3.



Fig. 3.13 - Colado del hormigón



Fig. 3.14 - Vibrado del hormigón

Tras el colado, se retiran los moldes metálicos (Fig. 3.15) con cuidado para evitar deformar el tubo ya que esto podría alterar su comportamiento durante los ensayos. La extracción incluye tanto el molde interno como los externos; para el interno se utiliza una grúa que debe estar lo más centrada posible respecto al eje del

tubo y libre de perturbaciones (Fig. 3.16) mientras que los moldes externos se retiran manualmente mediante un deslizamiento vertical inicial que permite superar la adherencia del hormigón sin deformarlo, facilitando así su posterior desprendimiento.



Fig. 3.15 - Desmolde de los tubos



Fig. 3.16 - Extracción de molde interno

Durante el desmolde de la muestra 40-4,5-100-A se observaron grietas significativas comúnmente conocidas como “nidos de abeja” (Fig. 3.17) fenómeno asociado al asentamiento plástico del hormigón (Segeber, 2008), proceso que ocurre cuando las partículas más densas se desplazan hacia la parte inferior de la mezcla y el agua y los finos ascienden a la superficie, generando segregación y exudación, con la consecuente pérdida de volumen por evaporación del agua.

En los tubos reforzados con fibras y malla este efecto se ve incrementado por la restricción del movimiento de la mezcla debido a los refuerzos que limitan el desplazamiento del agua y los finos hacia la superficie, generando una segregación mayor cerca de los refuerzos y además, el pequeño espesor de los tubos dificulta aún más la distribución homogénea de los componentes, favoreciendo la formación de fisuras prematuras.



Fig. 3.17 - *Formación de fisuras por asentamiento plástico en 40-4,5-100-A.*

Transporte, manipulación y recepción

Una vez fabricados los tubos de hormigón, es importante transportarlos al lugar de uso tomando las precauciones necesarias para evitar que experimenten esfuerzos superiores a los contemplados en su diseño, los mismos se transportan en camiones donde deben colocarse horizontalmente sobre cunas o listones con el fin de asegurar su estabilidad.

En cuanto a la descarga, para tubos que pesen más de 2.000 kg, es recomendable emplear grúas automotrices que proporcionen seguridad y precisión en la manipulación (Fig. 3.18); para tubos de menor peso, como los utilizados en este trabajo, se puede realizar la descarga colocando gomas debajo del camión, lo que permite amortiguar el impacto y proteger el material (Fig. 3.19).



Fig 3.18. Manipulación de los tubos



Fig 3.19. Recepción de los tubos en laboratorio

Al momento de la recepción de los tubos, se deben verificar las dimensiones finales ya que podrían presentar ligeras variaciones respecto a los valores ideales. En el presente trabajo, se verificaron las dimensiones de cada tubo como se muestra en la tabla 3.3, garantizando que cumplen con las especificaciones técnicas requeridas y presentando poca desviación con los valores teóricos.

La nomenclatura utilizada en la tabla se referencia a las figuras 3.3 y 3.5.

Tabla. 3.3 - Dimensiones de los tubos ensayados.

Tubo	Espesor promedio (cm)	Diametro promedio (cm)	c (cm)	f (cm)	l_1 (cm)
60-6-120-A	6,4	60	16,5	12	131,5
60-6-120-F	6,7	60,4	17	10	127,5
60-6-120-FA	6,475	60	15,5	11,5	129
40-4,5-100-A	4,3	40	11	10	108
40-4,5-100-F	4,325	40,5	13	9	107,5
40-4,5-100-FA	4,1	40,25	13	8,5	108

Procedimiento de ensayo y resultados

Previo al ensayo se prepararon los tubos aplicando una pintura superficial a base de látex, lo que facilita la identificación de fisuras durante el ensayo (Fig. 3.20).



Fig 3.20. *Prensa de ensayo*

Para la medición de deformaciones se colocó un flexímetro como el que se observa en la figura 3.21, cuya lectura se llevó a cabo hasta la carga que provocó la primera fisura, cuidando que el instrumento no sufra daños por la rotura del tubo.



Fig. 3.21. *Flexímetro digital*

Las figuras 3.22 y 3.23 muestran los diagramas carga-tiempo de los ensayos para los tubos 40-4,5-100-A y 40-4,5-100-FA. En el caso del tubo 40-4,5-100-A, el ensayo se llevó a cabo hasta alcanzar la carga de rotura sin realizar una descarga, mientras que para el tubo 40-4,5-100-FA, al llegar al 95% de la carga última (Fu), se efectuó una descarga hasta alcanzar la carga que provocó la primera fisura, manteniéndola durante un minuto para obtener información sobre la ductilidad y resistencia a cargas fluctuantes (EN 1916, 2002).

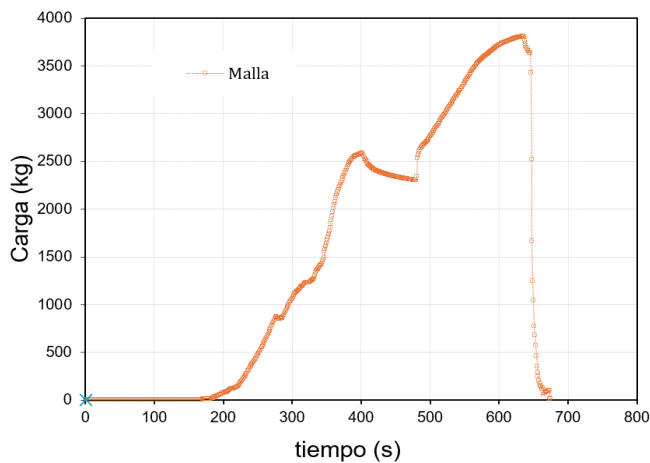


Fig 3. 22. Gráfico carga-tiempo 40-4,5-100-A

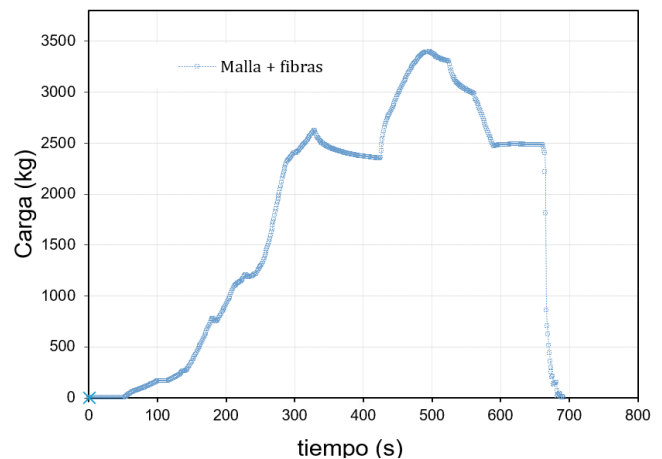


Fig 3. 23. Gráfico carga-tiempo 40-4,5-100-FA

Para el tubo reforzado únicamente con fibras (4 kg/m^3) el proceso de carga se ajustó a los lineamientos de la norma europea; sin embargo y como se observa en la figura 3.24, no se alcanzó la carga de rotura preestablecida, por lo que el ensayo se dio por finalizado sin realizar la descarga.

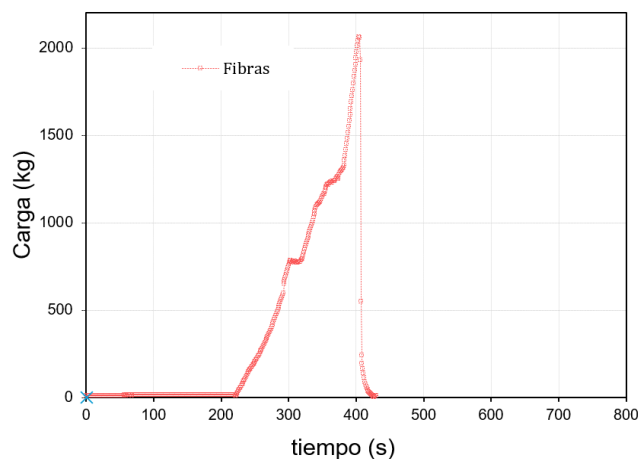


Fig. 3.24. Gráfico carga-tiempo 40-4,5-100-F

Los resultados de los ensayos de los tubos se presentan en la tabla 3.4, utilizando la nomenclatura establecida.

Tabla 3.4 - Resultados de ensayos en tubos $\phi 40$

Código	Carga fisuración (kg/m)	Carga rotura (kg/m)
40-4,5-100-A	2500	3810
40-4,5-100-F	2064	2064
40-4,5-100-FA	2400	3397

Para los tres tipos de refuerzos se alcanzó la carga de prueba correspondiente al caño Clase 1 (IRAM 11629) de 2000 kg/m. Sin embargo, en cuanto a la carga de rotura de 3000 kg/m, el refuerzo con fibras resultó insuficiente alcanzando 64% de la carga y presentando una rotura frágil al alcanzar la carga de fisuración. El refuerzo convencional con solo malla alcanzó las mayores cargas, tanto de prueba como máxima alcanzada.

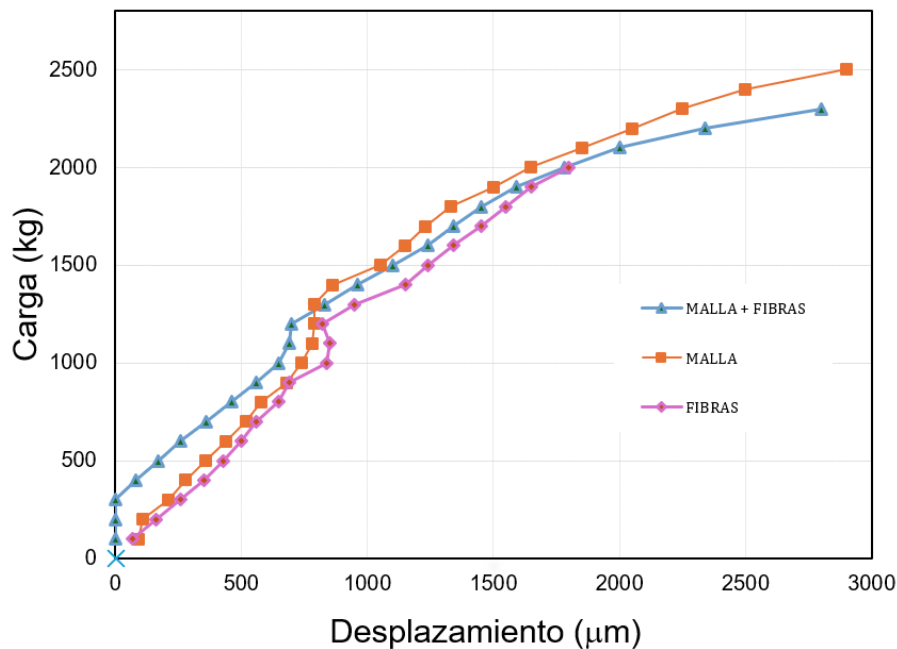


Fig. 3.25. Gráfico carga-deformación en servicio

La figura 3.25 muestra los gráficos carga - deformación de los tres tubos ensayados, se puede observar que el comportamiento previo a la fisuración no varía sustancialmente en ninguno de los tres casos por lo que no hay un aporte por parte de las fibras en el estado de servicio.



Fig 3.26 - *Modo de rotura (40 - 4,5 - 100 - FA)*



Fig 3.27 - *Modo de rotura (40 - 4,5 - 100 - A)*



Fig 3.28 - *Modo de rotura (40 - 4,5 - 100 - F)*

En cuanto al modo de rotura, los tubos 40-4,5-100-A y 40-4,5-100-FA mostraron patrones de falla similares (Fig. 3.26 y 3.27). En contraste, el tubo reforzado únicamente con fibras (40-4,5-100-F) presentó una variación en su modo de falla (Fig. 3.28) caracterizada por una fisura orientada posiblemente provocada por un defecto de fabricación (Fig. 3.29) detectado previo a la realización del ensayo.



Fig 3.29 - *Fisura preexistente (40 - 4,5 - 100 - F)*

Las figuras 3.30 y 3.31 muestran los diagramas carga-tiempo de los ensayos para los tubos 60-6-120-A y 60-6-120-FA. En el caso del tubo 60-6-120-A, no se realizó una descarga en el ensayo, mientras que para el tubo 60-6-120-FA al llegar al 95% de la carga última (Fu) se efectuó una descarga hasta alcanzar la carga que provocó la primera fisura, manteniéndola durante un minuto para obtener información sobre la ductilidad y resistencia a cargas fluctuantes (EN 1916, 2002).

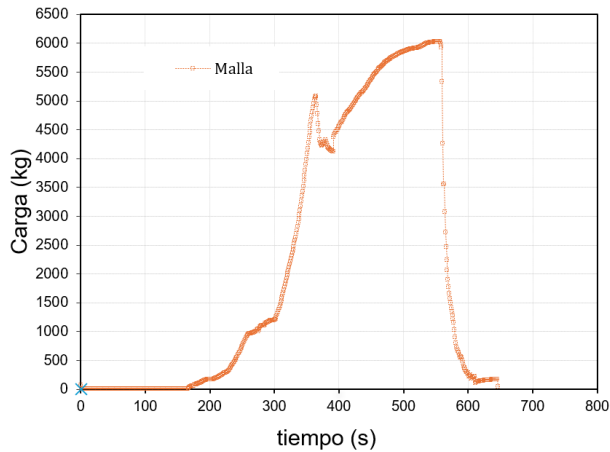


Fig 3. 30. Gráfico carga-tiempo 60-6-120-A

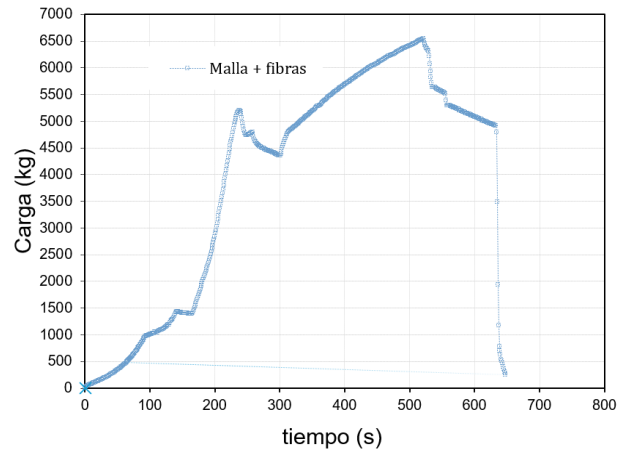


Fig 3. 31. Gráfico carga-tiempo 60-6-120-FA

Con respecto al tubo reforzado únicamente con fibras (4 kg/m³), como se observa en la figura 3.32, no se alcanzó la carga de rotura preestablecida, por lo que el ensayo se dio por finalizado sin realizar la descarga.

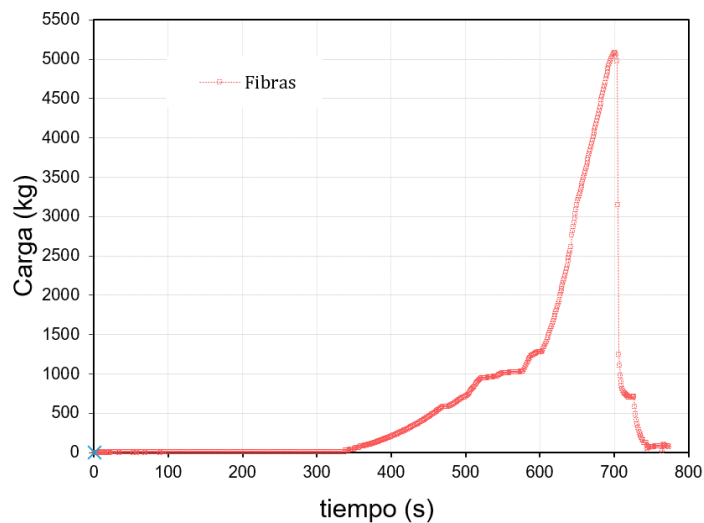


Fig.3.32. Gráfico carga-tiempo 60-6-120-F

Los resultados de los ensayos de los tubos se presentan en la tabla 3.5, utilizando la nomenclatura establecida.

Tabla 3.5 - Resultados de ensayos en tubos $\phi 60$

Código	Carga fisuración (kg/m)	Carga rotura (kg/m)
60-6-120-A	4233	5028
60-6-120-F	4238	4238
60-6-120-FA	4338	5455

Para los tres tipos de refuerzos se alcanzó la carga de prueba correspondiente al caño Clase 1 (IRAM 11629) de 3000 kg/m; sin embargo, en cuanto a la carga de rotura de 4500 kg/m, el refuerzo con fibras resultó insuficiente llegando al 94% de la carga. El refuerzo con malla y fibras presentó el mejor comportamiento superando la carga de fisuración en 44% y la de rotura en 21%.



Fig. 3.33 - Modo de rotura (60 - 6 - 120 - FA)

Fig 3.34 - Modo de rotura (60 - 6 - 120 - F)



Fig 3.35 - Modo de rotura (60 - 6 - 120 - A)

En cuanto al modo de rotura, los tubos 60-6-120-A y 60-6-120-FA mostraron patrones de falla similares (Fig. 3.33 y 3.34). En contraste, el tubo reforzado únicamente con fibras (60-6-120-F) presentó una variación en su modo de falla (Fig. 3.35) al caer la resistencia al formarse la primera fisura.

El análisis de deformaciones no se llevó a cabo para el caso de los tubos de 60 cm, por no disponer de soportes adecuados para la correcta colocación del flexímetro.

Una vez retirada la carga, se procedió a medir los anchos de las fisuras presentes en su superficie (Fig. 3.36). Se distinguieron las fisuras internas, localizadas en la zona de apoyo de la carga, de las externas, situadas en los costados. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.6.



Fig 3.36 - Medición del ancho de fisura

Tabla 3.6 - Anchos de fisura medidos

Tubo	Ancho de fisura exterior (mm)	Ancho de fisura exterior (mm)
60-6-120-A	1	1,5
60-6-120-F	2	2
60-6-120-FA	0,85	1
40-4,5-100-A	1,25	1
40-4,5-100-F	1,2	0,9
40-4,5-100-FA	0,9	0,75

Análisis económico

Para llevar a cabo el análisis económico se consideran los precios actualizados a *noviembre de 2024*, en pesos argentinos.

Con el objetivo de determinar con precisión los jornales de mano de obra y los volúmenes reales de hormigón, incluyendo el desperdicio, la empresa Viguetec realizó una prueba consistente en la producción continua de caños de un mismo diámetro durante 10 días consecutivos. A partir de los datos obtenidos, que incluyen los volúmenes totales de material utilizado, el tiempo empleado y la cantidad de ejemplares fabricados, es posible calcular de manera exacta los requerimientos por unidad producida. Teniendo en cuenta esto se calcula el costo-costo de cada unidad.

Además, se añade 10% adicional al valor del costo-costo en concepto de insumos empleados, más amortización de los equipos y más mantenimiento.

Para el caso de los caños que no llevan refuerzo con armadura, se tiene en cuenta una reducción en el tiempo de mano de obra en concepto de armado de la malla, el mismo se estima que es de aproximadamente 20 minutos por ejemplar.

Los cálculos en detalle del análisis económico se encuentran en el *Anexo B*.

Tabla 3.7 - Comparativa entre alternativas.

RESUMEN COSTO-COSTO	CAÑO Ø40		CAÑO Ø60	
CON REFUERZO IRAM	\$	29.552	\$	57.488
CON REFUERZO IRAM + FIBRAS (4kg/m ³)	\$	32.159	\$	65.135
CON FIBRAS (4kg/m ³)	\$	20.643	\$	44.567
SIN REFUERZO	\$	18.036	\$	36.920

Tabla 3.8 - Comparativa caño reforzado con fibras vs otras alternativas.

COMPARATIVA CAÑO CON FIBRAS 4kg / m³ - OTRAS ALTERNATIVAS				
ALTERNATIVA A COMPARAR	CAÑO Ø40 CON FIBRAS		CAÑO Ø60 CON FIBRAS	
	AHORRO	%	AHORRO	%
CON REFUERZO IRAM	\$ 8.909	30%	\$ 12.921	22%
CON REFUERZO IRAM + FIBRAS (4kg/m³)	\$ 11.516	36%	\$ 20.568	32%
SIN REFUERZO	-\$ 2.607	-14%	-\$ 7.647	-21%

Como se observa en la tabla 3.7 de comparación, la opción de caños reforzados con fibras destaca como una alternativa económicamente atractiva. La tabla 3.8 presenta la comparación tomando con base la alternativa reforzada solo con fibras frente a las demás, donde es posible apreciar que su implementación genera un ahorro del 23% para los caños de Ø40 y del 13% para los de Ø60 en comparación con la alternativa comercial. Asimismo y al compararlos con la opción que cumple con la norma IRAM, el ahorro asciende al 30% y 22% para los caños de Ø40 y Ø60, respectivamente, evidenciando una diferencia desde el punto de vista económico.

Conclusiones y recomendaciones

El comportamiento observado a partir de los ensayos fue diferente dependiendo de la geometría de los tubos ensayados.

Para los tubos de hormigón de 40 cm de diámetro interno y 4,5 cm de espesor, aunque el refuerzo con fibras resulta económicamente rentable, no ha demostrado ser eficaz para mejorar la resistencia y el comportamiento post-fisuración. Los ensayos realizados con refuerzo de fibras han evidenciado una rotura frágil caracterizada por una caída abrupta de la resistencia donde las fibras no lograron incrementar la tenacidad del material; además, el tamaño de las fisuras en el momento de la rotura fue similar al observado en el tubo reforzado con malla, lo que indica que las fibras utilizadas, tanto por su forma como por sus propiedades mecánicas, no son las adecuadas.

Además, se presentaron inconvenientes como deformaciones por asentamiento plástico que tanto con fibras solas como con el refuerzo adicional de mallas no hacen esta opción viable. Estas deformaciones generaron fisuras antes de los ensayos (o antes

de la puesta en servicio del tubo) lo que afectó negativamente su desempeño estructural.

Con respecto a los tubos de 60 cm de diámetro y 6 cm de espesor, en el reforzado únicamente con fibras se observó una mejor respuesta estructural frente a las cargas aplicadas superando en 51% la carga de fisuración pero mostrando una falla frágil ya que al formarse la primera fisura rompió, alcanzando el 94% de la carga requerida por norma IRAM 11629.

En cuanto al reforzado con malla y fibra, obtuvo el mejor comportamiento frente a las demás alternativas, alcanzando las mayores cargas tanto de fisuración como de rotura. Comparando con la alternativa reforzada únicamente con malla, superó la carga de fisuración en 2,4% y la carga de rotura en 8%.

Al retirar la carga, se observó un mayor cierre de fisuras en los tubos reforzados con malla y fibra en ambos diámetros. En los tubos de 60 cm de diámetro, la opción reforzada solo con fibras presentó un mayor cierre de fisuras en comparación con la opción reforzada únicamente con malla; en los tubos de 40 cm, el menor cierre de fisuras se registró en los reforzados solo con fibras, lo que sugiere que las fibras no fueron efectivas en este caso; este comportamiento podría atribuirse al pequeño espesor del tubo y los defectos generados durante el proceso de fabricación.

Este resultado es consistente con lo mencionado anteriormente, ya que los tubos de 60 cm cuentan con un espesor que probablemente sea suficiente para prevenir el agrietamiento por asentamiento plástico, mejorando su integridad estructural y por consiguiente, su resistencia.

CAPÍTULO

4

Aspectos ambientales

Introducción

En este capítulo se busca comparar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y el consumo de energía asociados a la fabricación de polipropileno y acero en el ámbito de la construcción.

Este análisis es especialmente complejo ya que depende de múltiples factores como los procesos de fabricación, las tecnologías empleadas, la calidad de las materias primas y la ubicación de las plantas de producción; por ello el objetivo principal es presentar una comparación basada en valores aproximados, obtenidos a partir de la recopilación y análisis de datos de investigaciones realizadas por diversos autores en diferentes regiones del mundo.

Debido a la complejidad mencionada, el estudio se centrará exclusivamente en los perdigones de polipropileno como producto final (Fig. 4.1); no se considerarán las emisiones ni el consumo energético asociados a la fabricación de las fibras: su envasado, transporte u otros procesos relacionados con su uso como elemento en la construcción.



Fig. 4.1 - *Perdigones de polipropileno (TaiYuan Bojun Co. Ltd)*

El reciclaje es una práctica favorable para el medio ambiente, ya que generalmente reduce el consumo de recursos naturales y energía en los procesos de fabricación, no obstante su efectividad depende tanto de las propiedades del material como de las tecnologías disponibles para su reprocesamiento.

En este análisis se diferencia entre acero primario y reciclado; el acero primario se produce a partir de materias primas vírgenes, mientras que el acero reciclado proviene de chatarra. En términos generales, el acero reciclado conlleva un menor consumo energético y una reducción en las emisiones de carbono, debido a la simplificación de los procesos y al menor uso de recursos naturales.

Al finalizar la vida útil de una estructura, es posible reciclar el acero de refuerzo separándolo del hormigón mediante procesos mecánicos y magnéticos, triturarlo y reutilizarlo en la fabricación de nuevas barras. Sin embargo, esta práctica no es común en el norte de Argentina, lo que impide considerar el potencial beneficio ambiental que podría ofrecer el uso del acero como refuerzo en el hormigón.

El polipropileno, aunque es reciclable, experimenta un deterioro en sus propiedades mecánicas, como la resistencia y la flexibilidad con cada ciclo de reciclaje. Por ello, el polipropileno reciclado no es adecuado para aplicaciones estructurales, como su uso en fibras de hormigón, donde estas propiedades son esenciales.

Análisis de los factores ambientales

Un parámetro importante en el análisis ambiental es la emisión de dióxido de carbono (CO₂) en la producción de un producto, ya que este gas es el principal encargado de producir el efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Un indicador muy utilizado es el de kilogramo de CO₂ producido por cada kilogramo de producto fabricado (kgCO₂/kg) ya que permite independizar de la cantidad total de las emisiones y permite su comparación entre distintos productos.

Un estudio realizado por Alsabri et al. (2021) demostró que el proceso de producción de polipropileno introduce muchos contaminantes al medio ambiente y se estimó que la emisión bruta de CO₂ en dicho proceso es de 1,58 kgCO₂/kg. Además, según la página web de Plastics Europe se obtiene una emisión aproximada de entre 1,5 y 2 kgCO₂/kg en plantas de fabricación a lo largo de Asia y Europa.

En cuanto al acero, la World Steel Association señala que la emisión de CO₂ del acero primario ronda entre 1,8 y 2,5 kgCO₂/kg y entre 0,4 y 0,7 kgCO₂/kg para el acero reciclado.

El consumo energético también es un parámetro relevante en la evaluación del impacto ambiental, ya que refleja la energía requerida durante la fabricación de un material. Este consumo, medido en kilovatios-hora por kilogramo (kWh/kg) es un indicador indirecto del impacto ambiental, especialmente en regiones donde la electricidad proviene de fuentes no renovables.

