



PONTIFICIA **UNIVERSIDAD CATÓLICA** DEL PERÚ

Esta obra ha sido publicada bajo la licencia Creative Commons
Reconocimiento-No comercial-Compartir bajo la misma licencia 2.5 Perú.

Para ver una copia de dicha licencia, visite
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/pe/>



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL
COMPORTAMIENTO POR DESEMPEÑO DE
CONCRETO LANZADO REFORZADO CON
FIBRAS METÁLICAS**

TESIS

**PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

PRESENTADO POR:

ALEKSEY BERESOVSKY DE LAS CASAS

LIMA – PERU

ÍNDICE GENERAL

CAPITULO 1:		ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO POR DESEMPEÑO DE CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS.
1.1	Introducción.	1
1.2	Definición.	2
1.3	Características del material.	2
1.4	Mecanismo de fractura y propagación de fisuras en el concreto. Acción a realizar por las fibras metálicas.	3
1.5	Aplicación en la construcción de estructuras.	5
 CAPÍTULO 2:		 OBJETIVOS DEL ESTUDIO
2.1	Introducción.	8
2.2	Objetivos Técnicos.	8
2.3	Objetivos Económicos.	9
 CAPÍTULO 3:		 CONDICIONES DE BORDE DEL ESTUDIO Y EQUIPOS. DISEÑO DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS PARA PANELES CIRCULARES.
3.1	Introducción.	10
3.2	Condiciones de borde aplicadas a los ensayos.	11
3.3	Requisitos de las normas aplicables para los dispositivos de ensayo.	11
3.3.1	Ensayos de Paneles Circulares ASTM C 1550.	12
3.3.2	Ensayos de Vigas Prismáticas ASTM C 1399.	12
3.4	Implementación de los equipos de ensayos.	13
3.4.1	Diseño del equipo.	13
3.4.2	Ensamblaje del dispositivo.	21
3.5	Calibración de los equipos.	25
3.6	Esquema general de los dispositivos.	27
3.7	Datos proporcionados.	28

CAPÍTULO 4: EJECUCIÓN DE ENSAYOS EXPERIMENTALES EN PANELES CIRCULARES Y VIGAS PRISMÁTICAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS

4.1	Introducción.	29
4.2	Cronograma de ensayos.	29
4.3	Ejecución de ensayos en paneles circulares.	32
4.3.1	Elaboración de testigos y descripción del ensayo.	32
4.3.2	Parámetros registrados.	36
4.3.3	Mecanismo de falla.	37
4.4	Ejecución de ensayos en vigas prismáticas.	37
4.4.1	Elaboración de testigos y descripción del ensayo.	37
4.4.2	Parámetros registrados.	41
4.4.3	Mecanismo de falla.	41
4.5	Resumen de resultados.	41
4.5.1	Resultados de paneles circulares.	41
4.5.2	Resultados de vigas prismáticas.	52

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1	Análisis de la relación entre el incremento de la capacidad de absorción de energía y la dosificación de fibra, por fabricante.	63
5.2	Comparación de absorción de energía vs. dosificación entre fabricantes.	65
5.3	Análisis de incremento de resistencia residual vs. dosificación.	71
5.4	Correlación entre la tenacidad y la resistencia residual para cada dosificación y fabricante.	73
5.5	Evaluación de la eficiencia de la fibra de cada fabricante.	74
5.6	Variación entre datos registrados para cada fabricante. Precisión de los datos experimentales y confiabilidad.	77

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE COSTO – BENEFICIO

6.1	Valorización de las propiedades aportadas por las fibras de cada fabricante.	78
6.1.1	Capacidad para absorber deformación (factor de deflexión).	79
6.1.2	Capacidad para absorber energía (factor de energía).	80
6.1.3	Rigidez (factor residual).	81
6.1.4	Incremento de resistencia (factor de carga).	82
6.2	Comparación económica entre fabricantes en base a la eficiencia de cada fibra.	83
6.3	Consideraciones adicionales en base a disponibilidad para usos en el Perú.	85

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1	Conclusiones.	86
7.2	Recomendaciones.	89

BIBLIOGRAFÍA	90
---------------------	----

GLOSARIO DE TÉRMINOS	91
-----------------------------	----

RESUMEN DE TESIS

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO POR DESEMPEÑO DE CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS.

El concreto lanzado o “shotcrete”, inicialmente desarrollado para la actividad minera pero actualmente en expansión hacia el ámbito urbano en la forma de sostenimiento de taludes e incluso en la construcción de estructuras vaciadas contra terreno, es definido por los códigos ACI como “concreto o mortero neumáticamente proyectado a alta velocidad sobre una superficie que contiene fibras discontinuas y separadas.