Según Bousted (2005) en Europa se obtiene un consumo eléctrico en la producción de polipropileno de entre 15 y 26 kWh/kg y en cuanto al acero, la World Steel Association también señala que el consumo eléctrico en la fabricación del acero primario ronda entre 25 y 35 kWh/kg y entre un 4 y 6 kWh/kg para el acero reciclado.

Con los datos obtenidos, se realiza una comparativa de emisiones de CO₂ y de consumo energético unitario y totales entre los distintos tipos de refuerzos representados en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 - Emisiones de CO₂ y consumo energético totales

Material	Proporción típica (kg/m ³)	Emisiones de CO ₂ (kg/kg)	Emisiones de CO ₂ totales (kg/m ³)	Consumo de energía (kWh/kg)	Consumo de energía total (kWh/m ³)
Polipropileno	2-jun	1,5-2	3-die	15-26	30-156
Acero primario	50-80	1,8-2,5	90-200	25-35	1250-2800
Acero reciclado	50-80	0,4-0,7	20-35	4-jun	200-480

En las losas, se utiliza una cuantía típica de acero de 3 kg/m². Al incorporar una dosificación de fibras de polipropileno de 3 kg/m³, esto equivale a una proporción de 0,15 kg/m². Por otro lado, en el caso de los tubos, se emplea un promedio de 7,8 kg de acero. Con una dosificación de fibras de 4 kg/m³, se obtendría una proporción de 0,6 kg de fibras. De este modo y según la tabla 4.1, se tienen las emisiones y consumos promedios indicados en la tabla 4.2 y 4.3.

Tabla 4.2 - Emisiones de CO₂ y consumo energético promedio en losas

Material	Proporción típica (kg/m ²)	Emisiones de CO ₂ (kg/kg)	Emisiones de CO ₂ totales (kg/m ³)	Consumo de energía (kWh/kg)	Consumo de energía total (kWh/m ³)
Polipropileno	0,15	1,75	0,26	20,5	3,08
Acero primario	3	2,15	6,45	30	90,00
Acero reciclado	3	0,55	1,65	5	15,00

Tabla 4.3 - Emisiones de CO₂ y consumo energético promedio en lasas

Material	Proporción promedio (kg)	Emisiones de CO ₂ (kg/kg)	Emisiones de CO ₂ totales (kg/m ³)	Consumo de energía (kWh/kg)	Consumo de energía total (kWh/m ³)
Polipropileno	0,60	1,75	1,05	20,5	12,30
Acero primario	7,80	2,15	16,77	30	234,00
Acero reciclado	7,80	0,55	4,29	5	39,00

Es importante notar que el dióxido de carbono y el consumo energético no son los únicos parámetros que intervienen en un impacto ambiental, pero son los grandes contribuyentes que se consideran importantes de ser analizados.

Conclusiones

Si bien cada uno de los datos obtenidos presentan rangos amplios en sus valores, han resultado útiles para establecer un orden que permite realizar comparaciones fiables, destacando las diferencias notables entre los distintos refuerzos.

En términos generales, si se considera la utilización de un único refuerzo, debido a la menor proporción de fibras de polipropileno utilizadas en comparación con el acero en el hormigón, las emisiones de carbono totales y el consumo energético total del polipropileno son significativamente inferiores a los del acero, incluso considerando el acero reciclado; sin embargo, estas cifras pueden variar dependiendo de si se incluye el proceso de fabricación específico de las fibras.

La comparativa se realizó sin considerar la reutilización del acero luego de la vida útil del hormigón, pero en el caso que pudiera ser reciclable, podría ser posible obtener el mejor rendimiento ambiental.

Por otro lado, el polipropileno es más adecuado para aplicaciones donde la reducción de emisiones iniciales es prioritaria, aunque su impacto ambiental a largo plazo sea menos favorable debido a sus limitaciones en reciclaje y reutilización.

Además, en elementos estructurales con ambientes de exposición muy agresivos, donde pudiera limitarse la vida útil de la pieza por deterioros generados por corrosión, los refuerzos con fibras sintéticas juegan un papel interesante por su mayor duración, sin la necesidad de refuerzo, demolición o recambio de la estructura, lo cual se traduce en menos recursos naturales utilizados.

CAPÍTULO

5

Modelado numérico

Introducción

El presente capítulo aborda el modelado numérico de los ensayos realizados en el marco de la presente investigación: ensayo a flexión de forjados (IRAM 11555 - 1996) y ensayo de tres aristas en tubos de hormigón (EN 1916 - 2002).

El modelado numérico es una técnica computacional utilizada para simular y analizar el comportamiento de sistemas físicos mediante la resolución de modelos matemáticos. Estos modelos se expresan mediante ecuaciones que representan las características esenciales del sistema y se resuelven con el uso de algoritmos numéricos y computadoras en lugar de depender de modelos analíticos exactos que pueden ser muy complejos o inviables.

A través del modelado numérico, es posible estudiar los efectos de parámetros como la geometría, las propiedades de los materiales o las cargas aplicadas, lo que facilita la comprensión del comportamiento del sistema o proceso bajo condiciones controladas. Esta capacidad de simulación es eficiente ya que reduce el tiempo y los recursos necesarios en comparación con los ensayos físicos; sin embargo, no los reemplaza sino los complementa, permitiendo prever el comportamiento y explorar diferentes alternativas de diseño antes de realizar las pruebas físicas.

Uno de los métodos de simulación numérica es el de elementos finitos (FEM por su denominación en inglés) que permite aproximar la solución mediante la discretización del dominio en subdominios pequeños llamados elementos finitos. Para cada elemento se resuelve la ecuación que describe su comportamiento físico, la cual se aproxima mediante métodos variacionales, transformando el problema diferencial en un sistema algebraico más sencillo de resolver. Luego, las soluciones parciales se ensamblan en un sistema global teniendo en cuenta las condiciones de contorno y las interacciones entre los elementos.

En este estudio se emplea el modelado numérico mediante el FEM utilizando Code Aster dentro de la plataforma Salome. Code Aster es el programa que resuelve el sistema de ecuaciones que describe el comportamiento del sistema mientras que la plataforma Salome permite realizar el preproceso (definición de geometría, generación de la malla) y el postproceso (análisis y visualización de resultados).

El propósito es generar un modelo representativo del sistema bajo análisis, que refleje las condiciones del ensayo para identificar las zonas de mayor tensión y deformación, facilitando la detección de áreas críticas que puedan presentar riesgos de falla.

Alcances del modelado

El hormigón reforzado con fibras (HRF) se caracteriza por la inclusión de fibras cortas y discretas distribuidas aleatoriamente en su matriz que mejoran su comportamiento al actuar como refuerzo cuando el material comienza a fisurarse, controlando la propagación de grietas y reduciendo la fragilidad del hormigón convencional.

En el caso del HRF con macrofibras sintéticas, para las dosificaciones adoptadas en esta investigación, las fibras modifican el comportamiento no lineal del hormigón especialmente en la fase de fisuración, pero su influencia en la respuesta elástica global es mínima.

Para realizar el modelado numérico del HRF es necesario definir su ecuación constitutiva, pero aún no existe un modelo único que describa con precisión el aporte de las fibras debido a la complejidad inherente al material. Esta dificultad se debe a que el comportamiento depende de varios factores, como la matriz de hormigón, el tipo, la disposición y la cantidad de fibras.

Dada la ausencia de un modelo único que abarque los factores mencionados, el análisis del HRF en este estudio se realiza considerando el material como homogéneo en términos de su comportamiento macroscópico. Este enfoque simplifica significativamente la formulación del modelo y reduce los costos computacionales asociados con la simulación, lo que permite que pueda ser ejecutado en una computadora personal estándar y sin requerir equipos de alto rendimiento.

Al tratar el HRF como un material homogéneo, es posible utilizar modelos constitutivos del hormigón con ajustes que integren el comportamiento derivado de la adición de fibras, sin necesidad de recurrir a formulaciones complejas para cada tipo de fibra o disposición. Esto se debe a que el principal aporte de las fibras ocurre en la etapa post-fisuración, donde se incrementa la resistencia residual.

Para modificar la curva tensión-deformación, es necesario determinar la energía disipada post-rotura que se diferencia del hormigón convencional cuya energía representa el incremento en la tenacidad del material gracias al refuerzo con fibras. La curva es definida a través del ensayo a flexión en prismas con entalladura (EN 14651) mencionado en el *Capítulo 1 – Comportamiento del HRF* para la dosis adoptada de macrofibras de polipropileno (Fig. 5.1).

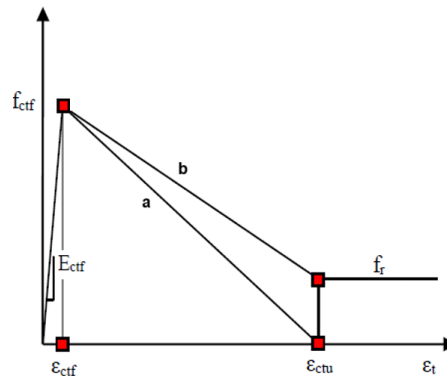


Fig. 5.1. Diferencia hormigón convencional (a) y hormigón reforzado con fibras (b) (Campioni et al., 2008)

Aunque este enfoque homogéneo no refleja completamente la realidad microestructural del material, ofrece una aproximación para los objetivos de este estudio, centrados en prever el comportamiento global e identificar cualitativamente las zonas críticas.

Un estudio que contemple a las fibras debe considerar el comportamiento en la interfaz que involucra adhesión, fricción y anclaje mecánico y ser capaz de representar el fenómeno de arrancamiento que predomina en la forma de falla.

Además, al discretizar el material, se debe tener en cuenta tanto sus propiedades mecánicas como la orientación de las fibras en función de las direcciones de los esfuerzos: una fibra orientada paralelamente al esfuerzo de tracción no contribuye al aumento de la resistencia post-fisura, lo que reduce la dosis efectiva adoptada. Estos modelos requieren una gran cantidad de cálculos y simulaciones para capturar adecuadamente el comportamiento y la interacción de las fibras con el hormigón, lo que aumenta el tiempo y los recursos computacionales necesarios, especialmente en modelos que manejan un gran número de elementos.

Por otro lado, se señala que las muestras experimentales son limitadas, lo que impide generar un modelo global que cubra todo el comportamiento del material; no obstante, este modelo sirve como punto de partida para futuros estudios.

Modelado de losas con viguetas pretensadas

Para realizar la simulación, en primer lugar, es necesario definir la geometría y la malla de discretización utilizada en el FEM; en este caso se generó una malla estructurada, cuya disposición varía según el tipo de componente analizado.

Para el modelado de la losa se emplearon enfoques distintos según las partes que la componen. En las viguetas se utilizó un modelo tridimensional en el que la armadura se representa mediante barras, mientras que la capa de compresión se modeló como placa, lo que permitió optimizar el rendimiento computacional. En este sentido, el modelo 3D presenta un mayor costo computacional en comparación con el modelo de placa ya que maneja una mayor cantidad de elementos y grados de libertad, lo que incrementa la complejidad de los cálculos y el tiempo de procesamiento (Fig. 5.2).

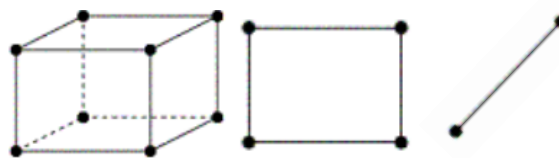


Fig. 5.2. *Elementos finitos*

El modelo tridimensional de las viguetas corresponde a elementos finitos cuya malla de soporte es volumétrica, utilizando en este caso hexaedros con tres grados de libertad en cada nodo.

Para la capa de compresión se utiliza la teoría de placas que se basa en pequeños desplazamientos y deformaciones, con elementos cuadrangulares. En este caso se asume que los desplazamientos varían linealmente en el espesor y que las tensiones transversales son despreciables aplicando la hipótesis de tensión plana.

El modelo empleado para representar la armadura de las viguetas se basa en la formulación clásica de barras donde los elementos son segmentos con dos nodos, considerando solo el comportamiento axial de la barra.

La geometría y malla resultante se observa en la Figura 5.3.

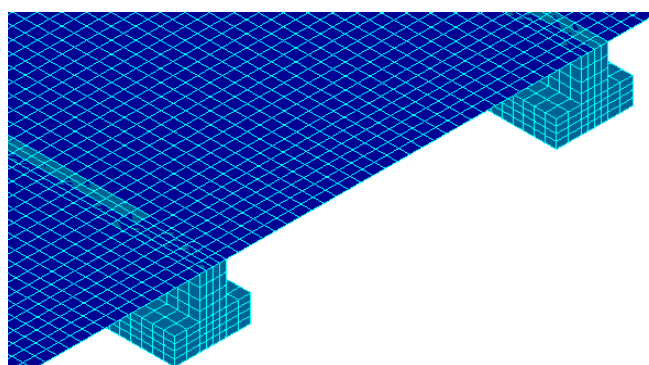


Fig. 5.3. Geometría y mallado

La configuración del problema se basó en el proceso constructivo de la losa y las solicitaciones previas al ensayo, simulando el tesado de las viguetas y la carga de la capa de compresión para luego aplicar las cargas correspondientes al ensayo descrito en la Norma IRAM 11555 - 1996.

Las propiedades de los diferentes componentes de la losa se describen en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Propiedades mecánicas: losa con viguetas pretensadas.

	Viguetas	Armadura (C1950)	Capa de compresión
E (MPa)	27806	200000	21019
u	0,2	0,3	0,2
γ (kN/m³)	24	78,5	24
f_c (MPa)	35	-	19,5
f_t (MPa)	5,92	1600	4,31

Las resistencias de la capa de compresión se definieron a partir de los resultados de los ensayos de rotura a tracción por flexión y a compresión, descritos en el Capítulo 2 para el HRFS con 3 kg/m³ de macrofibras sintéticas.

El modelo se enfocó en la fase lineal debido a que los ensayos no registraron deformaciones bajo cargas posteriores a la carga de servicio, lo que imposibilita la calibración del modelo en las etapas no lineales; la norma únicamente establece un control de fisuración hasta la carga de servicio ya que allí se desarrollan las fisuras admisibles. Si se necesitara un control adicional, sería necesario disponer de otro

instrumento para medir deformaciones, ya que el actual podría romperse por las grandes deformaciones en el periodo de rotura.

En primer lugar, se ejecutó el proceso de tesado aplicando una tensión en los cables de 1327 MPa (Fig. 5.2) teniendo en cuenta las pérdidas instantáneas del esfuerzo cuyas características geométricas se detallan en el Capítulo 2.

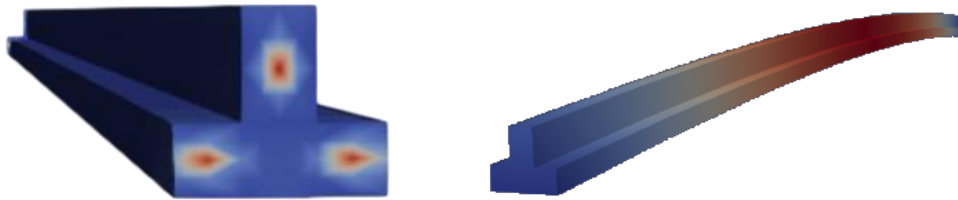


Fig 5.2. *Tesado de viguetas pretensadas.*

Posteriormente, se cargó la capa de compresión de 5 centímetros aumentando el espesor a 9 cm en el contacto con las viguetas para una representación adecuada (Fig. 5.3).

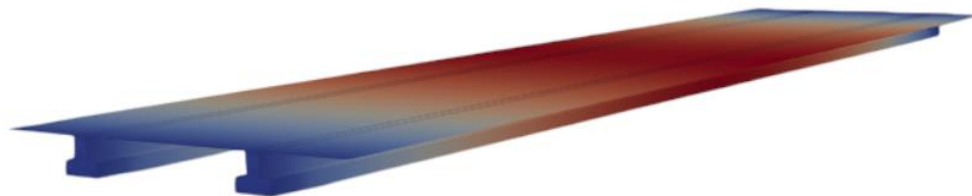


Fig 5.3. *Configuración geométrica del forjado (Estado previo al ensayo)*

Luego, se simuló el ensayo de flexión detallado en la norma IRAM 11556 (1996) donde se aplican cargas distribuidas uniformemente sobre el ancho de la losa en los tercios de la luz.

En el modelado numérico, la secuencia de carga fue aplicada a partir de instantes de cálculo predefinidos (Fig. 5.4).

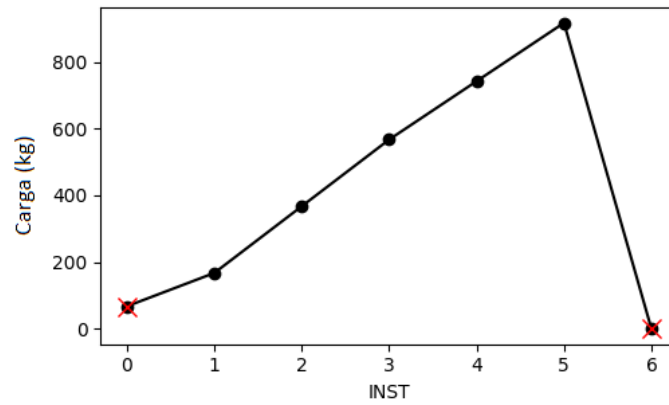


Fig 5.4. Secuencia de carga aplicada al forjado.

El modelo se calibró para replicar el comportamiento elástico del sistema bajo cargas de servicio, buscando una concordancia con los resultados obtenidos.

Los resultados se observan en la figura 5.5, junto a los determinados experimentalmente en el capítulo 2.

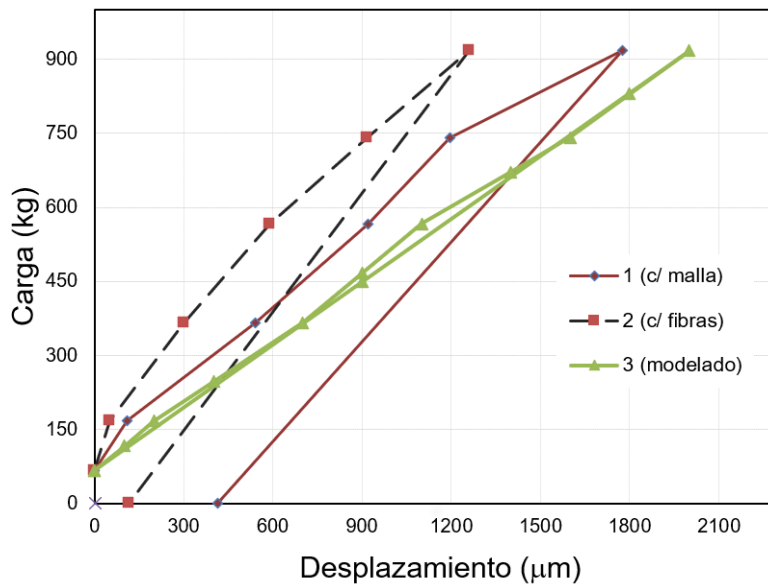


Fig 5.5. Comparación de resultados.

Se observa que las deformaciones alcanzadas son superiores a las del ensayo, lo que hace necesario ajustar la simulación mediante un modelado discreto que considere la interfaz fibra-matriz y su distribución aleatoria.

En la figura 5.6 se observa la deformada al alcanzar la carga de servicio, donde la escala fue aumentada en 50% a fin de obtener la representación gráfica.

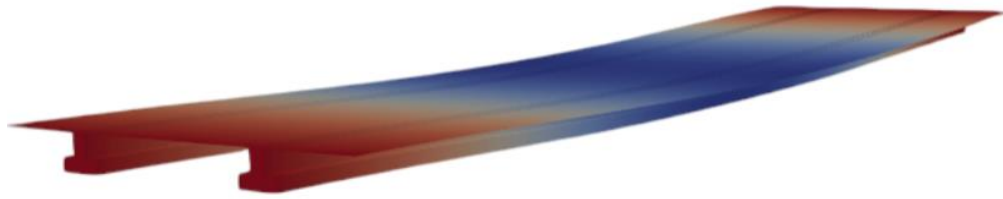


Fig 5.6. *Deformada para carga de servicio.*

Modelado de tubos de hormigón

Para el modelado de los tubos de hormigón se utilizaron dos enfoques: uno basado en deformaciones planas y otro tridimensional. El primer modelo se utilizó inicialmente para obtener una aproximación del comportamiento estructural, el cual emplea elementos finitos cuyas mallas de soporte son superficiales, con nodos que poseen dos grados de libertad. Posteriormente se desarrolló un modelo tridimensional más detallado para capturar con mayor precisión el comportamiento real del sistema.

En cuanto al mallado, para el modelo en deformaciones planas se utilizaron elementos cuadrangulares, mientras que en el tridimensional se emplearon elementos hexaédricos. La geometría y malla resultante se ilustran en la Figura 5.7 y 5.8.

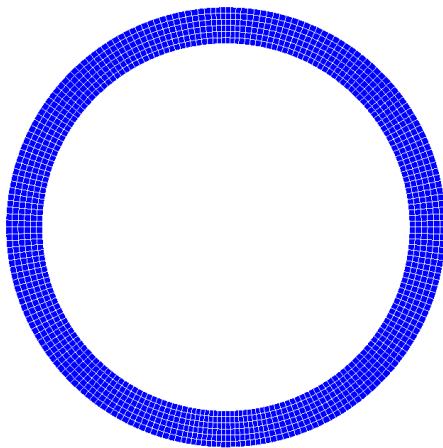


Fig 5.7. *Geometría y mallado (Def. planas)*

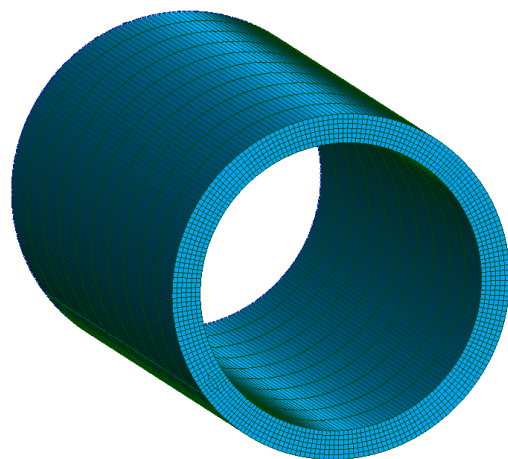


Fig 5.8. *Geometría y mallado (3D)*

El comportamiento mecánico y el desempeño estructural de los tubos fue analizado mediante la simulación del ensayo de tres aristas según la norma EN 1916 - 2002. Las propiedades de los tubos simulados se describen en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. *Propiedades de los tubos de hormigón.*

	40-4,5-100-F	60-6-120-F
Di (mm)	400	600
e (mm)	45	60
L (m)	1	1,2
E (MPa)	25743	25743
u	0,2	0,2
γ(kN/m³)	24	24
f'c (MPa)	30	30
ft (MPa)	5,47	5,47

Se aplicó una carga lineal sobre la parte superior del tubo según lo descrito en la norma, cuya secuencia se puede observar en la figura 5.9 y 5.10 para los tubos ensayados.

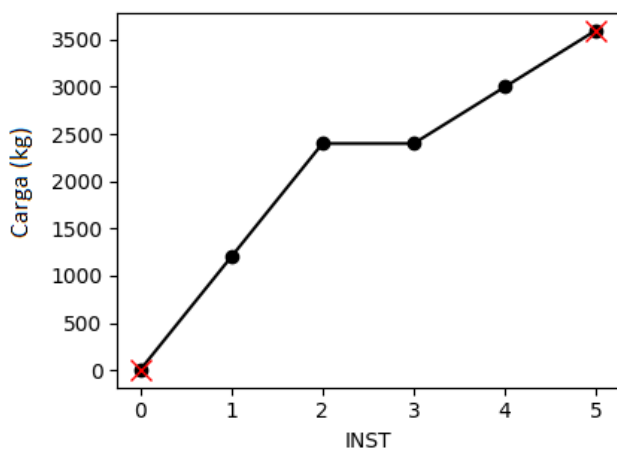


Fig 5.9. *Secuencia de carga (40-4,5-100-F)*

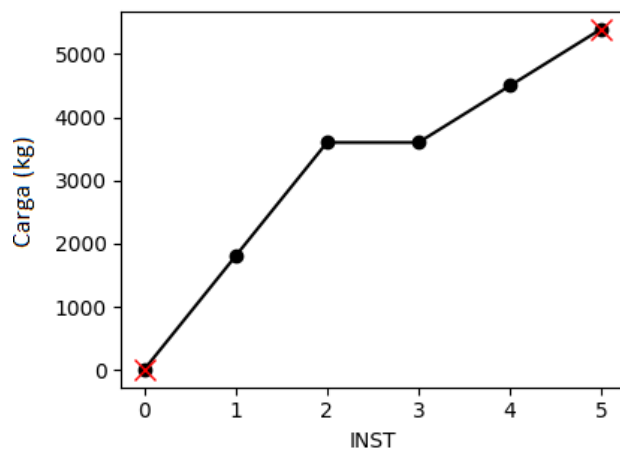


Fig 5.10. *Secuencia de carga (60-6-120-F)*

Los resultados obtenidos muestran concordancia con el modo de fisuración de este tipo de caños, concentrando mayores tensiones de tracción en los sectores internos de la corona (Fig. 5.9) y en los sectores externos de los laterales (Fig. 5.10) las que finalmente determinan la falla (Fig. 5.11).

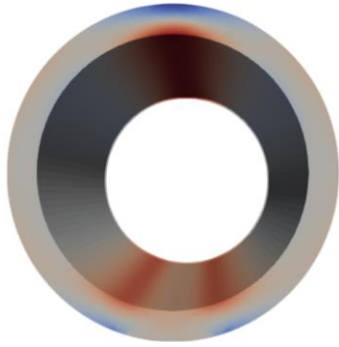


Fig 5.9. Localización de tensiones S_{xx} .



Fig 5.10. Localización de tensiones S_{yy} .



Fig 5.11. Localización de fisuras del ensayo experimental.

Para el caso de los tubos 40-4,5-100-F la carga de fisuración es de 2.300 kg y para los tubos 60-6-120-F, dicha carga es de 3.603 kg (Tabla 5.3) en ambos la tensión crítica de tracción se alcanza inicialmente en la cresta.

Tabla 5.3. Comparación de cargas.

40 - 4,5 - 100 - F		60 - 6 - 120 - F	
Carga de fisuración numérico (kg)	Carga de fisuración ensayo (kg)	Carga de fisuración numérico (kg)	Carga de fisuración ensayo (kg)
2300	2145	3603	

Se observa un error en la predicción del 7% para el tubo de 40 cm (40-4,5-100-F) mientras que en el tubo de 60 cm (60-6-120-F) el error es del 16%.

Conclusiones y recomendaciones

El modelo numérico utilizado ha mostrado ser eficaz para predecir el comportamiento general del sistema y la localización de las zonas críticas de falla. Sin embargo, se ha observado que subestima el impacto de las fibras en la fase pre-fisura, ya que las deformaciones obtenidas en el modelo fueron mayores que las reportadas en los ensayos experimentales y el error en la predicción de la carga de fisuración varía del 7 al 16%.

Este comportamiento podría estar relacionado con la falta de un tratamiento explícito de las fibras dentro del modelo ya que en su formulación actual no se consideran como elementos discretos independientes de la matriz cementicia.

Como parte de futuras investigaciones, se propone la implementación de un micromodelo que considere las fibras como entidades discretas, permitiendo simular más detalladamente su interacción con la matriz. Este enfoque incluirá fenómenos como el desprendimiento de las fibras y los efectos que ocurren en la zona de enlace cuando alcanzan la fisuración, considerando las propiedades mecánicas de las fibras y su proporción volumétrica en la mezcla total.

Como parte de futuras investigaciones, se propone la implementación de un micromodelo que considere las fibras como entidades discretas, lo que permitirá simular de manera más detallada su interacción con la matriz. Este enfoque incluirá fenómenos complejos como el desprendimiento de las fibras de la matriz y los efectos que ocurren en la zona de enlace cuando se alcanza la fisuración, considerando las propiedades mecánicas de las fibras y su proporción volumétrica dentro de la mezcla total, lo cual influye directamente en el comportamiento global del material compuesto.

Un modelo similar ha sido propuesto por Ferrado et al. (2023), quien desarrolló un estudio numérico utilizando un modelo de elementos finitos 3D combinado con el método de Monte Carlo para representar la orientación y distribución aleatoria de fibras de acero en la matriz de hormigón. Aunque este estudio se centra en fibras de acero y utiliza dosificaciones mayores, su enfoque puede servir de base para el desarrollo de un modelo adecuado para los ensayos propuestos en este trabajo.

Finalmente y como señala Reddy (2006), el modelado numérico debe considerarse una herramienta complementaria en el proceso de diseño y fabricación de productos. En este estudio se ha demostrado que, efectivamente, el modelado numérico cumple dicha función, siendo fundamental para alcanzar los objetivos planteados; no obstante, se reconoce que la incorporación de micromodelos más detallados en la interacción fibra-matriz podría mejorar la precisión de las predicciones.

CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES

Sobre la dosis incorporada y la elaboración del HRFS

Una de las principales incógnitas al trabajar con HRFS es determinar la dosificación adecuada de fibras ya que depende del tipo de estructura como de los requisitos estructurales de diseño. Es importante señalar que una mayor dosificación no garantiza un mejor rendimiento del hormigón, por el contrario puede incrementar los costos, reducir la trabajabilidad del material e incluso en ciertos casos disminuir su capacidad de carga última. Por lo tanto, es importante evaluar cuál es la dosis óptima que permita obtener un equilibrio entre trabajabilidad, resistencia y economía en el hormigón.

En cuanto a la fabricación del HRFS en planta, se deben seguir procedimientos específicos para la incorporación de las fibras, las cuales deben añadirse paulatinamente ya sea mediante una cinta transportadora, de forma manual o por otros métodos adecuados. Si no se respeta este procedimiento, pueden formarse aglomerados de fibras (erizos) que aunque en pequeñas cantidades no afectan significativamente el rendimiento, pueden alterar la dosis óptima si son excesivos, debido a la necesidad de eliminarlos.

En relación con el mezclado, se recomienda aumentar el tiempo de mezcla entre 2 a 3 minutos en comparación con el utilizado para hormigones convencionales, sin exceder los límites establecidos, con el fin de asegurar la correcta distribución de fibras y evitar la segregación.

Para asegurar la calidad del HRFS se deben respetar las buenas prácticas con respecto al control de calidad de los materiales en su recepción: verificación del asentamiento, medición de temperatura y ensayos de resistencia.

Sobre las fibras seleccionadas

En el mercado existen diferentes tipos de fibras sintéticas para su uso en el hormigón, las cuales varían en material, módulo de elasticidad, resistencia a la tracción y geometría. En el presente trabajo, se emplearon fibras de polipropileno con una resistencia a la tracción de 550 MPa y un módulo de elasticidad de 8,33 GPa; no obstante existen fibras sintéticas con resistencias superiores a 650 MPa y módulos mayores a 10 GPa, lo que permitiría obtener un mejor rendimiento estructural.

En relación a la geometría, las propiedades del hormigón se benefician con un aumento en la esbeltez (relación l/d) de las fibras; no obstante, para garantizar una adecuada trabajabilidad y facilitar el mezclado, se recomienda limitar esbeltez a un valor máximo de 100; fibras demasiado cortas pueden fallar por pérdida de adherencia, mientras que fibras muy largas pueden fallar por tracción. El diseño ideal busca que cuando se alcance la falla por adherencia el material en su conjunto esté sometido a la mayor tensión posible. En este trabajo, la esbeltez de las fibras utilizadas es 92, lo que se considera adecuado para optimizar su rendimiento.

Además, es importante que la longitud de las fibras sea de al menos el doble del tamaño máximo del agregado grueso presente en la mezcla para garantizar un control efectivo de la fisuración. En este estudio, el tamaño máximo del agregado es de 13 mm, mientras que la longitud de la fibra es de 50 mm, lo que garantiza eficacia en el control de fisuras.

En cuanto a la conformación superficial, se utilizaron macrofibras monofilamento, que debido a su alta relación longitud/grosor, se dispersan eficientemente en la mezcla. Sin embargo, su forma de hilo único limita el contacto con la matriz, lo que puede reducir la adherencia. En este sentido, para futuros estudios se recomienda analizar el uso de fibras multifilamento, formadas por filamentos agrupados que se separan en pequeños hilos finos creando una malla dentro del hormigón que mejora la adhesión a la matriz, donde la mayor área de contacto permite distribuir las tensiones de manera más efectiva.

Dada la amplia variedad de fibras disponibles y la falta de reglamentación clara sobre la fibra más adecuada, es fundamental realizar ensayos específicos con las fibras seleccionadas para garantizar su eficacia.

Sobre la incorporación de las fibras en las losas de viguetas pretensadas

En la mayoría de los casos, el colado del HRFS en losas se realiza mediante bombeo por lo que es esencial verificar la trabajabilidad de la mezcla, ya que si la misma presenta un asentamiento muy bajo puede forzar el funcionamiento de la

bomba y generar problemas operativos. Además, la formación de “erizos” puede convertirse en un inconveniente si estos llegan a atascarse en la manguera por lo que se debe inspeccionar la misma y realizar una limpieza una vez completado el colado del hormigón.

Otro aspecto importante es que el método de compactación debe ser acorde a la trabajabilidad tratando de evitar segregaciones que puedan provocar que las fibras floten o se acumulen en superficie, debiendo evitar asentamientos muy elevados y/o exceso de vibración. Lo recomendable si se trabaja con consistencias fluidas es que la compactación manual o por vibrador de inmersión sea mínima, y si se trabaja con consistencias muy fluidas pudiera bastar con realizar simplemente el enrazado de la superficie.

Respecto a la dosificación de fibras, se considera que 3 kg/m^3 es adecuada para este tipo de estructuras, ya que su función principal es distribuir cargas y reducir los efectos por contracción y temperatura. Aumentar la dosis podría mejorar el comportamiento post-fisuración pero requeriría ajustar la relación agua/cemento para mantener la trabajabilidad. En contraste, una dosis menor no brindaría un refuerzo suficiente.

Como se mencionó en el *Capítulo 2 - Aplicación del HRFS en la capa de compresión de losas de viguetas pretensadas* el rendimiento de las losas fue satisfactorio ya que se observaron menores deformaciones en servicio y un ahorro económico de 13% frente a las losas de viguetas usadas en la práctica tradicional argentina. Además, en el estado límite último, la carga de rotura fue aproximadamente 40 % superior a la resultante por cálculo según lo establecido por el Cirsoc 201-2005. Por estos motivos, se considera apropiada la implementación de fibras como reemplazo de la malla electrosoldada.

Sobre la incorporación de las fibras en los tubos estructurales

En cuanto a la fabricación de tubos estructurales reforzados con fibras, se ha observado que el pequeño espesor de los tubos (aproximadamente 4,5 cm) genera dificultades durante el proceso de colado. Este espesor limita la distribución homogénea de los componentes del hormigón, lo que favorece la aparición de fisuras prematuras, principalmente debido al asentamiento plástico. Este fenómeno ocurre

cuando las partículas más densas se ven impedidas de desplazarse hacia la parte inferior de la mezcla y el agua y los finos ascienden a la superficie, provocando segregación y exudación. La restricción del movimiento de la mezcla causada por las fibras y mallas, sumada a las dimensiones reducidas de los tubos, agrava la formación de estas fisuras, comprometiendo la integridad estructural.

A pesar de los beneficios económicos que presenta la incorporación de fibras frente al refuerzo convencional (del orden de 20 a 30%) los resultados obtenidos en los ensayos han demostrado que, no se alcanzaron los requerimientos esperados en cuanto a resistencia y comportamiento post-fisuración.

Las fibras utilizadas no lograron aumentar la tenacidad del material evidenciando una rotura frágil similar a la de caños sin refuerzo y al utilizar fibras como complemento de la malla de acero, se incrementaron en fabricación los asentamientos plásticos. Esto sugiere que, para los tubos de Clase 1 (según la norma IRAM 11629) la construcción tradicional con armadura sigue siendo la opción más favorable.

Para futuras investigaciones, se recomienda evaluar tubos de clases superiores cuyo espesor mayor podría favorecer el proceso de fabricación y permitir una mejor distribución de los componentes en la mezcla. Además, sería beneficioso analizar fibras con características mecánicas mayores y una conformación superficial diferente, como las fibras multifilamento, que podrían mejorar la adherencia con la matriz y la distribución de tensiones.

Sobre los ensayos realizados

En este proyecto se analizaron un número limitado de muestras, lo que se alinea con el objetivo inicial de realizar una prueba exploratoria para evaluar el comportamiento preliminar del sistema. Los resultados obtenidos son válidos como punto de partida, ya que permiten identificar tendencias generales y plantear hipótesis sobre el desempeño del material en su utilización en losas y tubos.

Sin embargo es importante señalar que este enfoque tiene limitaciones en términos de representatividad estadística. Para avanzar hacia la validación de diseños estructurales o la generalización de los resultados a escenarios más amplios sería

necesario aumentar significativamente la cantidad de muestras ensayadas, lo cual permitiría realizar análisis estadísticos, reducir la incertidumbre asociada a la variabilidad del material y garantizar que los resultados sean aplicables a una escala más amplia o en condiciones reales de uso.

En futuras investigaciones se recomienda considerar un programa experimental más extenso que incluya un mayor número de especímenes para cada condición de ensayo; esto no sólo fortalecería la validez de las conclusiones, sino que también proporcionaría una base más sólida para desarrollar modelos predictivos, optimizar diseños y garantizar un desempeño confiable en aplicaciones prácticas.

Sobre el análisis ambiental

En el *Capítulo 4 - Aspectos Ambientales* se concluyó que el polipropileno es más adecuado para aplicaciones donde la reducción de emisiones iniciales es prioritaria; pero en el caso que se utilice un acero reciclable, sería más conveniente para un uso a largo plazo.

Se analizaron algunos de los principales factores que impactan negativamente en el medio ambiente, con el objetivo de obtener una visión preliminar asociada a la fabricación de polipropileno y de acero; aunque este análisis ofrece una perspectiva inicial del problema, comprender el fenómeno en profundidad requeriría estudiar todos los factores involucrados en el proceso de fabricación, lo que supondría un enfoque más amplio y complejo.

En cuanto a las emisiones, el dióxido de carbono destaca como el principal gas responsable del efecto invernadero. Sin embargo, otros gases como el metano, el óxido de nitrógeno y el monóxido de carbono también contribuyen a este problema.

Por otro lado, respecto al consumo de recursos, sería importante considerar el uso de agua, hierro, carbono u otros elementos provenientes de la naturaleza, si los hubiere y analizar cuidadosamente la fuente de energía empleada en la producción. Esto último es especialmente relevante, ya que el impacto ambiental varía según el método de producción de la energía utilizada.

Para un análisis más detallado sería necesario la inclusión del estudio de emisiones y consumos relacionados a la fabricación de fibras y al transporte del producto final.

Sobre el análisis económico

El reemplazo de las fibras por acero genera ahorros económicos significativos, en el caso de las losas alcanza 13% de beneficio, mientras que para los tubos dependiendo de su geometría y tipo de refuerzo se alcanzaron porcentajes de entre 13% y 30%.

Además de la reducción en costos, esta solución presenta otras ventajas importantes: en las losas los tiempos de armado disminuyen considerablemente, ya que no es necesario instalar la malla antes del colado, lo cual permite acelerar los plazos de ejecución de la obra y facilita una puesta en funcionamiento anticipada, lo que a su vez conlleva beneficios económicos adicionales.

En el caso de los tubos, también se aprecia un ahorro significativo en los tiempos de armado, que se debe a la eliminación del armado de la malla y considerando estos ahorros de tiempo, la producción de tubos reforzados solo con fibras puede ser considerablemente mayor en comparación con los tubos convencionales y esto permite aumentar la capacidad productiva de la fábrica sin necesidad de realizar grandes inversiones adicionales.

Por último se debe aclarar que los análisis de precios realizados en capítulos anteriores fueron llevados a cabo con valores del nordeste argentino, donde el precio del acero es particularmente elevado, por lo que se recomienda que en caso de aplicarse en otro sitio se analice su rentabilidad.

Sobre el modelado numérico

A pesar de las limitaciones mencionadas en el *Capítulo 5 - Alcances del modelado*, el estudio numérico en este estudio ha demostrado ser una herramienta eficaz para predecir el comportamiento general del sistema e identificar las zonas críticas de falla. Sin embargo se observó que subestima el impacto de las fibras en la

fase pre-fisura, ya que las deformaciones obtenidas en la simulación fueron mayores que las reportadas en los ensayos experimentales. Además, el error en la carga inicial de fisuración de los tubos estructurales fue de entre 10% y 15% respecto a los valores experimentales.

El desajuste podría estar relacionado con la falta de un tratamiento específico de las fibras en el modelo ya que, en su formulación actual, estas se consideran integradas en la matriz cementicia como un modelo homogéneo sin tratarlas específicamente.

Se sugiere como parte de futuras investigaciones la implementación de un micromodelo que considere las fibras como entidades discretas. Este enfoque permitiría una simulación más detallada de su interacción con la matriz cementicia, considerando fenómenos como el arrancamiento que ocurren en la zona de enlace fibra-matriz; además, sería importante integrar las propiedades mecánicas de las fibras y su proporción volumétrica en la mezcla total, lo que podría mejorar la precisión del modelo.

Como recomendación para futuras investigaciones, se sugiere la implementación de un micromodelo que considere las fibras como entidades discretas, permitiendo simular más detalladamente su interacción con la matriz cementicia. Un estudio que contemple a las fibras debe considerar la interfaz que involucra adhesión, fricción y anclaje mecánico y ser capaz de representar el fenómeno de arrancamiento que predomina como forma de falla. Además, al discretizar el material, se debe tener en cuenta las propiedades mecánicas, la dosificación y la orientación de las fibras respecto a las direcciones de los esfuerzos.

Aunque estos modelos requieren un alto costo computacional y de tiempo debido a la cantidad de simulaciones necesarias, ofrecen una mayor precisión en la predicción del comportamiento del hormigón reforzado con fibras.

Bibliografía

- Zerbino, Raúl (2020). Hormigón reforzado con fibras – Serie Hormigones Especiales. Primera Edición. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- CIRSOC 201 (2005). Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. Instituto Nacional de Tecnología Industrial – Centro de Investigación de Reglamento de Seguridad en las Obras Civiles.
- Meda, A., Plizzari, G. A., & Riva, P. (2019). Experimental study on the use of polypropylene fibres in concrete structures. *Structural Concrete*, 20(1), 57-66.
- Sanjuan, M.A., Andrade, C., & Bentur, A. (1998). Effect of polypropylene fiber reinforced mortars on steel reinforcement corrosion induced by carbonation. *Materials and Structures*, 31(210), 343–349.
- Al-Tayyib, A.H., & Al-Zaharani, M.M. (1990). Corrosion of steel reinforcement in polypropylene fiber reinforced concrete structures. *ACI Materials Journal*, 87(2), 108–113.
- Wheat, H.G. (2002). Using polymers to minimize corrosion of steel in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 24, 119–126.
- Mesbah HA, Buyle-Bodin F. Efficiency of polypropylene and metallic fibres on control of shrinkage and cracking of recycled aggregate mortars.
- fib Model Code 2010 (2012). Model Code for Concrete Structures. The International Federation for Structural Concrete.
- Instituto Americano del Hormigón (ACI). (2010). ACI 544.5R-10: Informe sobre las propiedades físicas y la durabilidad del hormigón reforzado con fibras. Farmington

- Habel, K. (2004). Structural behaviour of elements combining ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC). Tesis Doctoral. Lausanne, Suiza: Ecole Polytechnique Federale de Lausanne.
- European Committee for Standardization (CEN). (2004). EN 14651:2004 - Test method for metallic fibre concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).
- García Alberti, M. (2015). Polyolefin fibre-reinforced concrete: From material behaviour to numerical and design considerations.
- Concrete Society. (2007). TR 65 - Guidance on the use of macro-synthetic fibre reinforced concrete. Camberley, UK: The Concrete Society.
- Bentur, A., & Mindess, S. (1990). Fibre Reinforced Cementitious Composites. Elsevier Applied Science.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). Concrete (2nd ed.). Prentice Hall.
- Blazy, J., Drobiec, Ł., & Wolka, P. (2021). Flexural tensile strength of concrete with synthetic fibers.
- ASM International. (1988). Metals handbook: Vol. 1. Properties and selection: Irons, steels, and high-performance alloys (10th ed.). ASM International.
- Polyfibers. (2024). Innovative solutions for fiber-reinforced concrete. Recuperado de <https://www.polyfibers.com>
- Gexim. (2024). Fibra cortada de poliéster. Recuperado de <https://gexim.com.pe/>
- Mora, R., Aguado, A., Gettu, R., & Barra, M. (2011). Influencia de la temperatura en las propiedades del hormigón fresco. Revista de la Construcción, 10(2), 8-19.
- Manual “Concrete SikaFiber Technology”.

- Zheng, Z., & Feldman, D. (1995). Synthetic fibre-reinforced concrete. *Progress in Polymer Science*, 20(2), 185-210.
- ACI Committee 544. (2010). *ACI 544.5R-10: Guide for specification of synthetic fibers for concrete*. American Concrete Institute.
- LEUNG, Christopher K. Y.; LI, Victor C., 1992. Effect of fiber inclination on crack bridging stress in brittle fiber reinforced brittle matrix composites. *J. Mech. Phys. Solids*, 1992; 40[6]: 1333-1362.
- Euclid Chemical. (n.d.). Soluciones de concreto reforzado con fibras sintéticas. Ing Juan Carlos Acero. <https://www.euclidchemical.com/>
- Tecnopor. (n.d.). Cubierta o entrepiso de viguetas pretensadas y bovedillas de EPS. <https://www.tecnopor.com.ar/>
- KAKOOEI, S.; AKIL, H.M.; JAMSHIDI, M.; ROUHI, J. The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures. *Construction and Building Materials*, v.27, p. 73 -77, 2012.
- BINA, P.; TEIXEIRA, A. O. F. – A Arte dos Pisos Industriais – do sistema de damos ao protendido – Ibracon – São Paulo – 2002.
- Du Plessis, L. – The effect of macro-synthetic fibres on the drying shrinkage cracking behaviour of concrete slabs on grade. – Stellenbosch University – Sudáfrica - 2015.
- Comité Europeo de Normalización. (s.f.). EN 15037. Precast concrete products - Beam-and-block floor systems - Part 2: Specific requirements for non-reinforced concrete blocks. Sección B.2.2 "With non-resisting blocks".
- Fédération Internationale du Béton (fib). (2010). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*.

- Tuberías Colmenar. (2024). *Tubería campana de hormigón armado*. Recuperado el 7 de diciembre de 2024, de <https://www.tcolmenar.com/tuberia-campana-de-hormigon-armado/>
- Plastics Pipe Institute. (2024). *Design methodology. Corrugated polyethylene pipe design manual and installation guide*. Recuperado de <https://plasticpipe.org/drainage/cppa-design-guide/>
- Peyvandi, A., Soroushian, P., & Jahangirnejad, S. (2014). *Structural design methodologies for concrete pipes with steel and synthetic fiber reinforcement*.
- Al Rikabi, F. T., Sargand, S. M., & Kurdziel, J. (2017). *Evaluation of synthetic fiber reinforced concrete pipe performance using three-edge bearing test*.
- Wilson, A., & Abolmaali, A. (2014). *Performance of synthetic fiber-reinforced concrete pipes*.
- De la Fuente, A., Escariz, R. C., de Figueiredo, A. D., & Aguado, A. (2013). *Design of macro-synthetic fibre reinforced concrete pipes*.
- Rodríguez Soalleiro, J., & Sanjuán, M. Á. (2016). *Comportamiento de los tubos de hormigón armado en entornos complejos*.
- ANDECE. (2016). *Tubos de hormigón*.
- European Committee for Standardization. (2002). *EN 1916 - 2002: Concrete pipes and fittings, unreinforced, steel fibre and reinforced*.
- IRAM. (2005). *IRAM 11629: Caños de hormigón armado con malla soldada, doblada o en espiral, no pretensados, destinada a la conducción de líquidos sin presión*.
- VIGUETEC. (2024). *Viguetec: Prefabricados de hormigón*. Recuperado el 8 de diciembre de 2024, de <https://viguetec.com.ar/>.

- Plastics Europe. <https://plasticseurope.org/>
- Bousted L. (2005). Polypropilene (PP). Eco-profiles of the European Plastics Industry.
- World Steel Association. <https://worldsteel.org>
- Alsabri, A.; Tahir,F.; AL-GHAMDI, S. (2021). Life-Cycle Assessment of Polypropylene Production in the Gulf Cooperation Council (GCC) Region.
- CodeAster. (2023). Sitio web de CodeAster. <https://www.code-aster.org/>
- Ferrado, F. L., Escalante, M. R., & Rougier, V. C. (2023). Evaluación numérica probabilística de la capacidad portante de tuberías de SFRC con distribución aleatoria de fibras. Informes de la Construcción, 75(569), e479. <https://doi.org/10.3989/ic.90428>
- Reddy, J. N. (2006). An introduction to the finite element method (3rd ed.). Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University.

ANEXO

A

*Propiedades del hormigón y control de
calidad de los materiales utilizados en los
ensayos en losas*

Propiedades del hormigón utilizado

El hormigón utilizado en la capa de compresión de las losas de viguetas pretensadas posee una resistencia especificada a compresión de 20 MPa, su dosificación aparece en la tabla A.1, donde se observan la cantidad en kg/m³ de cada uno de los componentes. Para el caso del hormigón con fibras se añaden 3kg/m³ de fibras a la dosificación.

Tabla A.1 - Dosificación de materiales componentes del producto H20K15P2 – CM1. (Melmix, 2024)

MATERIALES	CANTIDAD (kg/m³)
CPF 40 – Holcim / Puesto Viejo, Jujuy	280
Aqua	169
Arena gruesa – Coop. arenera / Puerto Vilelas – Antequeras – Barranqueras, Chaco	574
Arena fina – Coop. arenera / Puerto Vilelas – Antequeras – Barranqueras, Chaco	382
Piedra basáltica triturada 6/19 – Cantecor / Felipe Yofre, Corrientes	1036
Aditivo plastificante MIRA 300 – Grace / Capital Federal, Bs. As. (Dosis: 0,25%)	0,70
Aditivo superfluidificante DARACEM 100 – Grace/Capital Federal, Bs. As.	-
PUV teórico	2443

Por otra parte, en la tabla A.2 se observan las propiedades que adquiere el hormigón, tanto en estado fresco como en estado endurecido a la edad de 28 días.

Tabla A.2 - Propiedades en estado fresco y endurecido del producto H20K15P2 – CM1. (Melmix, 2024)

PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO	
Consistencia	Fluida
Asentamiento de descarga	15cm ± 3cm ^(*)
Peso por unidad de volumen	2443 kg/m ³
Contenido de aire	2,5% ± 0,5%
Tamaño máximo nominal del agregado grueso	19 mm
PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO	
Resistencia	
Clase de hormigón	H-20
Resistencia característica	20 MPa
Edad de diseño	28 días
Conformidad de resistencia a la compresión	CIRSOC 201:2005 – Modo 1
Durabilidad	
Contenido unitario de cemento	280 kg/m ³
Relación agua / cemento	0,60

Control de calidad de los materiales utilizados en la dosificación

Todos los parámetros para el control de calidad de los materiales fueron determinados según las normas IRAM 1540 y 1505.

Agregado grueso

El agregado grueso es piedra basáltica triturada 6/19, para la misma se determinó el contenido de humedad que es igual a 1,6%. Además, se llevó a cabo el análisis granulométrico, el resultado del mismo se observa en la Tabla A.9 y la curva correspondiente al ensayo en la figura A.3.

Tabla A.9 - Granulometría agregado grueso (Melmix, 2024)

Tamiz	Retenido parcial	Retenido total	Pasado	% Pasado	Retenido acumulado
76 mm 3"	0 g	0 g	8607 g	100%	0%
63 mm 2 ½"	0 g	0 g	8607 g	100%	0%
51 mm 2"	0 g	0 g	8607 g	100%	0%
38 mm 1 ½"	0 g	0 g	8607 g	100%	0%
25 mm 1"	0 g	0 g	8607 g	100%	0%
19 mm ¾"	12 g	12 g	8595 g	100%	0%
13 mm ½"	3420 g	3432 g	5175 g	60%	40%
9.5 mm 3/8"	1462 g	4894 g	3713 g	43%	57%
4.8 mm # 4	3407 g	8301 g	306 g	4%	96%
2.4 mm # 8	244 g	8545 g	62 g	1%	99%
Fondo Pasa # 8	62 g	8607 g	0 g	0%	100%
Corrección pasa # 200	0 g	8607 g			

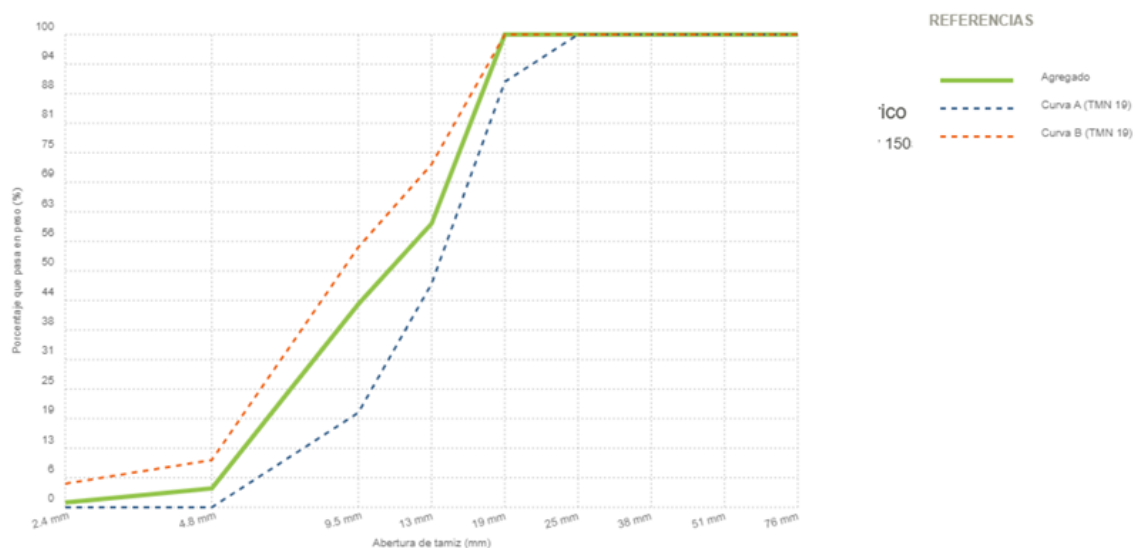


Fig A.3 - Curva granulométrica agregado grueso (Melmix, 2024)

Arena gruesa

La arena gruesa utilizada tiene procedencia del Río Paraná, se determinó que el contenido de humedad al momento de la recepción fue de 4,3%, además se llevó a cabo la granulometría del material la cual se observa en la tabla A.10 y su curva correspondiente en la figura A.4.

Tabla A.10 - Granulometría arena gruesa (Melmix, 2024)

Tamiz	Peso	Tamiz + agregado	Retenido parcial	Retenido total	Pasado	% Pasado	Retenido acumulado
9.5 mm 3/8"	388 g	388 g	0 g	0 g	526 g	100%	0%
4.8 mm # 4	392 g	397 g	5 g	5 g	521 g	99%	1%
2.4 mm # 8	358 g	374 g	16 g	21 g	505 g	96%	4%
1.2 mm # 16	316 g	362 g	46 g	67 g	459 g	87%	13%
0.59 mm # 30	297 g	418 g	121 g	188 g	338 g	64%	36%
0.297 mm # 50	276 g	543 g	267 g	455 g	71 g	13%	87%
0.149 mm # 100	250 g	312 g	62 g	517 g	9 g	2%	98%
Fondo Pasa # 100	304 g	313 g	9 g	526 g	0 g	0%	100%
Corrección pasa # 200			0 g	526 g			

Muestra granulométrica: 526 g

Total (incluido pasa # 200): 526 g

Módulo de finura: 2.39

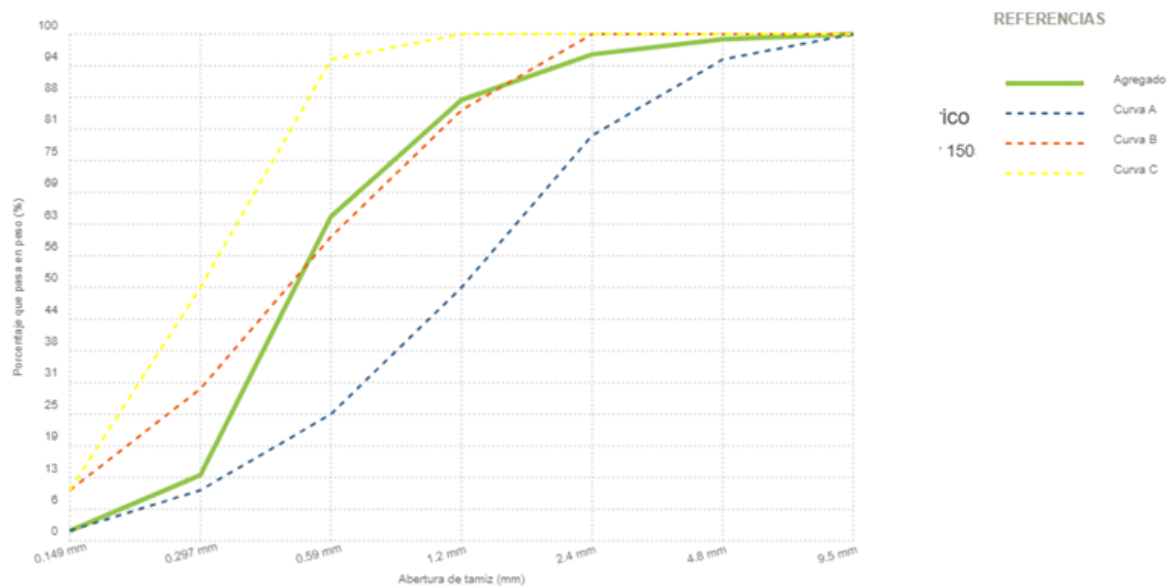


Fig A.4 - Curva granulométrica arena gruesa (Melmix, 2024)

Arena fina

La arena fina utilizada tiene procedencia del Río Paraná, se determinó que el contenido de humedad al momento de la recepción fue de 4,5%, también se llevó a cabo la granulometría del material la cual se observa en la tabla A.11 y su curva correspondiente en la figura A.5.

Tabla A.11 - Granulometría arena fina (Melmix, 2024)

Tamiz	Peso	Tamiz + agregado	Retenido parcial	Retenido total	Pasado	% Pasado	Retenido acumulado
9.5 mm 3/8"	388 g	388 g	0 g	0 g	552 g	100%	0%
4.8 mm # 4	392 g	393 g	1 g	1 g	551 g	100%	0%
2.4 mm # 8	358 g	361 g	3 g	4 g	548 g	99%	1%
1.2 mm # 16	316 g	331 g	15 g	19 g	533 g	97%	3%
0.59 mm # 30	297 g	352 g	55 g	74 g	478 g	87%	13%
0.297 mm # 50	276 g	607 g	331 g	405 g	147 g	27%	73%
0.149 mm # 100	250 g	385 g	135 g	540 g	12 g	2%	98%
Fondo Pasa # 100	304 g	316 g	12 g	552 g	0 g	0%	100%
Corrección pasa # 200			0 g	552 g			

Muestra granulométrica: 552 g

Total (incluido pasa # 200): 552 g

Módulo de finura: 1.88

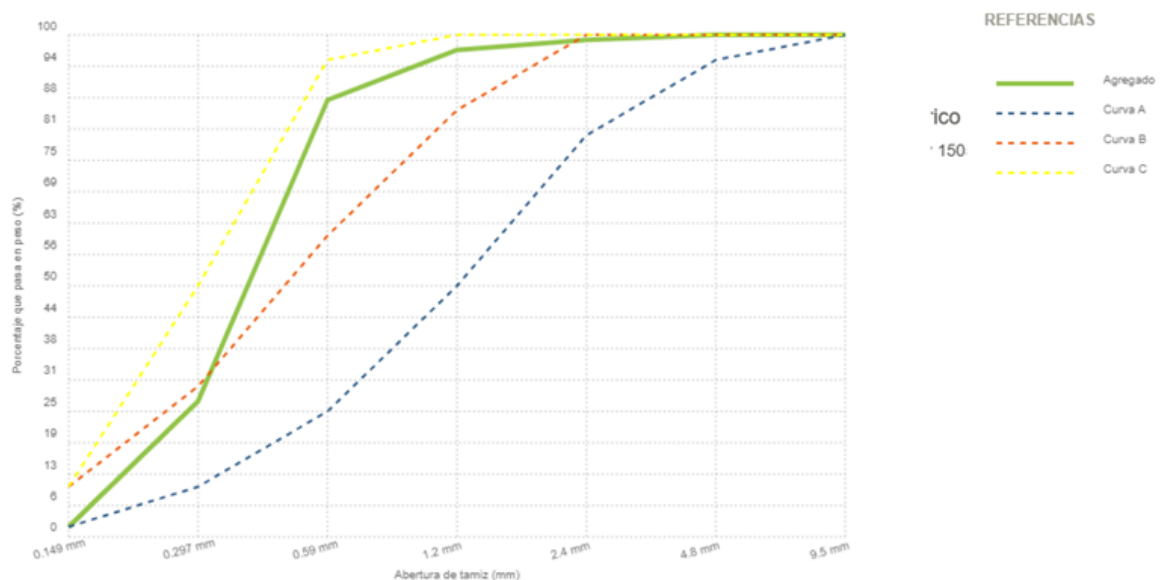


Fig A.5 - Curva granulométrica arena fina (Melmix, 2024)

Resultados de ensayo “flexión en primas con entalladura” (EN 14651)

Las siguientes imágenes ilustran los resultados de 6 probetas prismáticas ensayadas por LEMIT, los ensayos se llevaron a cabo siguiendo la norma EN 14651 - 2005.

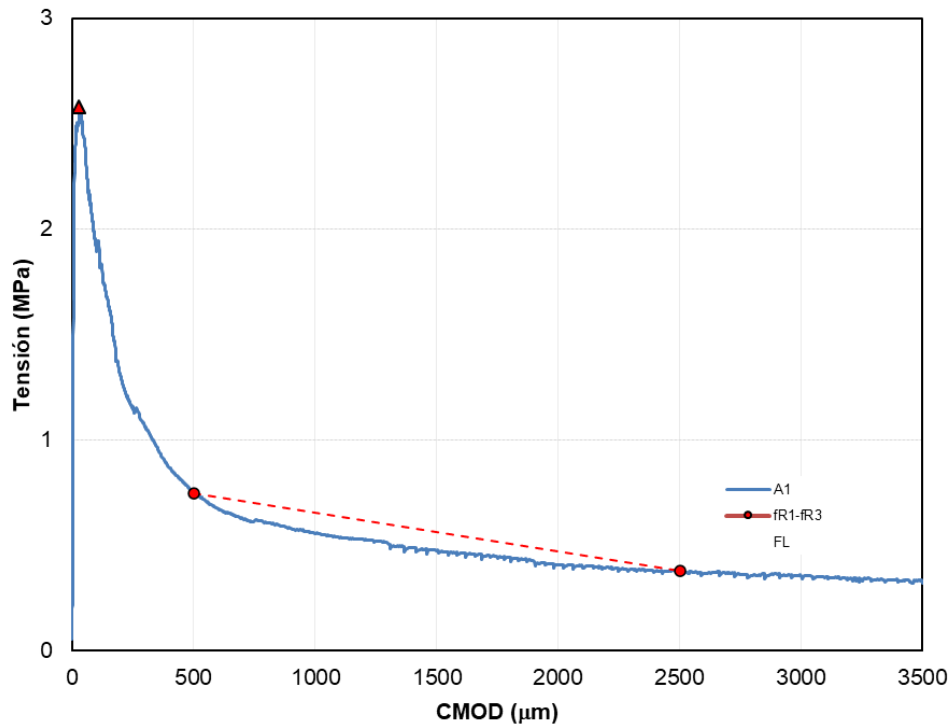


Fig A.6 - Resultado probeta A1 - H₂O 4 kg/m³ de fibras (LEMIT, 2024)

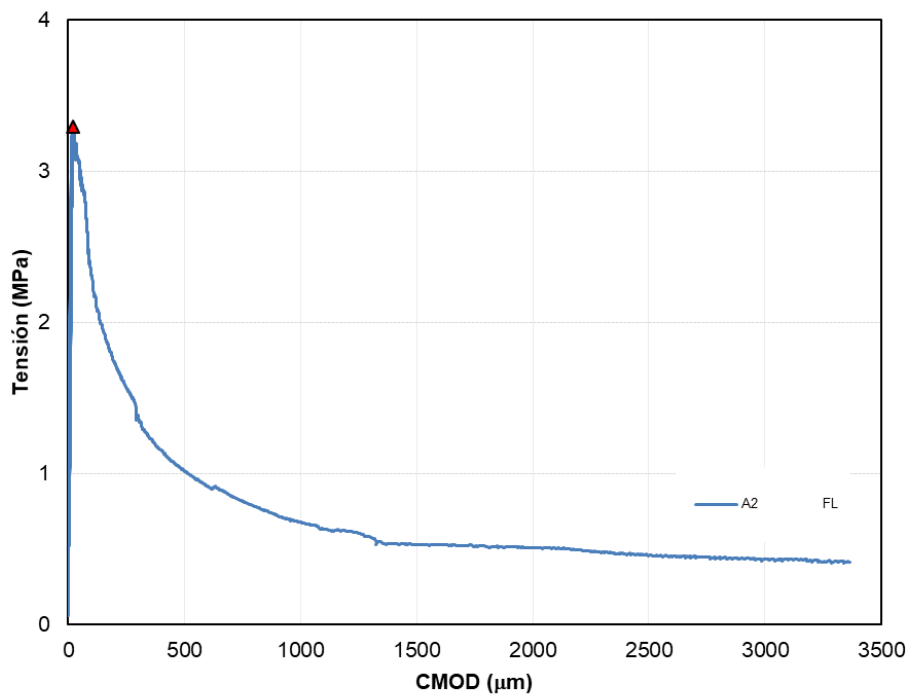


Fig A.7 - Resultado probeta A2 - H₂O 4 kg/m³ de fibras (LEMIT, 2024)

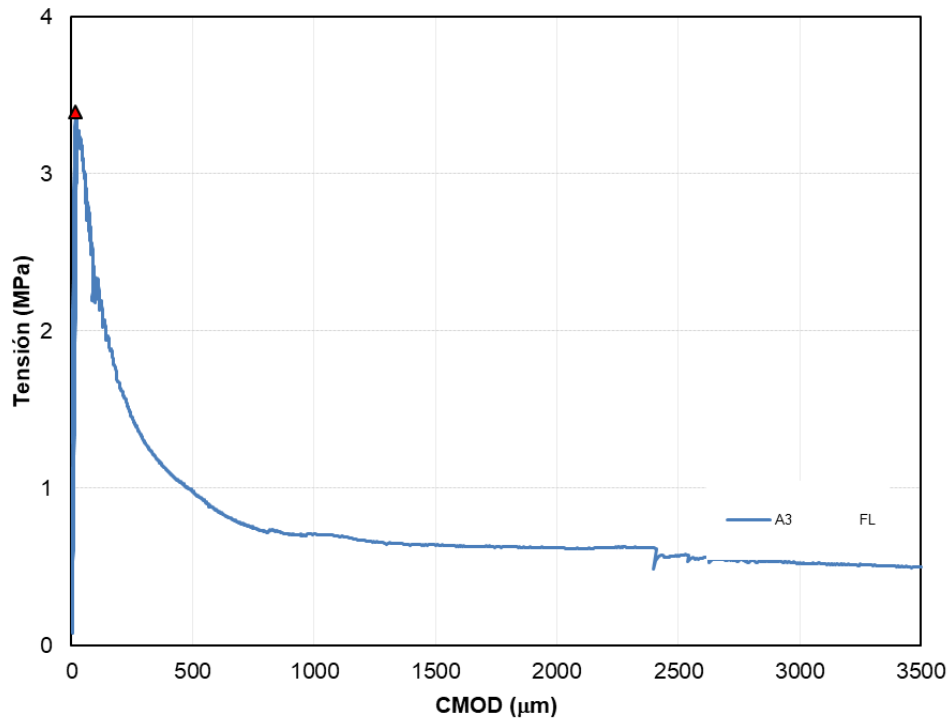


Fig A.8 - Resultado probeta A3 - H₂O 4 kg/m³ de fibras (LEMIT, 2024)

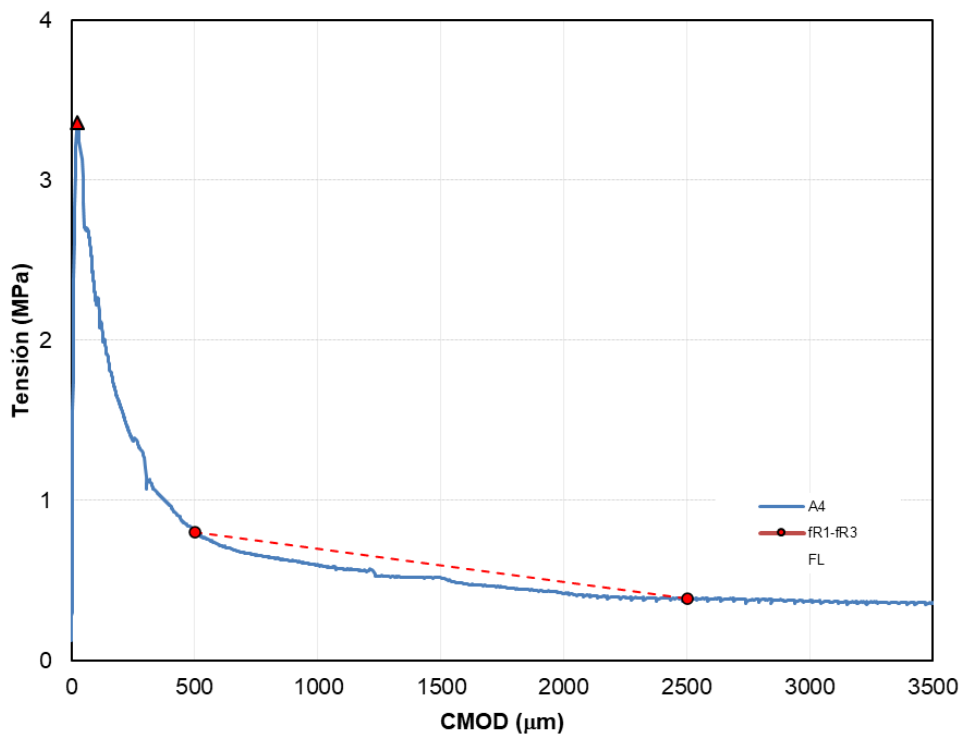


Fig A.9 - Resultado probeta A4 - H₂O 4 kg/m³ de fibras (LEMIT, 2024)

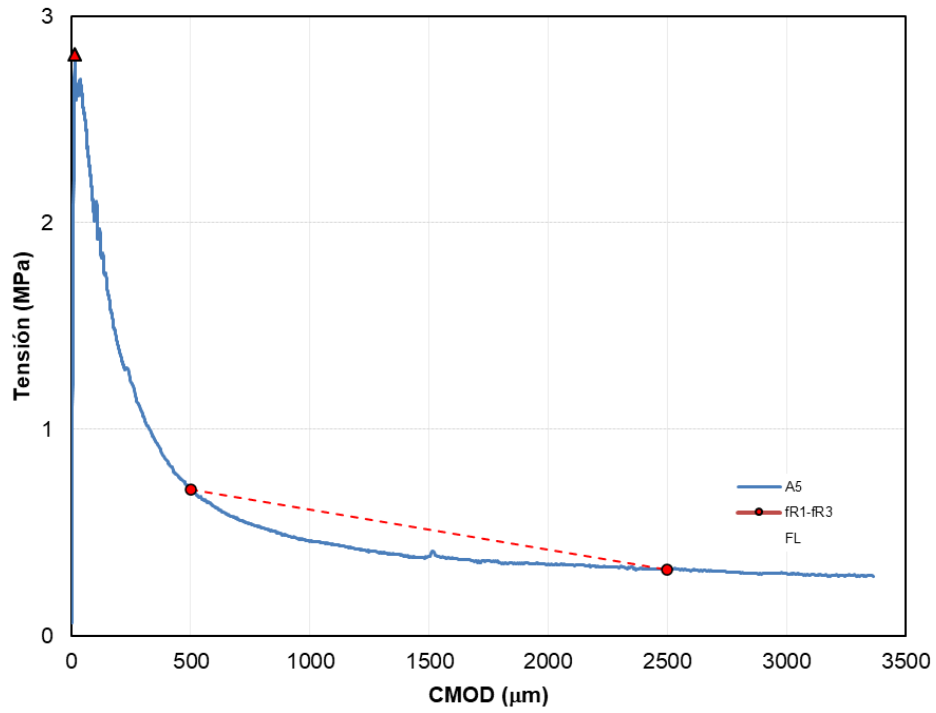


Fig A.10 - Resultado probeta A5 - H2O 4 kg/m³ de fibras (LEMIT, 2024)

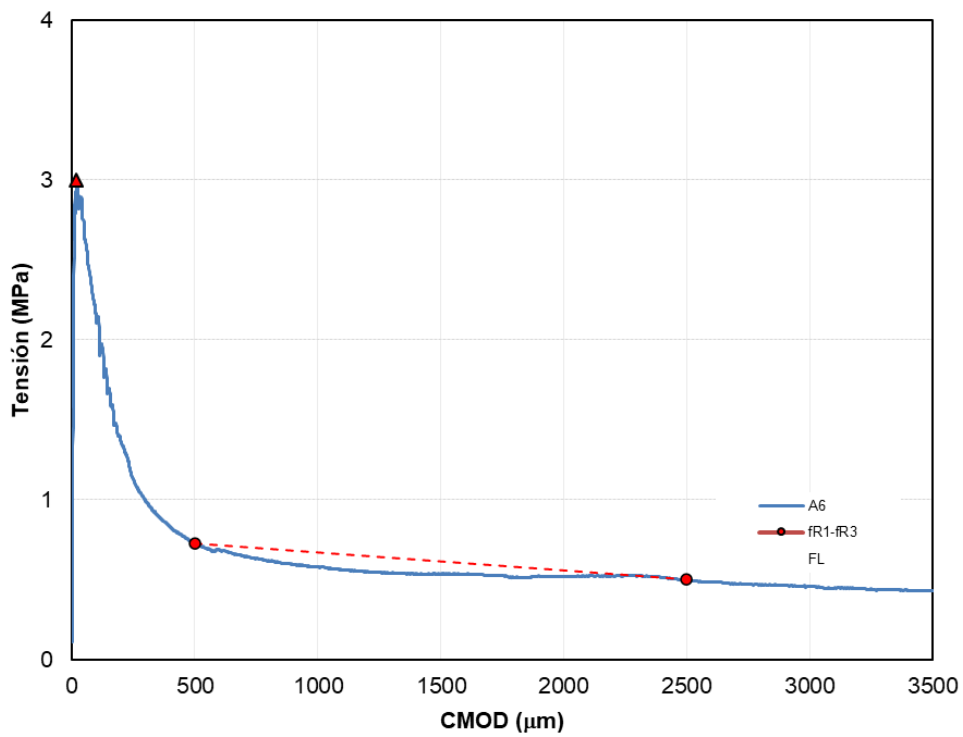


Fig A.11 - Resultado probeta A6 - H2O 4 kg/m³ de fibras (LEMIT, 2024)

ANEXO

B

Tubos estructurales

Detalle del análisis económico

En las siguientes tablas se encuentra en detalle el análisis económico para cada tipo de tubo, teniendo en cuenta los materiales y la mano de obra requerida.

Tabla B.1 - Análisis de precios de caños con armadura IRAM

ANALISIS DE PRECIOS CAÑOS CON ARMADURA				CAÑO Ø40 IRAM		CAÑO Ø60 IRAM	
MATERIA PRIMA Y MANO DE OBRA	Unidad	Precio	Cantidad	Precio	Cantidad	Precio	
ARMADURA			33%	\$ 8.869	33%	\$ 17.053	
ADN 420 Ø 12	Kg \$	1.302,86	1,70	\$ 2.215	2,05	\$ 2.671	
MALLA ELECTROSOLDADA	Kg \$	1.760,37	3,78	\$ 6.654	8,17	\$ 14.382	
HORMIGON			27%	\$ 7.168	40%	\$ 21.025	
CEMENTO	Kg \$	144,49	27,00	\$ 3.901	79,2	\$ 11.444	
PIEDRA	Kg \$	32,80	82,050	\$ 2.691	240,68	\$ 7.894	
ARENA	Kg \$	8,58	67,050	\$ 575	196,68	\$ 1.688	
MANO OBRA			40%	\$ 10.829	27%	\$ 14.183	
M.O. Oficial	Hs \$	5.271,08	0,675	\$ 3.558	0,81	\$ 4.270	
M.O. Ayudante	Hs \$	4.837,56	1,35	\$ 6.531	1,65	\$ 7.982	
M.O. Administrativos	GL \$	4,07		\$ 740		\$ 1.932	
COSTO COSTO (HIERRO-HORMIGON-M.O)				\$ 26.866	\$ 52.262		
COSTO-COSTO CON (A-M-I) 10%				\$ 29.552	\$ 57.488		

Tabla B.2 - Análisis de precios de caños con armadura comercial.

ANALISIS DE PRECIOS CAÑOS CON ARMADURA				CAÑO Ø40 COMERCIAL		CAÑO Ø60 COMERCIAL	
MATERIA PRIMA Y MANO DE OBRA	Unidad	Precio	Cantidad	Precio	Cantidad	Precio	
ARMADURA			27%	\$ 6.528	24%	\$ 11.279	
ADN 420 Ø 12	Kg \$	1.302,86	1,70	\$ 2.215	2,05	\$ 2.671	
MALLA ELECTROSOLDADA	Kg \$	1.760,37	2,45	\$ 4.313	4,89	\$ 8.608	
HORMIGON			29%	\$ 7.168	45%	\$ 21.025	
CEMENTO	Kg \$	144,49	27,00	\$ 3.901	79,2	\$ 11.444	
PIEDRA	Kg \$	32,80	82,050	\$ 2.691	240,68	\$ 7.894	
ARENA	Kg \$	8,58	67,050	\$ 575	196,68	\$ 1.688	
MANO OBRA			44%	\$ 10.825	30%	\$ 14.134	
M.O. Oficial	Hs \$	5.271,08	0,675	\$ 3.558	0,81	\$ 4.270	
M.O. Ayudante	Hs \$	4.837,56	1,35	\$ 6.531	1,65	\$ 7.982	
M.O. Administrativos	GL \$	4,07		\$ 736		\$ 1.883	
COSTO COSTO (HIERRO-HORMIGON-M.O)				\$ 24.520	\$ 46.439		
COSTO-COSTO CON (A-M-I) 10%				\$ 26.972	\$ 51.083		

Tabla B.3 - Análisis de precios de caños con armadura IRAM + 4 kg/m3 de fibras

ANALISIS DE PRECIOS CAÑOS CON ARMADURA				CAÑO Ø40 IRAM + FIBRAS		CAÑO Ø60 IRAM + FIBRAS	
MATERIA PRIMA Y MANO DE OBRA	Unidad	Precio	Cantidad	Precio	Cantidad	Precio	
FIBRAS SINTETICAS			8%	\$ 2.370	12%	\$ 6.952	
Fibras polipropileno NTH	Kg \$	7.900,00	0,3	\$ 2.370	0,88	\$ 6.952	
ARMADURA			30%	\$ 8.869	29%	\$ 17.053	
ADN 420 Ø 12	Kg \$	1.302,86	1,70	\$ 2.215	2,05	\$ 2.671	
MALLA ELECTROSOLDADA	Kg \$	1.760,37	3,78	\$ 6.654	8,17	\$ 14.382	
HORMIGON			25%	\$ 7.168	36%	\$ 21.025	
CEMENTO	Kg \$	144,49	27,00	\$ 3.901	79,2	\$ 11.444	
PIEDRA	Kg \$	32,80	82,050	\$ 2.691	240,68	\$ 7.894	
ARENA	Kg \$	8,58	67,050	\$ 575	196,68	\$ 1.688	
MANO OBRA			37%	\$ 10.829	24%	\$ 14.183	
M.O. Oficial	Hs \$	5.271,08	0,675	\$ 3.558	0,81	\$ 4.270	
M.O. Ayudante	Hs \$	4.837,56	1,35	\$ 6.531	1,65	\$ 7.982	
M.O. Administrativos	GL \$	4,07		\$ 740		\$ 1.932	
COSTO COSTO (HIERRO-HORMIGON-M.O)				\$ 29.236	\$ 59.214		
COSTO-COSTO CON (A-M-I) 10%				\$ 32.159	\$ 65.135		

Tabla B.4 - Análisis de precios de caños con armadura comercial + 4 kg/m3 de fibras

ANALISIS DE PRECIOS CAÑOS COM + FIBRAS				CAÑO Ø40 COM + FIBRA		CAÑO Ø60 COM + FIBRA	
MATERIA PRIMA Y MANO DE OBRA	Unidad	Precio	Cantidad	Precio	Cantidad	Precio	Precio
FIBRAS SINTETICAS				9%	\$ 2.370	13%	\$ 6.952
Fibras polipropileno NTH	Kg	\$ 7.900,00	0,3	\$ 2.370	0,88	\$ 6.952	
ARMADURA				24%	\$ 6.528	21%	\$ 11.279
ADN 420 Ø 12	Kg	\$ 1.302,86	1,70	\$ 2.215	2,05	\$ 2.671	
MALLA ELECTROSOLDADA	Kg	\$ 1.760,37	2,45	\$ 4.313	4,89	\$ 8.608	
HORMIGON				27%	\$ 7.168	39%	\$ 21.025
CEMENTO	Kg	\$ 144,49	27,00	\$ 3.901	79,2	\$ 11.444	
PIEDRA	Kg	\$ 32,80	82,050	\$ 2.691	240,68	\$ 7.894	
ARENA	Kg	\$ 8,58	67,050	\$ 575	196,68	\$ 1.688	
MANO OBRA				40%	\$ 10.825	26%	\$ 14.134
M.O. Oficial	Hs	\$ 5.271,08	0,675	\$ 3.558	0,81	\$ 4.270	
M.O. Ayudante	Hs	\$ 4.837,56	1,35	\$ 6.531	1,65	\$ 7.982	
M.O. Administrativos	GL	\$ 4,07		\$ 736		\$ 1.883	
COSTO COSTO (HIERRO-HORMIGON-M.O)					\$ 26.890		\$ 53.391
COSTO-COSTO CON (A-M-I) 10%					\$ 29.579		\$ 58.730

Tabla B.5 - Análisis de precios de caños con 4 kg/m3 de fibras

ANALISIS DE PRECIOS CAÑOS CON FIBRAS				CAÑO Ø40 C/FIBRAS		CAÑO Ø60 C/FIBRAS	
MATERIA PRIMA Y MANO DE OBRA	Unidad	Precio	Cantidad	Precio	Cantidad	Precio	Precio
FIBRAS SINTETICAS				13%	\$ 2.370	17%	\$ 6.952
Fibras polipropileno NTH	Kg	\$ 7.900,00	0,3	\$ 2.370	0,88	\$ 6.952	
HORMIGON				38%	\$ 7.168	52%	\$ 21.025
CEMENTO	Kg	\$ 144,49	27,00	\$ 3.901	79,2	\$ 11.444	
PIEDRA	Kg	\$ 32,80	82,050	\$ 2.691	240,68	\$ 7.894	
ARENA	Kg	\$ 8,58	67,050	\$ 575	196,68	\$ 1.688	
MANO OBRA				49%	\$ 9.228	31%	\$ 12.538
M.O. Oficial	Hs	\$ 5.271,08	0,675	\$ 3.558	0,81	\$ 4.270	
M.O. Ayudante	Hs	\$ 4.837,56	1,02	\$ 4.934	1,32	\$ 6.386	
M.O. Administrativos	GL	\$ 4,07		\$ 736		\$ 1.883	
COSTO COSTO (HIERRO-HORMIGON-M.O)					\$ 18.766		\$ 40.515
COSTO-COSTO CON (A-M-I) 10%					\$ 20.643		\$ 44.567

Tabla B.6 - Análisis de precios de caños sin refuerzo

ANALISIS DE PRECIOS CAÑOS SIN REFUERZO				CAÑO Ø40 SIN REFUERZO		CAÑO Ø60 SIN REFUERZO	
MATERIA PRIMA Y MANO DE OBRA	Unidad	Precio	Cantidad	Precio	Cantidad	Precio	Precio
HORMIGON				44%	\$ 7.168	63%	\$ 21.025
CEMENTO	Kg	\$ 144,49	27,00	\$ 3.901	79,2	\$ 11.444	
PIEDRA	Kg	\$ 32,80	82,050	\$ 2.691	240,68	\$ 7.894	
ARENA	Kg	\$ 8,58	67,050	\$ 575	196,68	\$ 1.688	
MANO OBRA				56%	\$ 9.228	37%	\$ 12.538
M.O. Oficial	Hs	\$ 5.271,08	0,675	\$ 3.558	0,81	\$ 4.270	
M.O. Ayudante	Hs	\$ 4.837,56	1,02	\$ 4.934	1,32	\$ 6.386	
M.O. Administrativos	GL	\$ 4,07		\$ 736		\$ 1.883	
COSTO COSTO (HIERRO-HORMIGON-M.O)					\$ 16.396		\$ 33.563
COSTO-COSTO CON (A-M-I) 10%					\$ 18.036		\$ 36.920

Propiedades del hormigón utilizado

Tabla B.7 - Dosificación de materiales componentes

MATERIALES	CANTIDAD (kg/m ³)
CPF 40 – Holcim / Puesto Viejo, Jujuy	340
Agua	100
Arena gruesa – Coop. arenera / Puerto Vilelas – Antequeras – Barranqueras, Chaco	500
Arena fina – Coop. arenera / Puerto Vilelas – Antequeras – Barranqueras, Chaco	530
Piedra basáltica triturada 6/12 – Cantecor / Felipe Yofre, Corrientes	900
PUV teórico	2370

Tabla B.8 - Propiedades del hormigón utilizado

PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO	
Consistencia	Muy Seca
Asentamiento de descarga	0 cm
Peso por unidad de volumen	2370 kg/m ³
Contenido de aire	4,0% ± 0,5%
Tamaño máximo nominal del agregado grueso	19 mm
PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO	
Resistencia	
Clase de hormigón	H-35
Resistencia característica	35 MPa
Edad de diseño	28 días
Conformidad de resistencia a la compresión	CIRSOC 201:2005 – Modo II
Durabilidad	
Contenido unitario de cemento	340 kg/m ³
Relación agua / cemento	0,29

Control de calidad de los materiales utilizados en la dosificación.

El resultado del agregado grueso se observa en la Tabla B.9 y la curva correspondiente al ensayo en la figura B.1

Tabla B.9 - Granulometría agregado grueso (Melmix, 2024)

Tamiz	Retenido parcial	Retenido total	Pasado	% Pasado	Retenido acumulado
76 mm 3"	0 g	0 g	8607 g	100%	0%
63 mm 2 1/2"	0 g	0 g	8607 g	100%	0%
51 mm 2"	0 g	0 g	8607 g	100%	0%
38 mm 1 1/2"	0 g	0 g	8607 g	100%	0%
25 mm 1"	0 g	0 g	8607 g	100%	0%
19 mm 3/4"	12 g	12 g	8595 g	100%	0%
13 mm 1/2"	3420 g	3432 g	5175 g	60%	40%
9.5 mm 3/8"	1462 g	4894 g	3713 g	43%	57%
4.8 mm # 4	3407 g	8301 g	306 g	4%	96%
2.4 mm # 8	244 g	8545 g	62 g	1%	99%
Fondo Pasa # 8	62 g	8607 g	0 g	0%	100%
Corrección pasa # 200	0 g	8607 g			

Muestra granulométrica: 5604 g
Módulo de finura: 6.04

Total (incluido pasa # 200): 5604 g

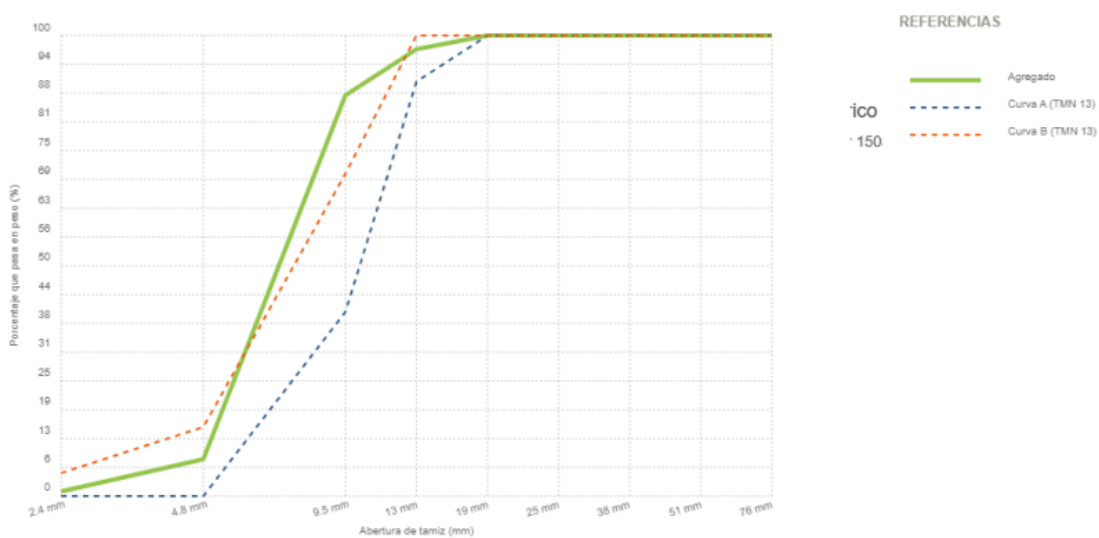


Fig B.1 - Curva granulométrica agregado grueso (Melmix, 2024)

ANEXO C

Documentación del modelado

Geometría forjado

```
###
### This file is generated automatically by SALOME v9.8.0 with dump python functionality
###
import sys
import salome
salome.salome_init()
import salome_notebook
notebook = salome_notebook.NoteBook()
sys.path.insert(0, r'/mnt/c/DocSalome/TPFINAL/fijos')
###
### GEOM component
###
import GEOM
from salome.geom import geomBuilder
import math
import SALOMEDS
geompy = geomBuilder.New()
O = geompy.MakeVertex(0, 0, 0)
OX = geompy.MakeVectorDXDYDZ(1, 0, 0)
OY = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 1, 0)
OZ = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 0, 1)
#VIGUETA1
Vertex_1 = geompy.MakeVertex(0, 0, 0)
Vertex_2 = geompy.MakeVertex(0, 0.1, 0)
Vertex_3 = geompy.MakeVertex(0, 0.1, 0.035)
Vertex_4 = geompy.MakeVertex(0, 0.0675, 0.035)
Vertex_5 = geompy.MakeVertex(0, 0.0675, 0.09)
Vertex_6 = geompy.MakeVertex(0, 0.0325, 0.09)
Vertex_7 = geompy.MakeVertex(0, 0.0325, 0.035)
Vertex_8 = geompy.MakeVertex(0, 0, 0.035)
Line_1 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_1, Vertex_2)
Line_2 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_2, Vertex_3)
Line_3 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_3, Vertex_4)
Line_4 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_4, Vertex_5)
Line_5 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_5, Vertex_6)
Line_6 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_6, Vertex_7)
Line_7 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_7, Vertex_8)
Line_8 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_8, Vertex_1)
Face_1 = geompy.MakeFaceWires([Line_1, Line_2, Line_3, Line_4, Line_5, Line_6, Line_7,
Line_8], 1)
#carainicial
Vertex_9 = geompy.MakeVertex(0, 0, 0.018)
Vertex_10 = geompy.MakeVertex(0, 0.1, 0.018)
Line_9 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_9, Vertex_10)
Line_10 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_7, Vertex_4)
Vertex_11 = geompy.MakeVertex(0, 0.0325, 0.06)
Vertex_12 = geompy.MakeVertex(0, 0.0675, 0.06)
```

```

Line_11 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_11, Vertex_12)
Vertex_13 = geompy.MakeVertex(0, 0.01625, 0)
Vertex_14 = geompy.MakeVertex(0, 0.01625, 0.035)
Line_12 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_13, Vertex_14)
Vertex_15 = geompy.MakeVertex(0, 0.0325, 0)
Line_13 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_15, Vertex_7)
Vertex_16 = geompy.MakeVertex(0, 0.05, 0)
Vertex_17 = geompy.MakeVertex(0, 0.05, 0.09)
Line_14 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_16, Vertex_17)
Vertex_18 = geompy.MakeVertex(0, 0.0675, 0)
Line_15 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_18, Vertex_4)
Vertex_19 = geompy.MakeVertex(0, 0.08375, 0)
Vertex_20 = geompy.MakeVertex(0, 0.08375, 0.035)
Line_16 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_19, Vertex_20)
#lineasparaparticion
Partition_1 = geompy.MakePartition([Face_1], [Line_9, Line_10, Line_11, Line_12,
Line_13, Line_14, Line_15, Line_16], [], [], geompy.ShapeType["FACE"], 0, [], 0)
Extrusion_1 = geompy.MakePrismVecH(Partition_1, OX, 3.8)
#lineasparaapoyo
Vertex_21 = geompy.MakeVertex(0.1, 0.05, 0)
Vertex_22 = geompy.MakeVertex(3.7, 0.05, 0)
geomObj_1 = geompy.MakePlane(Vertex_21, OX, 300)
geomObj_2 = geompy.MakePlane(Vertex_22, OX, 300)
Partition_2 = geompy.MakePartition([Extrusion_1], [geomObj_1, geomObj_2], [], [],
geompy.ShapeType["SOLID"], 0, [], 0)
#VIGUETA2
Translation_1 = geompy.MakeTranslation(Partition_2, 0, 0.5, 0)
#PLACA
Vertex_23 = geompy.MakeVertex(0, -0.2, 0.09)
Vertex_24 = geompy.MakeVertex(0, 0.8, 0.09)
Vertex_25 = geompy.MakeVertex(3.8, 0.8, 0.09)
Vertex_26 = geompy.MakeVertex(3.8, -0.2, 0.09)
Line_17 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_23, Vertex_24)
Line_18 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_24, Vertex_25)
Line_19 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_25, Vertex_26)
Line_20 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_26, Vertex_23)
Face_2 = geompy.MakeFaceWires([Line_17, Line_18, Line_19, Line_20], 1)
#particionesplaca
Vertex_27 = geompy.MakeVertex(3.8, 0.0325, 0.09)
Vertex_28 = geompy.MakeVertex(3.8, 0.0675, 0.09)
Line_21 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_6, Vertex_27)
Line_22 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_5, Vertex_28)
Vertex_29 = geompy.MakeVertex(0, 0.5325, 0.09)
Vertex_30 = geompy.MakeVertex(0, 0.5675, 0.09)
Vertex_31 = geompy.MakeVertex(3.8, 0.5325, 0.09)
Vertex_32 = geompy.MakeVertex(3.8, 0.5675, 0.09)
Line_23 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_29, Vertex_31)
Line_24 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_30, Vertex_32)

```

```

Vertex_33 = geompy.MakeVertex(1.2666, -0.2, 0.09)
geomObj_3 = geompy.MakeVertex(1.2666, 0.8, 0.09)
geomObj_4 = geompy.MakeVertex(2.5333, -0.2, 0.09)
geomObj_5 = geompy.MakeVertex(2.5333, 0.8, 0.09)
Line_25 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_33, geomObj_3)
Line_26 = geompy.MakeLineTwoPnt(geomObj_4, geomObj_5)
Partition_3 = geompy.MakePartition([Face_2], [Line_21, Line_22, Line_23, Line_24,
Line_25, Line_26], [], [], geompy.ShapeType["FACE"], 0, [], 0)
#uniongeometrias
Partition_4 = geompy.MakePartition([Partition_2, Translation_1, Partition_3], [], [],
[], geompy.ShapeType["SOLID"], 0, [], 0)
Partition_5 = geompy.MakePartition([Partition_3], [Partition_4], [], [],
geompy.ShapeType["FACE"], 0, [], 0)
geomObj_6 = geompy.MakeGlueEdges([Partition_4, Partition_5], 1e-07)
PLACA_vertex_17 = geompy.GetSubShape(Partition_5, [17])
Plane_1 = geompy.MakePlane(PLACA_vertex_17, OX, 5)
PLACA_vertex_105 = geompy.GetSubShape(Partition_5, [105])
Plane_2 = geompy.MakePlane(PLACA_vertex_105, OX, 5)
PLACA = geompy.MakePartition([Partition_5], [Plane_1, Plane_2], [], [],
geompy.ShapeType["FACE"], 0, [], 0)
VIGUETAS_vertex_738 = geompy.GetSubShape(Partition_4, [738])
Plane_3 = geompy.MakePlane(VIGUETAS_vertex_738, OX, 5)
VIGUETAS_vertex_743 = geompy.GetSubShape(Partition_4, [743])
Plane_4 = geompy.MakePlane(VIGUETAS_vertex_743, OX, 5)
VIGUETAS = geompy.MakePartition([Partition_4], [Plane_3, Plane_4], [], [],
geompy.ShapeType["SOLID"], 0, [], 0)
#FORJADO
FORJADO = geompy.MakeGlueEdges([PLACA, VIGUETAS], 1e-07)
#grupos
geomObj_7 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(geomObj_7, [25, 317, 573, 416, 102, 218])
geomObj_8 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(geomObj_8, [433, 590, 49, 334, 235, 119])
geomObj_9 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(geomObj_9, [509])
geomObj_10 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(geomObj_10, [403])
geomObj_11 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(geomObj_11, [17])
geomObj_12 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(geomObj_12, [548])
geomObj_13 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(geomObj_13, [444])
geomObj_14 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(geomObj_14, [77])
csupvig1 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["FACE"])
geompy.UnionIDs(csupvig1, [731, 813, 801, 825, 748, 714])
geomObj_15 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])

```

```

geompy.UnionIDs(geomObj_15, [573, 102, 218, 416, 317, 25])
geomObj_16 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(geomObj_16, [590, 334, 433, 235, 49, 119])
geomObj_17 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(geomObj_17, [509])
geomObj_18 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(geomObj_18, [403])
geomObj_19 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(geomObj_19, [17])
geomObj_20 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(geomObj_20, [548])
geomObj_21 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(geomObj_21, [444])
geomObj_22 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(geomObj_22, [77])
csupvig2 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["FACE"])
geompy.UnionIDs(csupvig2, [825, 748, 714, 801, 731, 813])
geomObj_23 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(geomObj_23, [7, 28, 14, 47, 64])
geomObj_24 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(geomObj_24, [81, 54, 71, 35, 23])
contac1 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["FACE"])
geompy.UnionIDs(contac1, [33, 12, 57])
contac2 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["FACE"])
geompy.UnionIDs(contac2, [69, 45, 84])
apoyo1 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(apoyo1, [227, 352, 536, 850, 1099, 693, 2126, 1969, 1812, 1503, 1628,
2375])
apoyo2 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(apoyo2, [299, 1150, 901, 587, 744, 403, 1575, 2426, 1679, 2020, 2177,
1863])
anclcs0 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(anclcs0, [1001])
anclcd0 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(anclcd0, [837])
anclci0 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(anclci0, [219])
anclcs1 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(anclcs1, [1074])
anclcd1 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(anclcd1, [912])
anclci1 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(anclci1, [327])
anclcs2 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(anclcs2, [2277])
anclcd2 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(anclcd2, [2113])
anclci2 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])

```

```

geompy.UnionIDs(anclci2, [1495])
anclcs3 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(anclcs3, [2350])
anclcd3 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(anclcd3, [2188])
anclci3 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(anclci3, [1603])
carga1 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(carga1, [60, 29, 145, 41, 108, 5, 96])
carga2 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(carga2, [113, 150, 70, 155, 170, 48, 65])
placa = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["FACE"])
geompy.UnionIDs(placa, [126, 2603, 143, 2722, 63, 116, 1363, 51, 163, 178, 111, 2713,
13, 58, 148, 20, 83, 1446, 136, 44, 198, 168, 153, 2749, 1327, 158, 32, 2591, 73, 193,
68, 3, 2740, 131])
viguetas = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["SOLID"])
geompy.UnionIDs(viguetas, [651, 1903, 941, 2684, 2289, 1202, 750, 2607, 977, 2579, 2253,
1319, 1726, 409, 334, 2072, 675, 1586, 518, 576, 1064, 2466, 1355, 593, 1408, 1279,
1610, 1105, 808, 1939, 2166, 2567, 2183, 1852, 2643, 392, 1760, 2631, 1777, 2009, 2357,
1444, 1255, 1267, 832, 1122, 2708, 426, 2555, 2026, 1634, 767, 1453, 1384, 639, 501,
873, 1343, 1818, 1139, 1538, 1396, 1081, 699, 890, 1951, 262, 2306, 1226, 1471, 450,
2229, 733, 2200, 1480, 2747, 796, 2108, 953, 1238, 2514, 2531, 1420, 1651, 2543, 2415,
820, 2478, 1173, 2381, 1975, 559, 907, 856, 2096, 1291, 375, 1886, 1303, 627, 1869,
2323, 1514, 484, 1835, 1915, 2729, 1743, 1156, 310, 2738, 2340, 1668, 989, 1367, 663,
2132, 1794, 2619, 1685, 2265, 924, 238, 1013, 2672, 2432, 358, 1214, 1331, 716, 2595,
467, 2449, 2720, 2149, 1702, 2043, 2217, 1030, 965, 610, 1927, 1432, 204, 2241, 784,
2660, 1047, 2490, 2060, 286, 1462, 2398, 542, 1562, 1190, 1992, 2502, 2696, 2084])
cs01 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(cs01, [1027, 1078, 1061, 1044, 1010])
cd1 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(cd1, [843, 894, 860, 877, 911])
ci01 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(ci01, [307, 259, 283, 235, 331])
cs23 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(cs23, [2286, 2337, 2354, 2303, 2320])
cd23 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(cd23, [2153, 2170, 2187, 2136, 2119])
ci23 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(ci23, [1607, 1535, 1511, 1559, 1583])
ap0 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(ap0, [1099, 227, 352, 536, 693, 850])
ap1 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(ap1, [1150, 299, 403, 587, 744, 901])
ap2 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(ap2, [1503, 1628, 1812, 1969, 2126, 2375])
ap3 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(ap3, [1575, 1679, 1863, 2020, 2177, 2426])
contact1_1 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["FACE"])

```

```

geompy.UnionIDs(contac1_1, [1351, 68, 1327, 32, 1446, 1464, 20, 1363, 63, 131])
contac2_1 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["FACE"])
geompy.UnionIDs(contac2_1, [2591, 153, 2627, 148, 2603, 2722, 99, 178, 2749, 2740])
caravig1 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["FACE"])
geompy.UnionIDs(caravig1, [1071, 1163, 1233, 1298, 1360, 1427, 1475, 1600, 1692, 1784,
1876, 1946, 2033, 2103, 2190, 2260, 2347, 2439, 2509, 2574, 2636, 2703, 2751, 324, 416,
508, 600, 670, 757, 827, 914, 984])
caravig0 = geompy.CreateGroup(FORJADO, geompy.ShapeType["FACE"])
geompy.UnionIDs(caravig0, [1083, 1175, 1240, 1309, 1369, 1434, 1492, 1612, 1711, 1796,
1888, 1953, 2045, 2110, 216, 2202, 2274, 2359, 2451, 2516, 2585, 2645, 2710, 336, 435,
520, 612, 677, 769, 834, 926, 998])
geompy.addToStudy( O, 'O' )
geompy.addToStudy( OX, 'OX' )
geompy.addToStudy( OY, 'OY' )
geompy.addToStudy( OZ, 'OZ' )
geompy.addToStudy( Vertex_1, 'Vertex_1' )
geompy.addToStudy( Vertex_2, 'Vertex_2' )
geompy.addToStudy( Vertex_3, 'Vertex_3' )
geompy.addToStudy( Vertex_4, 'Vertex_4' )
geompy.addToStudy( Vertex_5, 'Vertex_5' )
geompy.addToStudy( Vertex_6, 'Vertex_6' )
geompy.addToStudy( Vertex_7, 'Vertex_7' )
geompy.addToStudy( Vertex_8, 'Vertex_8' )
geompy.addToStudy( Line_1, 'Line_1' )
geompy.addToStudy( Line_2, 'Line_2' )
geompy.addToStudy( Line_3, 'Line_3' )
geompy.addToStudy( Line_4, 'Line_4' )
geompy.addToStudy( Line_5, 'Line_5' )
geompy.addToStudy( Line_6, 'Line_6' )
geompy.addToStudy( Line_7, 'Line_7' )
geompy.addToStudy( Line_8, 'Line_8' )
geompy.addToStudy( Face_1, 'Face_1' )
geompy.addToStudy( Vertex_9, 'Vertex_9' )
geompy.addToStudy( Vertex_10, 'Vertex_10' )
geompy.addToStudy( Line_9, 'Line_9' )
geompy.addToStudy( Line_10, 'Line_10' )
geompy.addToStudy( Vertex_11, 'Vertex_11' )
geompy.addToStudy( Vertex_12, 'Vertex_12' )
geompy.addToStudy( Line_11, 'Line_11' )
geompy.addToStudy( Vertex_13, 'Vertex_13' )
geompy.addToStudy( Vertex_14, 'Vertex_14' )
geompy.addToStudy( Line_12, 'Line_12' )
geompy.addToStudy( Vertex_15, 'Vertex_15' )
geompy.addToStudy( Line_13, 'Line_13' )
geompy.addToStudy( Vertex_16, 'Vertex_16' )
geompy.addToStudy( Vertex_17, 'Vertex_17' )
geompy.addToStudy( Line_14, 'Line_14' )
geompy.addToStudy( Vertex_18, 'Vertex_18' )

```

```

geompy.addToStudy( Line_15, 'Line_15' )
geompy.addToStudy( Vertex_19, 'Vertex_19' )
geompy.addToStudy( Vertex_20, 'Vertex_20' )
geompy.addToStudy( Line_16, 'Line_16' )
geompy.addToStudy( Partition_1, 'Partition_1' )
geompy.addToStudy( Extrusion_1, 'Extrusion_1' )
geompy.addToStudy( Vertex_21, 'Vertex_21' )
geompy.addToStudy( Vertex_22, 'Vertex_22' )
geompy.addToStudy( Partition_2, 'Partition_2' )
geompy.addToStudy( Translation_1, 'Translation_1' )
geompy.addToStudy( Vertex_23, 'Vertex_23' )
geompy.addToStudy( Vertex_24, 'Vertex_24' )
geompy.addToStudy( Vertex_25, 'Vertex_25' )
geompy.addToStudy( Vertex_26, 'Vertex_26' )
geompy.addToStudy( Line_17, 'Line_17' )
geompy.addToStudy( Line_18, 'Line_18' )
geompy.addToStudy( Line_19, 'Line_19' )
geompy.addToStudy( Line_20, 'Line_20' )
geompy.addToStudy( Face_2, 'Face_2' )
geompy.addToStudy( Vertex_27, 'Vertex_27' )
geompy.addToStudy( Vertex_28, 'Vertex_28' )
geompy.addToStudy( Line_21, 'Line_21' )
geompy.addToStudy( Line_22, 'Line_22' )
geompy.addToStudy( Vertex_29, 'Vertex_29' )
geompy.addToStudy( Vertex_30, 'Vertex_30' )
geompy.addToStudy( Vertex_31, 'Vertex_31' )
geompy.addToStudy( Vertex_32, 'Vertex_32' )
geompy.addToStudy( Line_23, 'Line_23' )
geompy.addToStudy( Line_24, 'Line_24' )
geompy.addToStudy( Vertex_33, 'Vertex_33' )
geompy.addToStudy( Line_25, 'Line_25' )
geompy.addToStudy( Line_26, 'Line_26' )
geompy.addToStudy( Partition_3, 'Partition_3' )
geompy.addToStudy( Partition_4, 'Partition_4' )
geompy.addToStudy( Partition_5, 'Partition_5' )
geompy.addToStudyInFather( Partition_5, PLACA_vertex_17, 'PLACA:vertex_17' )
geompy.addToStudy( Plane_1, 'Plane_1' )
geompy.addToStudyInFather( Partition_5, PLACA_vertex_105, 'PLACA:vertex_105' )
geompy.addToStudy( Plane_2, 'Plane_2' )
geompy.addToStudy( PLACA, 'PLACA' )
geompy.addToStudyInFather( Partition_4, VIGUETAS_vertex_738, 'VIGUETAS:vertex_738'
)
geompy.addToStudy( Plane_3, 'Plane_3' )
geompy.addToStudyInFather( Partition_4, VIGUETAS_vertex_743, 'VIGUETAS:vertex_743'
)
geompy.addToStudy( Plane_4, 'Plane_4' )
geompy.addToStudy( VIGUETAS, 'VIGUETAS' )
geompy.addToStudy( FORJADO, 'FORJADO' )

```

```

geompy.addToStudyInFather( Partition_2, csupvig1, 'csupvig1' )
geompy.addToStudyInFather( Translation_1, csupvig2, 'csupvig2' )
geompy.addToStudyInFather( Partition_3, contac1, 'contac1' )
geompy.addToStudyInFather( Partition_3, contac2, 'contac2' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, apoyo1, 'apoyo1' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, apoyo2, 'apoyo2' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, anclcs0, 'anclcs0' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, anclcd0, 'anclcd0' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, anclci0, 'anclci0' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, anclcs1, 'anclcs1' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, anclcd1, 'anclcd1' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, anclci1, 'anclci1' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, anclcs2, 'anclcs2' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, anclcd2, 'anclcd2' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, anclci2, 'anclci2' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, anclcs3, 'anclcs3' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, anclcd3, 'anclcd3' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, anclci3, 'anclci3' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, carga1, 'carga1' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, carga2, 'carga2' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, placa, 'placa' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, viguetas, 'viguetas' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, cs01, 'cs01' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, cd1, 'cd1' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, ci01, 'ci01' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, cs23, 'cs23' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, cd23, 'cd23' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, ci23, 'ci23' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, ap0, 'ap0' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, ap1, 'ap1' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, ap2, 'ap2' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, ap3, 'ap3' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, contac1_1, 'contac1' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, contac2_1, 'contac2' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, caravig1, 'caravig1' )
geompy.addToStudyInFather( FORJADO, caravig0, 'caravig0' )
###
### SMESH component
###
import SMESH, SALOMEDS
from salome.smesh import smeshBuilder
smesh = smeshBuilder.New()
#smesh.SetEnablePublish( False ) # Set to False to avoid publish in study if not needed
or in some particular situations:
# multiples meshes built in parallel, complex and
numerous mesh edition (performance)
Mesh_1 = smesh.Mesh(FORJADO)
Regular_1D = Mesh_1.Segment()

```

```

Local_Length_1 = Regular_1D.LocalLength(0.01625, None, 1e-07)
Quadrangle_2D = Mesh_1.Quadrangle(algo=smeshBuilder.QUADRANGLE)
Hexa_3D = Mesh_1.Hexahedron(algo=smeshBuilder.Hexa)
isDone = Mesh_1.Compute()
apoyo1_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(apoyo1, 'apoyo1', SMESH.EDGE)
apoyo2_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(apoyo2, 'apoyo2', SMESH.EDGE)
anclcs0_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcs0, 'anclcs0', SMESH.ELEM0D)
anclcd0_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcd0, 'anclcd0', SMESH.ELEM0D)
anclci0_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclci0, 'anclci0', SMESH.ELEM0D)
anclcs1_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcs1, 'anclcs1', SMESH.ELEM0D)
anclcd1_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcd1, 'anclcd1', SMESH.ELEM0D)
anclci1_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclci1, 'anclci1', SMESH.ELEM0D)
anclcs2_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcs2, 'anclcs2', SMESH.ELEM0D)
anclcd2_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcd2, 'anclcd2', SMESH.ELEM0D)
anclci2_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclci2, 'anclci2', SMESH.ELEM0D)
anclcs3_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcs3, 'anclcs3', SMESH.ELEM0D)
anclcd3_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcd3, 'anclcd3', SMESH.ELEM0D)
anclci3_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclci3, 'anclci3', SMESH.ELEM0D)
carga1_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(carga1, 'carga1', SMESH.EDGE)
carga2_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(carga2, 'carga2', SMESH.EDGE)
apoyo1_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(apoyo1, 'apoyo1', SMESH.NODE)
apoyo2_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(apoyo2, 'apoyo2', SMESH.NODE)
anclcs0_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcs0, 'anclcs0', SMESH.NODE)
anclcd0_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcd0, 'anclcd0', SMESH.NODE)
anclci0_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclci0, 'anclci0', SMESH.NODE)
anclcs1_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcs1, 'anclcs1', SMESH.NODE)
anclcd1_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcd1, 'anclcd1', SMESH.NODE)
anclci1_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclci1, 'anclci1', SMESH.NODE)
anclcs2_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcs2, 'anclcs2', SMESH.NODE)
anclcd2_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcd2, 'anclcd2', SMESH.NODE)
anclci2_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclci2, 'anclci2', SMESH.NODE)
anclcs3_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcs3, 'anclcs3', SMESH.NODE)
anclcd3_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclcd3, 'anclcd3', SMESH.NODE)
anclci3_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(anclci3, 'anclci3', SMESH.NODE)
carga1_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(carga1, 'carga1', SMESH.NODE)
carga2_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(carga2, 'carga2', SMESH.NODE)
placa_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(placa, 'placa', SMESH.FACE)
viguetas_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(viguetas, 'viguetas', SMESH.VOLUME)
placa_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(placa, 'placa', SMESH.NODE)
viguetas_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(viguetas, 'viguetas', SMESH.NODE)
cs01_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(cs01, 'cs01', SMESH.EDGE)
cd1_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(cd1, 'cd1', SMESH.EDGE)
ci01_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(ci01, 'ci01', SMESH.EDGE)
cs23_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(cs23, 'cs23', SMESH.EDGE)
cd23_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(cd23, 'cd23', SMESH.EDGE)
ci23_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(ci23, 'ci23', SMESH.EDGE)
cs01_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(cs01, 'cs01', SMESH.NODE)
cd1_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(cd1, 'cd1', SMESH.NODE)

```

```

ci01_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(ci01,'ci01',SMESH.NODE)
cs23_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(cs23,'cs23',SMESH.NODE)
cd23_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(cd23,'cd23',SMESH.NODE)
ci23_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(ci23,'ci23',SMESH.NODE)
ap0_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(ap0,'ap0',SMESH.EDGE)
ap1_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(ap1,'ap1',SMESH.EDGE)
ap2_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(ap2,'ap2',SMESH.EDGE)
ap3_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(ap3,'ap3',SMESH.EDGE)
ap0_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(ap0,'ap0',SMESH.NODE)
ap1_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(ap1,'ap1',SMESH.NODE)
ap2_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(ap2,'ap2',SMESH.NODE)
ap3_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(ap3,'ap3',SMESH.NODE)
contac1_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(contac1_1,'contac1',SMESH.FACE)
contac2_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(contac2_1,'contac2',SMESH.FACE)
contac1_3 = Mesh_1.GroupOnGeom(contac1_1,'contac1',SMESH.NODE)
contac2_3 = Mesh_1.GroupOnGeom(contac2_1,'contac2',SMESH.NODE)
caravig1_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(caravig1,'caravig1',SMESH.FACE)
caravig0_1 = Mesh_1.GroupOnGeom(caravig0,'caravig0',SMESH.FACE)
caravig1_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(caravig1,'caravig1',SMESH.NODE)
caravig0_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(caravig0,'caravig0',SMESH.NODE)
isDone = Mesh_1.Compute()
[ apoyo1_1, apoyo2_1, anclcs0_1, anclcd0_1, anclci0_1, anclcs1_1, anclcd1_1, anclci1_1,
anclcs2_1, anclcd2_1, anclci2_1, anclcs3_1, anclcd3_1, anclci3_1, carga1_1, carga2_1,
apoyo1_2, apoyo2_2, anclcs0_2, anclcd0_2, anclci0_2, anclcs1_2, anclcd1_2, anclci1_2,
anclcs2_2, anclcd2_2, anclci2_2, anclcs3_2, anclcd3_2, anclci3_2, carga1_2, carga2_2,
placa_1, viguetas_1, placa_2, viguetas_2, cs01_1, cd1_1, ci01_1, cs23_1, cd23_1, ci23_1,
cs01_2, cd1_2, ci01_2, cs23_2, cd23_2, ci23_2, ap0_1, ap1_1, ap2_1, ap3_1, ap0_2,
ap1_2,
ap2_2, ap3_2, contac1_2, contac2_2, contac1_3, contac2_3, caravig1_1, caravig0_1,
caravig1_2, caravig0_2 ] = Mesh_1.GetGroups()
## Set names of Mesh objects
smesh.SetName(anclcd0_1, 'anclcd0')
smesh.SetName(anclci0_1, 'anclci0')
smesh.SetName(anclcs0_1, 'anclcs0')
smesh.SetName(Regular_1D.GetAlgorithm(), 'Regular_1D')
smesh.SetName(Hexa_3D.GetAlgorithm(), 'Hexa_3D')
smesh.SetName(Quadrangle_2D.GetAlgorithm(), 'Quadrangle_2D')
smesh.SetName(Local_Length_1, 'Local Length_1')
smesh.SetName(ap3_1, 'ap3')
smesh.SetName(placa_1, 'placa')
smesh.SetName(contac1_2, 'contac1')
smesh.SetName(contac2_2, 'contac2')
smesh.SetName(caravig1_1, 'caravig1')
smesh.SetName(caravig0_1, 'caravig0')
smesh.SetName(cd1_1, 'cd1')
smesh.SetName(ci01_1, 'ci01')
smesh.SetName(cs23_1, 'cs23')
smesh.SetName(cd23_1, 'cd23')

```

```
smesh.SetName(ci23_1, 'ci23')
smesh.SetName(ap0_1, 'ap0')
smesh.SetName(ap1_1, 'ap1')
smesh.SetName(ap2_1, 'ap2')
smesh.SetName(Mesh_1.GetMesh(), 'Mesh_1')
smesh.SetName(anclci3_1, 'anclci3')
smesh.SetName(anclcd3_1, 'anclcd3')
smesh.SetName(anclcs3_1, 'anclcs3')
smesh.SetName(anclci2_1, 'anclci2')
smesh.SetName(anclcd2_1, 'anclcd2')
smesh.SetName(placa_2, 'placa')
smesh.SetName(caravig0_2, 'caravig0')
smesh.SetName(ap1_2, 'ap1')
smesh.SetName(carga2_2, 'carga2')
smesh.SetName(caravig1_2, 'caravig1')
smesh.SetName(ap2_2, 'ap2')
smesh.SetName(contac2_3, 'contac2')
smesh.SetName(ci23_2, 'ci23')
smesh.SetName(contac1_3, 'contac1')
smesh.SetName(ap0_2, 'ap0')
smesh.SetName(ap3_2, 'ap3')
smesh.SetName(cs23_2, 'cs23')
smesh.SetName(anclcs1_2, 'anclcs1')
smesh.SetName(cd23_2, 'cd23')
smesh.SetName(anclcd1_2, 'anclcd1')
smesh.SetName(cd1_2, 'cd1')
smesh.SetName(ci01_2, 'ci01')
smesh.SetName(anclcs2_2, 'anclcs2')
smesh.SetName(viguetas_2, 'viguetas')
smesh.SetName(anclci1_2, 'anclci1')
smesh.SetName(cs01_2, 'cs01')
smesh.SetName(anclci2_2, 'anclci2')
smesh.SetName(anclcd2_2, 'anclcd2')
smesh.SetName(anclcd3_2, 'anclcd3')
smesh.SetName(anclcs3_2, 'anclcs3')
smesh.SetName(carga1_2, 'carga1')
smesh.SetName(anclci3_2, 'anclci3')
smesh.SetName(apoyo1_2, 'apoyo1')
smesh.SetName(apoyo2_2, 'apoyo2')
smesh.SetName(anclcs0_2, 'anclcs0')
smesh.SetName(anclcd0_2, 'anclcd0')
smesh.SetName(anclci0_2, 'anclci0')
smesh.SetName(viguetas_1, 'viguetas')
smesh.SetName(cs01_1, 'cs01')
smesh.SetName(carga2_1, 'carga2')
smesh.SetName(apoyo1_1, 'apoyo1')
smesh.SetName(carga1_1, 'carga1')
smesh.SetName(apoyo2_1, 'apoyo2')
```

```

smesh.SetName(anlci1_1, 'anlci1')
smesh.SetName(anlcs2_1, 'anlcs2')
smesh.SetName(anlcs1_1, 'anlcs1')
smesh.SetName(anlcd1_1, 'anlcd1')
###
### ASTERSTUDY component
###
if salome.sg.hasDesktop():
    salome.sg.updateObjBrowser()
Geometría tubos
###
### This file is generated automatically by SALOME v9.8.0 with dump python functionality
###
import sys
import salome
salome.salome_init()
import salome_notebook
notebook = salome_notebook.NoteBook()
sys.path.insert(0, r'/mnt/c/DocSalome/TUBO/Entrega')
###
### GEOM component
###
import GEOM
from salome.geom import geomBuilder
import math
import SALOMEDS
geompy = geomBuilder.New()
O = geompy.MakeVertex(0, 0, 0)
OX = geompy.MakeVectorDXDYDZ(1, 0, 0)
OY = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 1, 0)
OZ = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 0, 1)
Circle_1 = geompy.MakeCircle(O, OZ, 0.2)
Circle_2 = geompy.MakeCircle(O, OZ, 0.245)
Vertex_1 = geompy.MakeVertex(0.245, 0, 0)
Vertex_2 = geompy.MakeVertex(-0.245, 0, 0)
Vertex_3 = geompy.MakeVertex(0, 0.245, 0)
Vertex_4 = geompy.MakeVertex(0, -0.245, 0)
Vertex_5 = geompy.MakeVertex(0.245, -0.245, 0)
Vertex_6 = geompy.MakeVertex(-0.245, 0.245, 0)
Vertex_7 = geompy.MakeVertex(0.245, 0.245, 0)
Vertex_8 = geompy.MakeVertex(-0.245, -0.245, 0)
Vertex_9 = geompy.MakeVertex(0.025, 0.245, 0)
Vertex_10 = geompy.MakeVertex(-0.025, 0.245, 0)
Vertex_11 = geompy.MakeVertex(-0.025, -0.245, 0)
Vertex_12 = geompy.MakeVertex(0.025, -0.245, 0)
Vertex_13 = geompy.MakeVertex(0.075, -0.245, 0)
Vertex_14 = geompy.MakeVertex(-0.075, -0.245, 0)
Line_1 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_1, Vertex_2)

```

```

Line_2 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_4, Vertex_3)
Line_3 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_5, Vertex_6)
Line_4 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_7, Vertex_8)
Line_5 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_9, O)
Line_6 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_10, O)
Line_7 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_11, O)
Line_8 = geompy.MakeLineTwoPnt(O, Vertex_12)
Line_9 = geompy.MakeLineTwoPnt(O, Vertex_13)
Line_10 = geompy.MakeLineTwoPnt(O, Vertex_14)
Vertex_15 = geompy.MakeVertex(-0.05, -0.245, 0)
Vertex_16 = geompy.MakeVertex(0.05, -0.245, 0)
Line_11 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_15, O)
Line_12 = geompy.MakeLineTwoPnt(O, Vertex_16)
Face_1 = geompy.MakeFaceWires([Circle_1, Circle_2], 1)
Partition_1 = geompy.MakePartition([Face_1], [Line_1, Line_2, Line_3, Line_4, Line_5,
Line_6, Line_7, Line_8, Line_9, Line_10, Line_11, Line_12], [], [],
geompy.ShapeType["FACE"], 0, [], 0)
Extrusion_1 = geompy.MakePrismVecH(Partition_1, OZ, 1)
apoyo = geompy.CreateGroup(Extrusion_1, geompy.ShapeType["FACE"])
geompy.UnionIDs(apoyo, [134, 182, 326, 374])
carga = geompy.CreateGroup(Extrusion_1, geompy.ShapeType["FACE"])
geompy.UnionIDs(carga, [124, 172])
p1 = geompy.CreateGroup(Extrusion_1, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(p1, [114])
p2 = geompy.CreateGroup(Extrusion_1, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(p2, [265])
apoyo_1 = geompy.CreateGroup(Partition_1, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(apoyo_1, [112, 42, 56, 98])
carga_1 = geompy.CreateGroup(Partition_1, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(carga_1, [39, 53])
[apoyo_1, carga_1] = geompy.GetExistingSubObjects(Partition_1, False)
long = geompy.CreateGroup(Extrusion_1, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(long, [47, 143, 136, 232, 239, 191, 40, 359, 95, 328, 6, 287, 88, 184,
280, 352, 335, 112, 64, 167, 311, 215, 256, 304, 119, 16, 263, 160, 208, 71, 9, 23])
[apoyo, carga, p1, p2, long] = geompy.GetExistingSubObjects(Extrusion_1, False)
caras = geompy.CreateGroup(Extrusion_1, geompy.ShapeType["FACE"])
geompy.UnionIDs(caras, [202, 154, 322, 274, 82, 58, 346, 384, 250, 178, 34, 298, 106,
370, 130, 226, 176, 128, 320, 56, 152, 248, 272, 104, 368, 344, 200, 224, 80, 296, 382,
32])
geompy.addToStudy( O, 'O' )
geompy.addToStudy( OX, 'OX' )
geompy.addToStudy( OY, 'OY' )
geompy.addToStudy( OZ, 'OZ' )
geompy.addToStudy( Circle_1, 'Circle_1' )
geompy.addToStudy( Circle_2, 'Circle_2' )
geompy.addToStudy( Vertex_1, 'Vertex_1' )
geompy.addToStudy( Vertex_2, 'Vertex_2' )
geompy.addToStudy( Vertex_3, 'Vertex_3' )

```

```

geompy.addToStudy( Vertex_4, 'Vertex_4' )
geompy.addToStudy( Vertex_5, 'Vertex_5' )
geompy.addToStudy( Vertex_6, 'Vertex_6' )
geompy.addToStudy( Vertex_7, 'Vertex_7' )
geompy.addToStudy( Vertex_8, 'Vertex_8' )
geompy.addToStudy( Vertex_9, 'Vertex_9' )
geompy.addToStudy( Vertex_10, 'Vertex_10' )
geompy.addToStudy( Vertex_11, 'Vertex_11' )
geompy.addToStudy( Vertex_12, 'Vertex_12' )
geompy.addToStudy( Vertex_13, 'Vertex_13' )
geompy.addToStudy( Vertex_14, 'Vertex_14' )
geompy.addToStudy( Line_1, 'Line_1' )
geompy.addToStudy( Line_2, 'Line_2' )
geompy.addToStudy( Line_3, 'Line_3' )
geompy.addToStudy( Line_4, 'Line_4' )
geompy.addToStudy( Line_5, 'Line_5' )
geompy.addToStudy( Line_6, 'Line_6' )
geompy.addToStudy( Line_7, 'Line_7' )
geompy.addToStudy( Line_8, 'Line_8' )
geompy.addToStudy( Line_9, 'Line_9' )
geompy.addToStudy( Line_10, 'Line_10' )
geompy.addToStudy( Vertex_15, 'Vertex_15' )
geompy.addToStudy( Vertex_16, 'Vertex_16' )
geompy.addToStudy( Line_11, 'Line_11' )
geompy.addToStudy( Line_12, 'Line_12' )
geompy.addToStudy( Face_1, 'Face_1' )
geompy.addToStudy( Partition_1, 'Partition_1' )
geompy.addToStudy( Extrusion_1, 'Extrusion_1' )
geompy.addToStudyInFather( Extrusion_1, apoyo, 'apoyo' )
geompy.addToStudyInFather( Extrusion_1, carga, 'carga' )
geompy.addToStudyInFather( Extrusion_1, p1, 'p1' )
geompy.addToStudyInFather( Extrusion_1, p2, 'p2' )
geompy.addToStudyInFather( Partition_1, apoyo_1, 'apoyo' )
geompy.addToStudyInFather( Partition_1, carga_1, 'carga' )
geompy.addToStudyInFather( Extrusion_1, long, 'long' )
geompy.addToStudyInFather( Extrusion_1, caras, 'caras' )
###
### SMESH component
###
import SMESH, SALOMEDS
from salome.smesh import smeshBuilder
smesh = smeshBuilder.New()
#smesh.SetEnablePublish( False ) # Set to False to avoid publish in study if not needed
or in some particular situations:
# multiples meshes built in parallel, complex and
numerous mesh edition (performance)
Mesh_1 = smesh.Mesh(Partition_1)
Regular_1D = Mesh_1.Segment()

```

```

Local_Length_1 = Regular_1D.LocalLength(0.01,None,1e-07)
QuadFromMedialAxis_1D2D = Mesh_1.Quadrangle(algo=smeshBuilder.QUAD_MA_PROJ)
apoyo_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(apoyo_1,'apoyo',SMESH.EDGE)
carga_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(carga_1,'carga',SMESH.EDGE)
isDone = Mesh_1.Compute()
[ apoyo_2, carga_2 ] = Mesh_1.GetGroups()
Mesh_2 = smesh.Mesh(Extrusion_1)
status = Mesh_2.AddHypothesis(Local_Length_1)
Regular_1D_1 = Mesh_2.Segment()
QuadFromMedialAxis_1D2D_1 =
Mesh_2.Quadrangle(algo=smeshBuilder.QUAD_MA_PROJ)
Hexa_3D = Mesh_2.Hexahedron(algo=smeshBuilder.Hexa)
apoyo_3 = Mesh_2.GroupOnGeom(apoyo,'apoyo',SMESH.FACE)
carga_3 = Mesh_2.GroupOnGeom(carga,'carga',SMESH.FACE)
p1_1 = Mesh_2.GroupOnGeom(p1,'p1',SMESH.NODE)
p2_1 = Mesh_2.GroupOnGeom(p2,'p2',SMESH.NODE)
long_1 = Mesh_2.GroupOnGeom(long,'long',SMESH.EDGE)
apoyo_4 = Mesh_2.GroupOnGeom(apoyo,'apoyo',SMESH.FACE)
carga_4 = Mesh_2.GroupOnGeom(carga,'carga',SMESH.FACE)
p1_2 = Mesh_2.GroupOnGeom(p1,'p1',SMESH.ELEMOD)
p2_2 = Mesh_2.GroupOnGeom(p2,'p2',SMESH.ELEMOD)
long_2 = Mesh_2.GroupOnGeom(long,'long',SMESH.EDGE)
apoyo_5 = Mesh_2.GroupOnGeom(apoyo,'apoyo',SMESH.NODE)
carga_5 = Mesh_2.GroupOnGeom(carga,'carga',SMESH.NODE)
p1_3 = Mesh_2.GroupOnGeom(p1,'p1',SMESH.NODE)
p2_3 = Mesh_2.GroupOnGeom(p2,'p2',SMESH.NODE)
long_3 = Mesh_2.GroupOnGeom(long,'long',SMESH.NODE)
Regular_1D_2 = Mesh_2.Segment(geom=long)
Number_of_Segments_1 = Regular_1D_2.NumberOfSegments(10)
[ apoyo_3, carga_3, p1_1, p2_1, long_1, apoyo_4, carga_4, p1_2, p2_2, long_2, apoyo_5,
carga_5, p1_3, p2_3, long_3 ] = Mesh_2.GetGroups()
caras_1 = Mesh_2.GroupOnGeom(caras,'caras',SMESH.FACE)
caras_2 = Mesh_2.GroupOnGeom(caras,'caras',SMESH.NODE)
Regular_1D_3 = Mesh_2.Segment(geom=caras)
status = Mesh_2.AddHypothesis(Local_Length_1,caras)
QuadFromMedialAxis_1D2D_2 =
Mesh_2.Quadrangle(algo=smeshBuilder.QUAD_MA_PROJ,geom=caras)
[ apoyo_3, carga_3, p1_1, p2_1, long_1, apoyo_4, carga_4, p1_2, p2_2, long_2, apoyo_5,
carga_5, p1_3, p2_3, long_3, caras_1, caras_2 ] = Mesh_2.GetGroups()
isDone = Mesh_2.Compute()
[ apoyo_3, carga_3, p1_1, p2_1, long_1, apoyo_4, carga_4, p1_2, p2_2, long_2, apoyo_5,
carga_5, p1_3, p2_3, long_3, caras_1, caras_2 ] = Mesh_2.GetGroups()
Sub_mesh_1 = Regular_1D_2.GetSubMesh()
Sub_mesh_2 = Regular_1D_3.GetSubMesh()
## Set names of Mesh objects
smesh.SetName(Sub_mesh_1, 'Sub-mesh_1')
smesh.SetName(carga_4, 'carga')
smesh.SetName(Sub_mesh_2, 'Sub-mesh_2')

```

```

smesh.SetName(caras_1, 'caras')
smesh.SetName(carga_3, 'carga')
smesh.SetName(apoyo_4, 'apoyo')
smesh.SetName(apoyo_3, 'apoyo')
smesh.SetName(p1_2, 'p1')
smesh.SetName(p2_2, 'p2')
smesh.SetName(caras_2, 'caras')
smesh.SetName(carga_5, 'carga')
smesh.SetName(p1_3, 'p1')
smesh.SetName(p2_3, 'p2')
smesh.SetName(long_3, 'long')
smesh.SetName(p1_1, 'p1')
smesh.SetName(p2_1, 'p2')
smesh.SetName(apoyo_5, 'apoyo')
smesh.SetName(Regular_1D.GetAlgorithm(), 'Regular_1D')
smesh.SetName(QuadFromMedialAxis_1D2D.GetAlgorithm(),
'QuadFromMedialAxis_1D2D')
smesh.SetName(Hexa_3D.GetAlgorithm(), 'Hexa_3D')
smesh.SetName(Mesh_1.GetMesh(), 'Mesh_1')
smesh.SetName(Mesh_2.GetMesh(), 'Mesh_2')
smesh.SetName(apoyo_2, 'apoyo')
smesh.SetName(carga_2, 'carga')
smesh.SetName(long_2, 'long')
smesh.SetName(long_1, 'long')
smesh.SetName(Number_of_Segments_1, 'Number of Segments_1')
smesh.SetName(Local_Length_1, 'Local Length_1')
###
### ASTERSTUDY component
###
if salome.sg.hasDesktop():
    salome.sg.updateObjBrowser()
tubo60
###
### This file is generated automatically by SALOME v9.8.0 with dump python functionality
###
import sys
import salome
salome.salome_init()
import salome_notebook
notebook = salome_notebook.NoteBook()
sys.path.insert(0, r'/mnt/c/DocSalome/TUBO/Entrega')
###
### GEOM component
###
import GEOM
from salome.geom import geomBuilder
import math
import SALOMEDS

```

```

geompy = geomBuilder.New()
O = geompy.MakeVertex(0, 0, 0)
OX = geompy.MakeVectorDXDYDZ(1, 0, 0)
OY = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 1, 0)
OZ = geompy.MakeVectorDXDYDZ(0, 0, 1)
Circle_1 = geompy.MakeCircle(O, OZ, 0.3)
Circle_2 = geompy.MakeCircle(O, OZ, 0.36)
Vertex_1 = geompy.MakeVertex(0.36, 0, 0)
Vertex_2 = geompy.MakeVertex(-0.36, 0, 0)
Vertex_3 = geompy.MakeVertex(0, 0.36, 0)
Vertex_4 = geompy.MakeVertex(0, -0.36, 0)
Vertex_5 = geompy.MakeVertex(0.36, -0.36, 0)
Vertex_6 = geompy.MakeVertex(-0.36, 0.36, 0)
Vertex_7 = geompy.MakeVertex(0.36, 0.36, 0)
Vertex_8 = geompy.MakeVertex(-0.36, -0.36, 0)
Vertex_9 = geompy.MakeVertex(0.025, 0.36, 0)
Vertex_10 = geompy.MakeVertex(-0.025, 0.36, 0)
Vertex_11 = geompy.MakeVertex(-0.025, -0.36, 0)
Vertex_12 = geompy.MakeVertex(0.025, -0.36, 0)
Vertex_13 = geompy.MakeVertex(0.075, -0.36, 0)
Vertex_14 = geompy.MakeVertex(-0.075, -0.36, 0)
Line_1 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_1, Vertex_2)
Line_2 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_4, Vertex_3)
Line_3 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_5, Vertex_6)
Line_4 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_7, Vertex_8)
Line_5 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_9, O)
Line_6 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_10, O)
Line_7 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_11, O)
Line_8 = geompy.MakeLineTwoPnt(O, Vertex_12)
Line_9 = geompy.MakeLineTwoPnt(O, Vertex_13)
Line_10 = geompy.MakeLineTwoPnt(O, Vertex_14)
Vertex_15 = geompy.MakeVertex(-0.05, -0.36, 0)
Vertex_16 = geompy.MakeVertex(0.05, -0.36, 0)
Line_11 = geompy.MakeLineTwoPnt(Vertex_15, O)
Line_12 = geompy.MakeLineTwoPnt(O, Vertex_16)
Face_1 = geompy.MakeFaceWires([Circle_1, Circle_2], 1)
Partition_1 = geompy.MakePartition([Face_1], [Line_1, Line_2, Line_3, Line_4, Line_5,
Line_6, Line_7, Line_8, Line_9, Line_10, Line_11, Line_12], [], [],
geompy.ShapeType["FACE"], 0, [], 0)
Extrusion_1 = geompy.MakePrismVecH(Partition_1, OZ, 1.2)
apoyo = geompy.CreateGroup(Extrusion_1, geompy.ShapeType["FACE"])
geompy.UnionIDs(apoyo, [134, 182, 326, 374])
carga = geompy.CreateGroup(Extrusion_1, geompy.ShapeType["FACE"])
geompy.UnionIDs(carga, [124, 172])
p1 = geompy.CreateGroup(Extrusion_1, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(p1, [114])
p2 = geompy.CreateGroup(Extrusion_1, geompy.ShapeType["VERTEX"])
geompy.UnionIDs(p2, [265])

```

```

apoyo_1 = geompy.CreateGroup(Partition_1, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(apoyo_1, [112, 42, 56, 98])
carga_1 = geompy.CreateGroup(Partition_1, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(carga_1, [39, 53])
[apoyo_1, carga_1] = geompy.GetExistingSubObjects(Partition_1, False)
long = geompy.CreateGroup(Extrusion_1, geompy.ShapeType["EDGE"])
geompy.UnionIDs(long, [47, 143, 136, 232, 239, 191, 40, 359, 95, 328, 6, 287, 88, 184,
280, 352, 335, 112, 64, 167, 311, 215, 256, 304, 119, 16, 263, 160, 208, 71, 9, 23])
[apoyo, carga, p1, p2, long] = geompy.GetExistingSubObjects(Extrusion_1, False)
caras = geompy.CreateGroup(Extrusion_1, geompy.ShapeType["FACE"])
geompy.UnionIDs(caras, [202, 154, 322, 274, 82, 58, 346, 384, 250, 178, 34, 298, 106,
370, 130, 226, 176, 128, 320, 56, 152, 248, 272, 104, 368, 344, 200, 224, 80, 296, 382,
32])
geompy.addToStudy( O, 'O' )
geompy.addToStudy( OX, 'OX' )
geompy.addToStudy( OY, 'OY' )
geompy.addToStudy( OZ, 'OZ' )
geompy.addToStudy( Circle_1, 'Circle_1' )
geompy.addToStudy( Circle_2, 'Circle_2' )
geompy.addToStudy( Vertex_1, 'Vertex_1' )
geompy.addToStudy( Vertex_2, 'Vertex_2' )
geompy.addToStudy( Vertex_3, 'Vertex_3' )
geompy.addToStudy( Vertex_4, 'Vertex_4' )
geompy.addToStudy( Vertex_5, 'Vertex_5' )
geompy.addToStudy( Vertex_6, 'Vertex_6' )
geompy.addToStudy( Vertex_7, 'Vertex_7' )
geompy.addToStudy( Vertex_8, 'Vertex_8' )
geompy.addToStudy( Vertex_9, 'Vertex_9' )
geompy.addToStudy( Vertex_10, 'Vertex_10' )
geompy.addToStudy( Vertex_11, 'Vertex_11' )
geompy.addToStudy( Vertex_12, 'Vertex_12' )
geompy.addToStudy( Vertex_13, 'Vertex_13' )
geompy.addToStudy( Vertex_14, 'Vertex_14' )
geompy.addToStudy( Line_1, 'Line_1' )
geompy.addToStudy( Line_2, 'Line_2' )
geompy.addToStudy( Line_3, 'Line_3' )
geompy.addToStudy( Line_4, 'Line_4' )
geompy.addToStudy( Line_5, 'Line_5' )
geompy.addToStudy( Line_6, 'Line_6' )
geompy.addToStudy( Line_7, 'Line_7' )
geompy.addToStudy( Line_8, 'Line_8' )
geompy.addToStudy( Line_9, 'Line_9' )
geompy.addToStudy( Line_10, 'Line_10' )
geompy.addToStudy( Vertex_15, 'Vertex_15' )
geompy.addToStudy( Vertex_16, 'Vertex_16' )
geompy.addToStudy( Line_11, 'Line_11' )
geompy.addToStudy( Line_12, 'Line_12' )
geompy.addToStudy( Face_1, 'Face_1' )

```

```

geompy.addToStudy( Partition_1, 'Partition_1' )
geompy.addToStudy( Extrusion_1, 'Extrusion_1' )
geompy.addToStudyInFather( Extrusion_1, apoyo, 'apoyo' )
geompy.addToStudyInFather( Extrusion_1, carga, 'carga' )
geompy.addToStudyInFather( Extrusion_1, p1, 'p1' )
geompy.addToStudyInFather( Extrusion_1, p2, 'p2' )
geompy.addToStudyInFather( Partition_1, apoyo_1, 'apoyo' )
geompy.addToStudyInFather( Partition_1, carga_1, 'carga' )
geompy.addToStudyInFather( Extrusion_1, long, 'long' )
geompy.addToStudyInFather( Extrusion_1, caras, 'caras' )
###
### SMESH component
###
import SMESH, SALOMEDS
from salome.smesh import smeshBuilder
smesh = smeshBuilder.New()
#smesh.SetEnablePublish( False ) # Set to False to avoid publish in study if not needed
or in some particular situations:
# multiples meshes built in parallel, complex and
numerous mesh edition (performance)
Mesh_1 = smesh.Mesh(Partition_1)
Regular_1D = Mesh_1.Segment()
Local_Length_1 = Regular_1D.LocalLength(0.01,None,1e-07)
QuadFromMedialAxis_1D2D = Mesh_1.Quadrangle(algo=smeshBuilder.QUAD_MA_PROJ)
apoyo_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(apoyo_1,'apoyo',SMESH.EDGE)
carga_2 = Mesh_1.GroupOnGeom(carga_1,'carga',SMESH.EDGE)
isDone = Mesh_1.Compute()
[ apoyo_2, carga_2 ] = Mesh_1.GetGroups()
Mesh_2 = smesh.Mesh(Extrusion_1)
status = Mesh_2.AddHypothesis(Local_Length_1)
Regular_1D_1 = Mesh_2.Segment()
QuadFromMedialAxis_1D2D_1 =
Mesh_2.Quadrangle(algo=smeshBuilder.QUAD_MA_PROJ)
Hexa_3D = Mesh_2.Hexahedron(algo=smeshBuilder.Hexa)
apoyo_3 = Mesh_2.GroupOnGeom(apoyo,'apoyo',SMESH.FACE)
carga_3 = Mesh_2.GroupOnGeom(carga,'carga',SMESH.FACE)
p1_1 = Mesh_2.GroupOnGeom(p1,'p1',SMESH.NODE)
p2_1 = Mesh_2.GroupOnGeom(p2,'p2',SMESH.NODE)
long_1 = Mesh_2.GroupOnGeom(long,'long',SMESH.EDGE)
apoyo_4 = Mesh_2.GroupOnGeom(apoyo,'apoyo',SMESH.FACE)
carga_4 = Mesh_2.GroupOnGeom(carga,'carga',SMESH.FACE)
p1_2 = Mesh_2.GroupOnGeom(p1,'p1',SMESH.ELEM0D)
p2_2 = Mesh_2.GroupOnGeom(p2,'p2',SMESH.ELEM0D)
long_2 = Mesh_2.GroupOnGeom(long,'long',SMESH.EDGE)
apoyo_5 = Mesh_2.GroupOnGeom(apoyo,'apoyo',SMESH.NODE)
carga_5 = Mesh_2.GroupOnGeom(carga,'carga',SMESH.NODE)
p1_3 = Mesh_2.GroupOnGeom(p1,'p1',SMESH.NODE)
p2_3 = Mesh_2.GroupOnGeom(p2,'p2',SMESH.NODE)

```

```

long_3 = Mesh_2.GroupOnGeom(long,'long',SMESH.NODE)
Regular_1D_2 = Mesh_2.Segment(geom=long)
Number_of_Segments_1 = Regular_1D_2.NumberOfSegments(10)
[ apoyo_3, carga_3, p1_1, p2_1, long_1, apoyo_4, carga_4, p1_2, p2_2, long_2, apoyo_5,
carga_5, p1_3, p2_3, long_3 ] = Mesh_2.GetGroups()
caras_1 = Mesh_2.GroupOnGeom(caras,'caras',SMESH.FACE)
caras_2 = Mesh_2.GroupOnGeom(caras,'caras',SMESH.NODE)
Regular_1D_3 = Mesh_2.Segment(geom=caras)
status = Mesh_2.AddHypothesis(Local_Length_1,caras)
QuadFromMedialAxis_1D2D_2 =
Mesh_2.Quadrangle(algo=smeshBuilder.QUAD_MA_PROJ,geom=caras)
[ apoyo_3, carga_3, p1_1, p2_1, long_1, apoyo_4, carga_4, p1_2, p2_2, long_2, apoyo_5,
carga_5, p1_3, p2_3, long_3, caras_1, caras_2 ] = Mesh_2.GetGroups()
isDone = Mesh_2.Compute()
[ apoyo_3, carga_3, p1_1, p2_1, long_1, apoyo_4, carga_4, p1_2, p2_2, long_2, apoyo_5,
carga_5, p1_3, p2_3, long_3, caras_1, caras_2 ] = Mesh_2.GetGroups()
Sub_mesh_1 = Regular_1D_2.GetSubMesh()
Sub_mesh_2 = Regular_1D_3.GetSubMesh()
## Set names of Mesh objects
smesh.SetName(Sub_mesh_1, 'Sub-mesh_1')
smesh.SetName(carga_4, 'carga')
smesh.SetName(Sub_mesh_2, 'Sub-mesh_2')
smesh.SetName(caras_1, 'caras')
smesh.SetName(carga_3, 'carga')
smesh.SetName(apoyo_4, 'apoyo')
smesh.SetName(apoyo_3, 'apoyo')
smesh.SetName(p1_2, 'p1')
smesh.SetName(p2_2, 'p2')
smesh.SetName(caras_2, 'caras')
smesh.SetName(carga_5, 'carga')
smesh.SetName(p1_3, 'p1')
smesh.SetName(p2_3, 'p2')
smesh.SetName(long_3, 'long')
smesh.SetName(p1_1, 'p1')
smesh.SetName(p2_1, 'p2')
smesh.SetName(apoyo_5, 'apoyo')
smesh.SetName(Regular_1D.GetAlgorithm(), 'Regular_1D')
smesh.SetName(QuadFromMedialAxis_1D2D.GetAlgorithm(),
'QuadFromMedialAxis_1D2D')
smesh.SetName(Hexa_3D.GetAlgorithm(), 'Hexa_3D')
smesh.SetName(Mesh_1.GetMesh(), 'Mesh_1')
smesh.SetName(Mesh_2.GetMesh(), 'Mesh_2')
smesh.SetName(apoyo_2, 'apoyo')
smesh.SetName(carga_2, 'carga')
smesh.SetName(long_2, 'long')
smesh.SetName(long_1, 'long')
smesh.SetName(Number_of_Segments_1, 'Number of Segments_1')
smesh.SetName(Local_Length_1, 'Local Length_1')

```

```

###
### ASTERSTUDY component
###
if salome.sg.hasDesktop():
  salome.sg.updateObjBrowser()
Código forjado
DEBUT(LANG='FR')
mesh = LIRE_MALLAGE(identifiser='0:1',
  UNITE=20)
mesh1 = CREA_MALLAGE(identifiser='1:1',
  CREA_MAILLE=_F(GROUP_MA=('placa', ),
  NOM='malla',
  PREF_MAILLE='B'),
  MALLAGE=mesh)
meshtot = CREA_MALLAGE(identifiser='2:1',
  CREA_MAILLE=( _F(GROUP_MA=('contac1', ),
  NOM='con1',
  PREF_MAILLE='C'),
  _F(GROUP_MA=('contac2', ),
  NOM='con2',
  PREF_MAILLE='D')),
  MALLAGE=mesh1)
meshtot = DEFI_GROUP(identifiser='3:1',
  reuse=meshtot,
  CREA_GROUP_NO=_F(TOUT_GROUP_MA='OUI'),
  MALLAGE=meshtot)
model = AFFE_MODELE(identifiser='4:1',
  AFFE=( _F(GROUP_MA=('placa', ),
  MODELISATION='DKT',
  PHENOMENE='MECANIQUE'),
  _F(GROUP_MA=('malla', ),
  MODELISATION='GRILLE_EXCENTRE',
  PHENOMENE='MECANIQUE'),
  _F(GROUP_MA=('viguetas', ),
  MODELISATION='3D',
  PHENOMENE='MECANIQUE'),
  _F(GROUP_MA=('cs01', 'cd1', 'ci01', 'cs23', 'cd23', 'ci23'),
  MODELISATION='BARRE',
  PHENOMENE='MECANIQUE')),
  MALLAGE=meshtot)
elemprop = AFFE_CARA_ELEM(identifiser='5:1',
  BARRE=_F(CARA='A',
  GROUP_MA=('cs01', 'cd1', 'ci01', 'cs23', 'cd23',
  'ci23'),
  SECTION='GENERALE',
  VALE=7.95e-06),
  COQUE=( _F(EPAIS=0.05,
  GROUP_MA=('placa', )),

```

```

_F(EPAIS=0.09,
GROUP_MA=('contac1', 'contac2')),
GRILLE=_F(ANGL_REP_1=(0.0, 0.0),
EXCENTREMENT=0.0,
GROUP_MA=('malla', ),
SECTION=0.000188),
MODELE=model)
h20 = DEFI_MATERIAU(identifcier='6:1',
ELAS=_F(E=21019000000.0,
NU=0.2,
RHO=2400.0))
h30 = DEFI_MATERIAU(identifcier='7:1',
BPEL_BETON=_F(),
ELAS=_F(E=25700000000.0,
NU=0.2,
RHO=2400.0))
c1950 = DEFI_MATERIAU(identifcier='8:1',
BPEL_ACIER=_F(),
ECRO_LINE=_F(D_SIGM_EPSI=0.0,
SY=1600.0),
ELAS=_F(E=200000000000.0,
NU=0.3,
RHO=7850.0))
adn420 = DEFI_MATERIAU(identifcier='9:1',
ECRO_LINE=_F(D_SIGM_EPSI=235.0,
SY=0.0),
ELAS=_F(E=200000000000.0,
NU=0.3,
RHO=7850.0))
fieldmat = AFFE_MATERIAU(identifcier='10:1',
AFFE=(_F(GROUP_MA=('placa', ),
MATER=(h20, )),
_F(GROUP_MA=('malla', ),
MATER=(adn420, )),
_F(GROUP_MA=('viguetas', ),
MATER=(h30, )),
_F(GROUP_MA=('cs01', 'cd1', 'ci01', 'cs23', 'cd23',
'ci23'),
MATER=(c1950, )),
MODELE=model)
listr = DEFI_LIST_REEL(identifcier='11:1',
DEBUT=0.0,
INTERVALLE=_F(JUSQU_A=10.0,
PAS=5.0))
times = DEFI_LIST_INST(identifcier='12:1',
DEFI_LIST=_F(LIST_INST=listr,
SUBD_PAS=4))
fppcapa = DEFI_FONCTION(identifcier='13:1',

```

```

NOM_PARA='INST',
VALE=(5.0, 0.0, 10.0, 1.0)
fescalons = DEFI_FONCTION(identif= '14:1',
INTERPOL=('LIN', ),
NOM_PARA='INST',
VALE=(20.0, 0.0, 30.0, 0.0, 40.0, 4.926, 50.0, 12.279, 60.0,
26.985, 70.0, 41.691, 80.0, 54.559, 90.0, 67.412, 100.0, 0.0))
listr2 = DEFI_LIST_REEL(identif= '15:1',
DEBUT=10.0,
INTERVALLE=_F(JUSQU_A=20.0,
PAS=5.0))
listr3 = DEFI_LIST_REEL(identif= '16:1',
DEBUT=20.0,
INTERVALLE=_F(JUSQU_A=100.0,
PAS=5.0))
ppvignet = AFFE_CHAR_MECA(identif= '17:1',
MODELE=model,
PESANTEUR=_F(DIRECTION=(0.0, 0.0, -1.0),
GRAVITE=9.81,
GROUP_MA=('viguetas', ))
ddl = AFFE_CHAR_MECA(identif= '18:1',
DDL_IMPO=_F(DX=0.0,
DY=0.0,
DZ=0.0,
GROUP_NO=('ap0', 'ap1', 'ap2', 'ap3')),
MODELE=model,
PESANTEUR=_F(DIRECTION=(0.0, 0.0, -1.0),
GRAVITE=0.0001))
unnamed = DEFI_CABLE_BP(identif= '19:1',
ADHERENT='OUI',
CARA_ELEM=elemprop,
CHAM_MATER=fieldmat,
DEFI_CABLE=( _F(GROUP_MA=('cs01', ),
GROUP_NO_ANCRAGE=('anclcs0', 'anclcs1')),
_F(GROUP_MA=('cd1', ),
GROUP_NO_ANCRAGE=('anclcd0', 'anclcd1')),
_F(GROUP_MA=('ci01', ),
GROUP_NO_ANCRAGE=('anclci0', 'anclci1')),
_F(GROUP_MA=('cs23', ),
GROUP_NO_ANCRAGE=('anclcs2', 'anclcs3')),
_F(GROUP_MA=('cd23', ),
GROUP_NO_ANCRAGE=('anclcd2', 'anclcd3')),
_F(GROUP_MA=('ci23', ),
GROUP_NO_ANCRAGE=('anclci2', 'anclci3'))),
GROUP_MA_BETON=('viguetas', ),
MODELE=model,
RECU_LANCAGE=0.004,
TENSION_INIT=1561.0,

```

```

TYPE_ANCRAGE=('ACTIF', 'PASSIF')
relacinebp = AFFE_CHAR_MECA(identifieur='20:1',
MODELE=model,
RELA_CINE_BP=_F(CABLE_BP=unnamed,
RELA_CINE='OUI',
SIGM_BPEL='NON'))
ppcapa = AFFE_CHAR_MECA(identifieur='21:1',
MODELE=model,
PESANTEUR=_F(DIRECTION=(0.0, 0.0, -1.0),
GRAVITE=9.81,
GROUP_MA=('placa', )))
escalons = AFFE_CHAR_MECA(identifieur='22:1',
FORCE_NODALE=_F(FX=0.0,
FY=0.0,
FZ=-1.0,
GROUP_NO=('carga1', 'carga2')),
MODELE=model)
resnonl = STAT_NON_LINE(identifieur='23:1',
CARA_ELEM=elemprop,
CHAM_MATER=fieldmat,
COMPORTEMENT=( _F(GROUP_MA=('viguetas', ),
RELATION='ELAS'),
_F(GROUP_MA=('cs01', 'cd1', 'ci01', 'cs23',
'cd23', 'ci23'),
RELATION='SANS'),
_F(GROUP_MA=('placa', ),
RELATION='ELAS'),
_F(GROUP_MA=('malla', ),
RELATION='ELAS')),
CONVERGENCE=_F(ITER_GLOB_MAXI=100),
EXCIT=( _F(CHARGE=ddl),
_F(CHARGE=relacinebp)),
INCREMENT=_F(LIST_INST=listr),
METHODE='NEWTON',
MODELE=model,
NEWTON=_F(MATRICE='TANGENTE'),
SOLVEUR=_F(METHODE='MUMPS'))
resnonl = CALC_PRECONT(identifieur='24:1',
reuse=resnonl,
CABLE_BP=(unnamed, ),
CARA_ELEM=elemprop,
CHAM_MATER=fieldmat,
COMPORTEMENT=( _F(GROUP_MA=('cs01', 'cd1', 'ci01', 'cs23', 'cd23',
'ci23', 'viguetas'),
RELATION='ELAS'),
_F(GROUP_MA=('placa', ),
RELATION='ELAS'),
_F(GROUP_MA=('malla', ),

```

```

RELATION='ELAS')),
ETAT_INIT=_F(EVOL_NOLI=resnonl),
EXCIT=_F(CHARGE=ddl),
INCREMENT=_F(LIST_INST=listr2),
MODELE=model)
resnonl = STAT_NON_LINE(identif=25:1',
reuse=resnonl,
CARA_ELEM=elemprop,
CHAM_MATER=fieldmat,
COMPORTEMENT=( _F(GROUP_MA=('cs01', 'cd1', 'ci01', 'cs23',
'cd23', 'ci23', 'viguetas'),
RELATION='ELAS'),
_F(GROUP_MA=('placa', ),
RELATION='ELAS'),
_F(GROUP_MA=('malla', ),
RELATION='ELAS')),
ETAT_INIT=_F(EVOL_NOLI=resnonl),
EXCIT=( _F(CHARGE=ddl),
_F(CHARGE=ppviguet),
_F(CHARGE=relacinebp),
_F(CHARGE=ppcapa),
_F(CHARGE=escalons,
FONC_MULT=fescalons)),
INCREMENT=_F(LIST_INST=listr3),
MODELE=model,
RESULTAT=resnonl)
unnamed = CALC_CHAMP(identif=26:1',
CONTRAINTE=('SIGM_ELNO', ),
DEFORMATION=('EPSI_ELNO', ),
RESULTAT=resnonl)
unnamed = CALC_CHAMP(identif=27:1',
reuse=unnamed,
CONTRAINTE=('SIGM_NOEU', ),
DEFORMATION=('EPSI_NOEU', ),
RESULTAT=unnamed)
DZmax = POST_RELEVE_T(identif=28:1',
ACTION=_F(INTITULE='DZ max',
NOM_CHAM='DEPL',
OPERATION=('EXTREMA', ),
RESULTAT=resnonl))
DZ = POST_RELEVE_T(identif=29:1',
ACTION=_F(GROUP_NO=('viguetas', ),
INTITULE='DZ',
NOM_CHAM='DEPL',
NOM_CMP=('DZ', ),
OPERATION=('EXTRACTION', ),
RESULTAT=resnonl))
IMPR_RESU(identif=30:1',

```

```

RESU=_F(RERESULTAT=resnonl),
UNITE=80)
IMPR_RESU(identifiser='31:1',
RESU=_F(RERESULTAT=unnamed),
UNITE=3)
IMPR_TABLE(identifiser='32:1',
TABLE=DZmax,
UNITE=8)
IMPR_TABLE(identifiser='33:1',
TABLE=DZ,
UNITE=2)
FIN()
Codigo tubo40
DEBUT(identifiser='0:1',
LANG='FR')
mesh = LIRE_MAILLAGE(identifiser='1:1',
FORMAT='MED',
UNITE=3)
model = AFFE_MODELE(identifiser='2:1',
AFFE=_F(MODELISATION='3D',
PHENOMENE='MECANIQUE',
TOUT='OUI'),
MAILLAGE=mesh)
mater = DEFI_MATERIAU(identifiser='3:1',
BETON_ECRO_LINE=_F(D_SIGM_EPSI=-6000000000.0,
SYC=35000000.0,
SYT=3690000.0),
ECRO_LINE=_F(D_SIGM_EPSI=0.0,
SY=3690000.0),
ELAS=_F(E=20000000000.0,
NU=0.2,
RHO=2400.0))
mater0 = DEFI_MATERIAU(identifiser='4:1',
ECRO_LINE=_F(D_SIGM_EPSI=0.0,
SY=11000000.0),
ELAS=_F(E=26000000000.0,
NU=0.15,
RHO=1100.0))
fieldmat = AFFE_MATERIAU(identifiser='5:1',
AFFE=_F(MATER=(mater, ),
TOUT='OUI'),
MODELE=model)
listr = DEFI_LIST_REEL(identifiser='6:1',
DEBUT=0.0,
INTERVALLE=_F(JUSQU_A=20.0,
PAS=0.5))
listr0 = DEFI_LIST_REEL(identifiser='7:1',
DEBUT=10.0,

```

```

INTERVALLE=_F(JUSQU_A=20.0,
PAS=0.5))
func = DEFI_FONCTION(identifieur='8:1',
NOM_PARA='INST',
VALE=(0.0, 0.0, 5.0, 0.001, 10.0, 0.002, 12.0, 0.003, 14.0, 0.004,
16.0, 0.006, 18.0, 0.008, 20.0, 0.01))
escalon = DEFI_FONCTION(identifieur='9:1',
NOM_PARA='INST',
VALE=(0.0, 0.0, 5.0, 182.0, 10.0, 364.0, 15.0, 364.0, 20.0,
545.0))
load = AFFE_CHAR_MECA(identifieur='10:1',
DDL_IMPO=_F(DX=0.0,
DY=0.0,
DZ=0.0,
GROUP_NO=('apoyo', )),
MODELE=model)
load0 = AFFE_CHAR_MECA(identifieur='11:1',
DDL_IMPO=_F(DX=0.0,
DY=-1.0,
DZ=0.0,
GROUP_MA=('carga', )),
MODELE=model)
load1 = AFFE_CHAR_MECA(identifieur='12:1',
FORCE_NODALE=_F(FX=0.0,
FY=-1.0,
FZ=0.0,
GROUP_NO=('carga', )),
MODELE=model)
resnonl = STAT_NON_LINE(identifieur='13:1',
CHAM_MATER=fieldmat,
COMPOTEMENT=_F(RELATION='VMIS_ISOT_LINE',
TOUT='OUI'),
CONVERGENCE=_F(ITER_GLOB_MAXI=150),
EXCIT=(_F(CHARGE=load),
_F(CHARGE=load1,
FONC_MULT=escalon)),
INCREMENT=_F(LIST_INST=listr),
MODELE=model,
NEWTON=_F(REAC_ITER=5))
unnamed = CALC_CHAMP(identifieur='14:1',
CONTRAENTE=('SIGM_ELNO', ),
RESULTAT=resnonl)
DYP1 = POST_RELEVE_T(identifieur='15:1',
ACTION=_F(GROUP_NO=('p1', ),
INTITULE='DYP1',
NOM_CHAM='DEPL',
NOM_CMP=('DY', ),
OPERATION=('EXTRACTION', ),

```

```

RESULTAT=resnonl))
unnamed = CALC_CHAMP(identifiaer='16:1',
reuse=unnamed,
CONTRAENTE=('SIGM_NOEU', ),
RESULTAT=unnamed)
sxxP1 = POST_RELEVE_T(identifiaer='17:1',
ACTION=_F(GROUP_NO=('p1', ),
INTITULE='SXXP1',
NOM_CHAM='SIGM_NOEU',
NOM_CMP=('SIXX', ),
OPERATION=('EXTRACTION', ),
RESULTAT=unnamed))
#comment: EPSIP1 = POST_RELEVE_T(identifiaer='18:1',
#comment: ACTION=_F(GROUP_NO=('p1', ),
#comment: INTITULE='EPSIP1',
#comment: NOM_CHAM='EPSI_NOEU',
#comment: OPERATION=('EXTRACTION', ),
#comment: RESULTAT=unnamed,
#comment: TOUT_CMP='OUI'))
IMPR_TABLE(identifiaer='19:1',
TABLE=sxxP1,
UNITE=8)
IMPR_TABLE(identifiaer='20:1',
TABLE=DYP1,
UNITE=5)
#comment: IMPR_TABLE(identifiaer='21:1',
#comment: TABLE=EPSIP1,
#comment: UNITE=4)
IMPR_RESU(identifiaer='22:1',
RESU=_F(RESULTAT=resnonl),
UNITE=80)
IMPR_RESU(identifiaer='23:1',
RESU=_F(RESULTAT=unnamed),
UNITE=4)
FIN(identifiaer='24:1',
)
Código tubo60
DEBUT(identifiaer='0:1',
LANG='FR')
mesh = LIRE_MAILLAGE(identifiaer='1:1',
FORMAT='MED',
UNITE=20)
model = AFFE_MODELE(identifiaer='2:1',
AFFE=_F(MODELISATION='3D',
PHENOMENE='MECANIQUE',
TOUT='OUI'),
MAILLAGE=mesh)
mater = DEFI_MATERIAU(identifiaer='3:1',

```

```

BETON_ECRO_LINE=_F(D_SIGM_EPSI=-6000000000.0,
SYC=35000000.0,
SYT=5920000.0),
ECRO_LINE=_F(D_SIGM_EPSI=0.0,
SY=3690000.0),
ELAS=_F(E=20000000000.0,
NU=0.2,
RHO=2400.0))
mater0 = DEFI_MATERIAU(identif= '4:1',
ECRO_LINE=_F(D_SIGM_EPSI=0.0,
SY=11000000.0),
ELAS=_F(E=26000000000.0,
NU=0.15,
RHO=1100.0))
fieldmat = AFFE_MATERIAU(identif= '5:1',
AFFE=_F(MATER=(mater, ),
TOUT='OUI'),
MODELE=model)
listr = DEFI_LIST_REEL(identif= '6:1',
DEBUT=0.0,
INTERVALLE=_F(JUSQU_A=20.0,
PAS=0.5))
listr0 = DEFI_LIST_REEL(identif= '7:1',
DEBUT=10.0,
INTERVALLE=_F(JUSQU_A=20.0,
PAS=0.5))
func = DEFI_FONCTION(identif= '8:1',
NOM_PARA='INST',
VALE=(0.0, 0.0, 5.0, 0.001, 10.0, 0.002, 12.0, 0.003, 14.0, 0.004,
16.0, 0.006, 18.0, 0.008, 20.0, 0.01))
escalon = DEFI_FONCTION(identif= '9:1',
NOM_PARA='INST',
VALE=(0.0, 0.0, 5.0, 234.0, 10.0, 468.0, 15.0, 468.0, 18.0,
585.0, 20.0, 702.0))
load = AFFE_CHAR_MECA(identif= '10:1',
DDL_IMPO=_F(DX=0.0,
DY=0.0,
DZ=0.0,
GROUP_NO=('apoyo', )),
MODELE=model)
load0 = AFFE_CHAR_MECA(identif= '11:1',
DDL_IMPO=_F(DX=0.0,
DY=-1.0,
DZ=0.0,
GROUP_MA=('carga', )),
MODELE=model)
load1 = AFFE_CHAR_MECA(identif= '12:1',
FORCE_NODALE=_F(FX=0.0,

```

```

FY=-1.0,
FZ=0.0,
GROUP_NO=('carga', ),
MODELE=model)
resnonl = STAT_NON_LINE(identif=13:1',
CHAM_MATER=fieldmat,
COMPOTEMENT=_F(RELATION='VMIS_ISOT_LINE',
TOUT='OUI'),
CONVERGENCE=_F(ITER_GLOB_MAXI=150),
EXCIT=( _F(CHARGE=load),
_F(CHARGE=load1,
FONC_MULT=escalon)),
INCREMENT=_F(LIST_INST=listr),
MODELE=model,
NEWTON=_F(REAC_ITER=5))
unnamed = CALC_CHAMP(identif=14:1',
CONTRAINTE=('SIGM_ELNO', ),
RESULTAT=resnonl)
DYP1 = POST_RELEVE_T(identif=15:1',
ACTION=_F(GROUP_NO=('p1', ),
INTITULE='DYP1',
NOM_CHAM='DEPL',
NOM_CMP=('DY', ),
OPERATION=('EXTRACTION', ),
RESULTAT=resnonl))
unnamed = CALC_CHAMP(identif=16:1',
reuse=unnamed,
CONTRAINTE=('SIGM_NOEU', ),
RESULTAT=unnamed)
sxxP1 = POST_RELEVE_T(identif=17:1',
ACTION=_F(GROUP_NO=('p1', ),
INTITULE='SXXP1',
NOM_CHAM='SIGM_NOEU',
NOM_CMP=('SIXX', ),
OPERATION=('EXTRACTION', ),
RESULTAT=unnamed))
#comment: EPSIP1 = POST_RELEVE_T(identif=18:1',
#comment: ACTION=_F(GROUP_NO=('p1', ),
#comment: INTITULE='EPSIP1',
#comment: NOM_CHAM='EPSI_NOEU',
#comment: OPERATION=('EXTRACTION', ),
#comment: RESULTAT=unnamed,
#comment: TOUT_CMP='OUI'))
IMPR_TABLE(identif=19:1',
TABLE=sxxP1,
UNITE=5)
IMPR_TABLE(identif=20:1',
TABLE=DYP1,

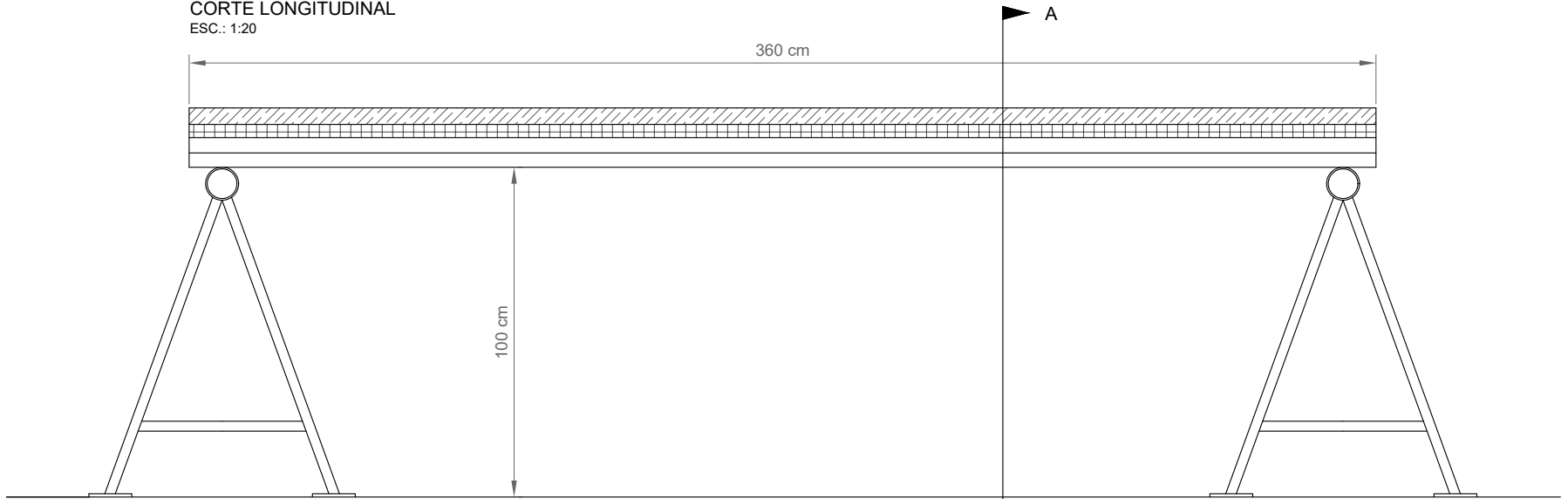
```

```
UNITE=8)
#comment: IMPR_TABLE(identifier='21:1',
#comment: TABLE=EPSIP1,
#comment: UNITE=4)
IMPR_RESU(identifier='22:1',
RESU=_F(RESULTAT=resnonl),
UNITE=80)
IMPR_RESU(identifier='23:1',
RESU=_F(RESULTAT=unnamed),
UNITE=2)
FIN(identifier='24:1',
)
```

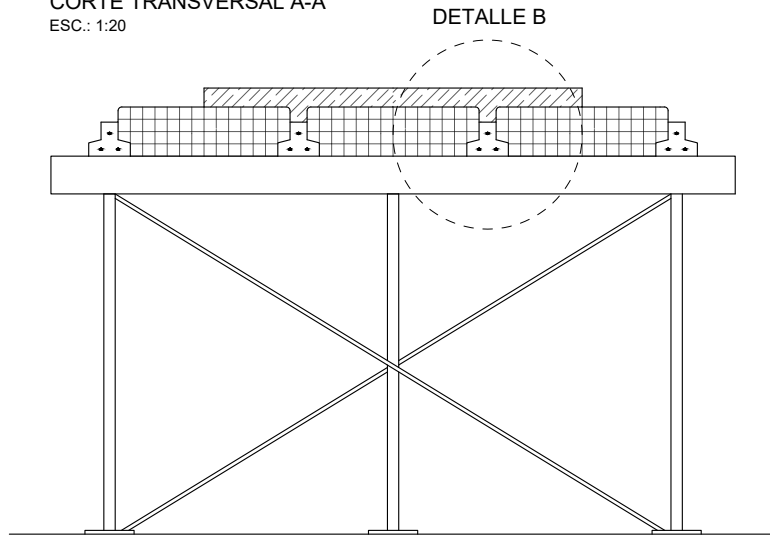
ANEXO D

Planos de los ensayos

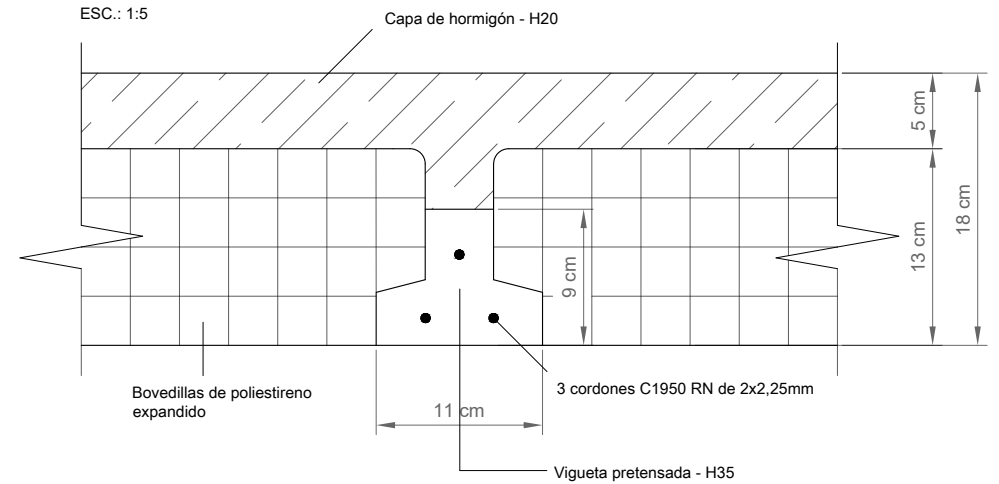
CORTE LONGITUDINAL
ESC.: 1:20



CORTE TRANSVERSAL A-A
ESC.: 1:20



DETALLE B
ESC.: 1:5




Aplicación del HRFS en la capa de compresión de losas de viguetas pretensadas

CONFIGURACIÓN DE LA LOSA DE VIGUETAS PRETENSADAS

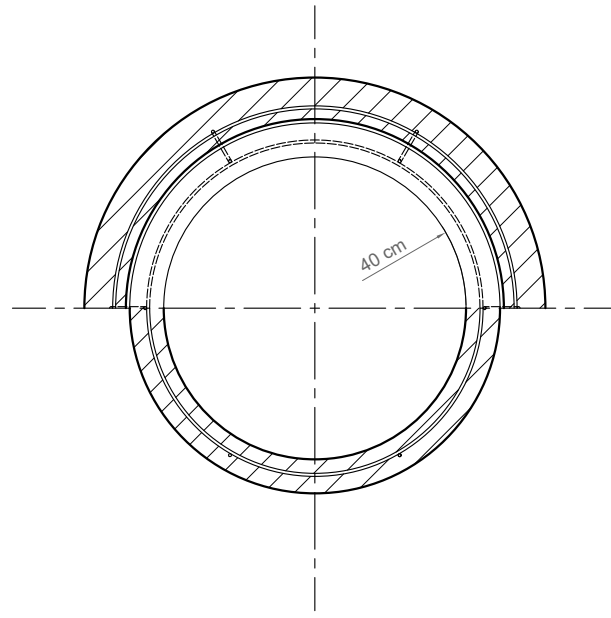
Trabajo final

Integrantes
Galassi, Bruno Javier
Coronel, Lourdes Margarita
Wandelow, Gonzalo Gabriel

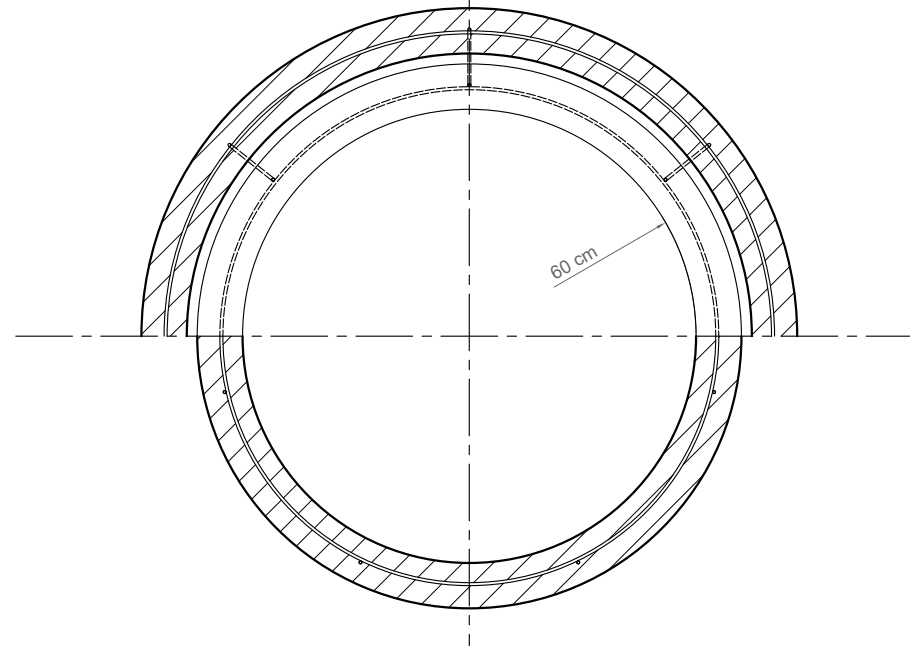
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional del Nordeste


Tamaño de hoja	Escala	N° plano	N° página
A4	Varias	1	155

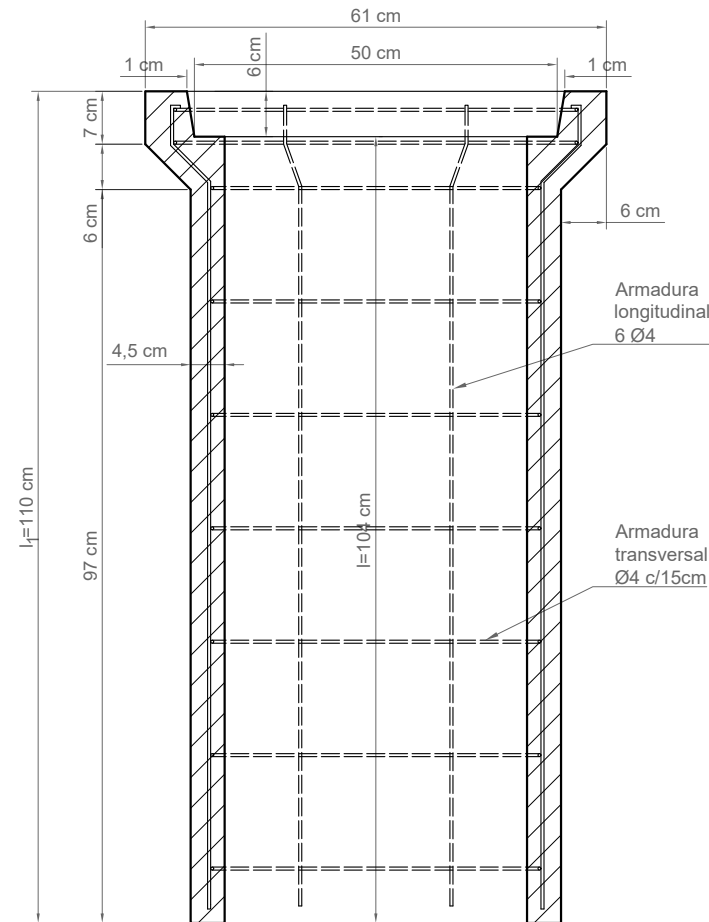
SEMI-CORTE TRANSVERSAL
TUBO Ø40cm
ESC.: 1:10



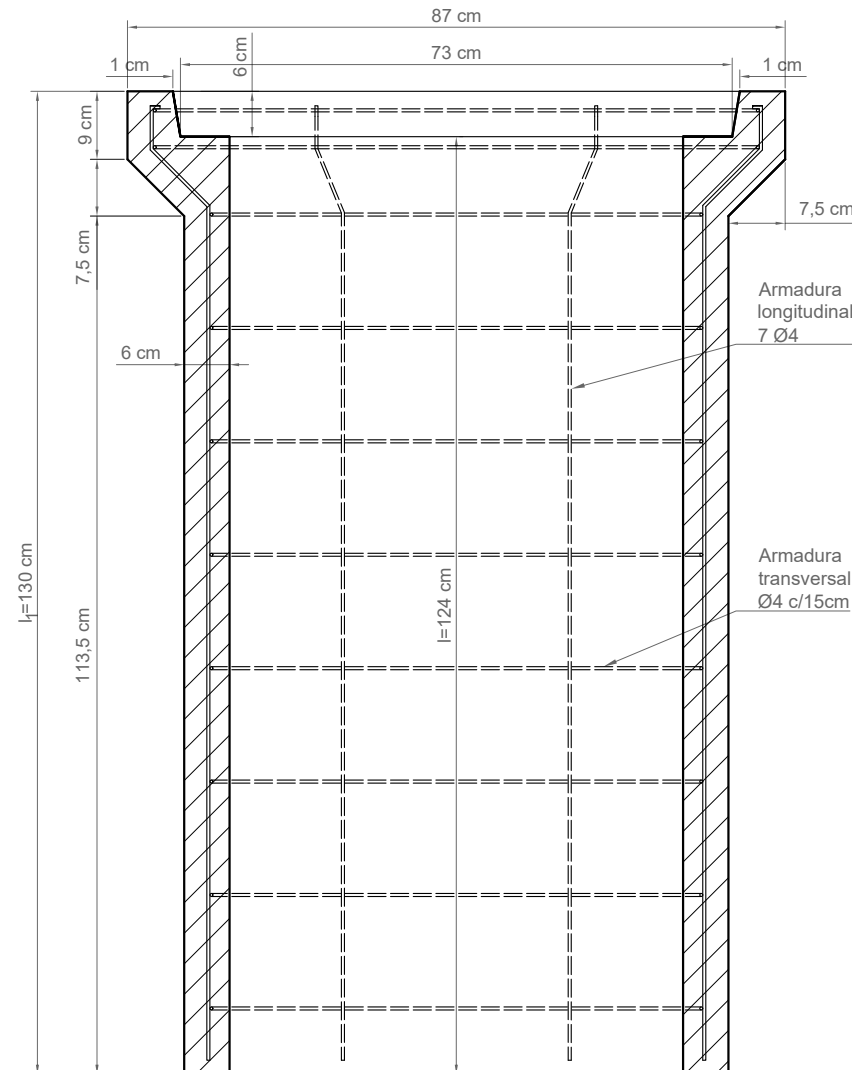
SEMI-CORTE TRANSVERSAL
TUBO Ø60cm
ESC.: 1:10



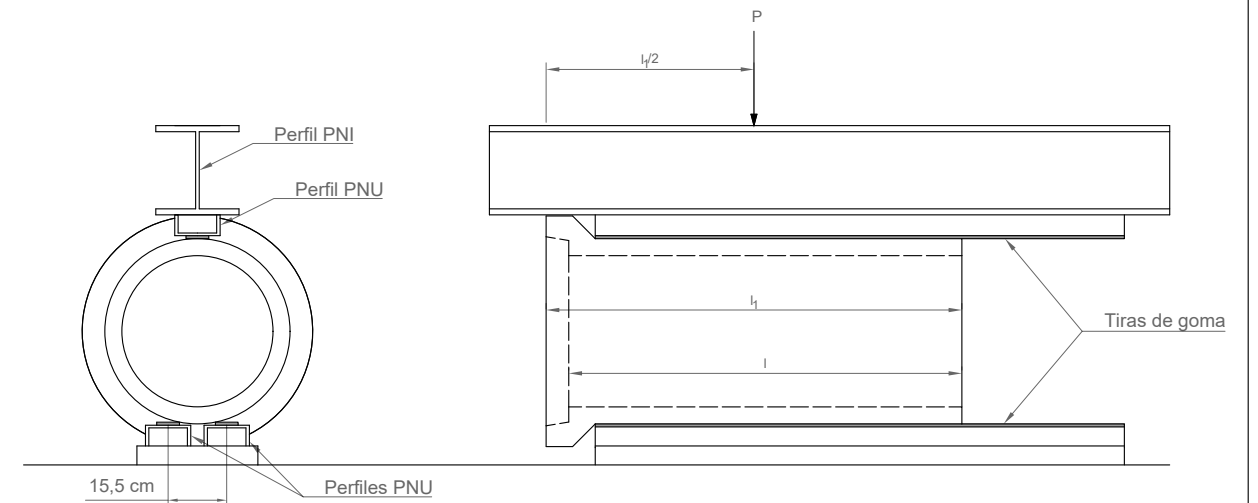
CORTE LONGITUDINAL
TUBO Ø40cm
ESC.: 1:10



CORTE LONGITUDINAL
TUBO Ø60cm
ESC.: 1:10



CONFIGURACIÓN DEL ENSAYO DE LAS TRES ARISTAS
ESC.: 1:20



Aplicación de HRFS en tubos estructurales		Trabajo final	
TUBOS REFORZADO CON MALLA DE ACERO SEGÚN IRAM 11629 Y DISPOSICIÓN DEL ENSAYO DE LAS TRES ARISTAS		Integrantes Galassi, Bruno Javier Coronel, Lourdes Margarita Wandelow, Gonzalo Gabriel	Facultad de Ingeniería Universidad Nacional del Nordeste UNNE
		Tamaño de hoja A3	Escala Varias