Este material tiene como propiedad característica la capacidad para deformación si presentar colapso, a diferencia de los concretos convencionales. Esta propiedad es evaluada a través de las normas ASTM C 1399 (vigas prismáticas) y ASTM C 1550 (paneles circulares). En este último caso el ensayo para el presente estudio requirió la construcción de un dispositivo para el ensayo de los paneles circulares, circunscrito a las exigencias de la mencionada norma. La construcción de este dispositivo se basó en los parámetros de la norma y en las experiencias de otros laboratorios (Pontificia Universidad Católica del Perú, Universidad Nacional de Ingeniería).

Los análisis realizados contemplan el ensayo de 85 paneles circulares y 63 vigas prismáticas. El estudio comprende 8 tipos de fibras metálicas correspondientes a 5 fabricantes. Las dosificaciones ensayadas fueron las recomendadas por los proveedores.

Hechos los análisis de absorción de energía (paneles circulares) y módulo de rotura (vigas prismáticas), se determinaron factores representativos en función a la característica evaluada, deformación, módulo de rotura, energía absorbida y carga máxima. Dichos factores se denominan: factor de carga, factor de deflexión, factor residual y factor de energía.

Con los factores mencionados anteriormente, comunes a todas las fibras, se establece una escala cuantitativa (puntajes) para comparar los tipos de fibras analizadas.

El análisis de los factores, tanto de forma individual como comparativo, permite concluir, entre otras tesis, que no existe un comportamiento lineal aplicable a todos los tipos de fibras metálicas analizadas, sino por el contrario que cada tipo define un comportamiento característico en función de la dosis de fibra, que en algunos casos se tendrán tendencias lineales en tanto que en otros dichas tendencias serán incluso parabólicas.

Las tablas y coeficientes hallados en el presente estudio constituyen herramientas de evaluación para los concretos lanzados reforzados con fibras metálicas, cuyos conceptos son aplicables para cualquier comparación entre diversos tipos de fibras y fabricantes.

Así mismo los parámetros generados en el método de análisis permiten que el constructor “tamice” todas las opciones que tiene disponible y seleccione la alternativa que satisfaga las necesidades del proyecto en función de su propia definición de “parámetros óptimos” de acuerdo al balance técnico y económico con el cual ajuste su evaluación.



CAPÍTULO 1

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO POR DESEMPEÑO DE CONCRETO LANZADO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS.

1.1 Introducción.

El uso del concreto como material de construcción se encuentra en una variedad de campos de la actividad humana. La industria moderna ha ido reemplazando las estructuras hechas con materiales tradicionales, en particular durante el siglo XX, tales como piedra, madera y albañilería convirtiéndose, junto con el acero, en el material de mayor uso en la actualidad.

Este empleo tan difundido del concreto en distintos tipos de estructuras y exigencias ha conducido al desarrollo tecnológico del material para satisfacer los nuevos requerimientos.

Uno de los múltiples desarrollos que ha tenido el concreto es el concreto lanzado o “shotcrete”, inicialmente desarrollado para la actividad minera pero actualmente en expansión hacia el ámbito urbano en la forma de sostenimiento de taludes e incluso en la construcción de estructuras vaciadas contra terreno.

Existen dos métodos para aplicar el concreto lanzado sobre una superficie determinada. El primero en ser usado es el de la aplicación “vía seca”, el cual consiste en mezclar el cementante (cemento + adiciones) con la arena para luego impulsarlo a través de la manguera a la boquilla del equipo, en donde se combinará con el agua y los aditivos líquidos, los cuales llegan por una manguera independiente, para ser finalmente proyectada hacia la superficie mediante el uso de aire comprimido.

El segundo método, llamado “vía húmeda” consiste en mezclar la arena, cementante y el agua antes de ser impulsados a través de la manguera del equipo, de tal forma que cuando la mezcla llega a la boquilla de la máquina, esta ya se encuentra lista para ser proyectada.

En ambos casos el aditivo acelerante se añade en la boquilla del equipo, al final del proceso.

Actualmente, el método por vía seca ha sido reemplazado por el de vía húmeda en gran parte de los sitios de trabajo debido a la mayor eficiencia de este último respecto del primero (especialmente en cuanto a porcentaje de desperdicio y contaminación).

Dado que los materiales que componen la mayor parte del concreto convencional no han variado significativamente en el último siglo, los nuevos desarrollos se han dado en la forma de nuevos aditivos, los cuales modifican las propiedades “naturales” del concreto fresco y/o endurecido convirtiéndolo en la variedad de materiales de alta tecnología con los que se cuentan hoy en día.

1.2 Definición.

El código ACI 506R-05 “Guía al shotcrete” en su acápite 1.4 define al shotcrete como “concreto o mortero neumáticamente proyectado a alta velocidad sobre una superficie”. Esta definición es complementada por el código ACI 506.1R-98 “Reporte del comité sobre shotcrete reforzado con fibras” el cual establece como definición: “...concreto o mortero que contiene fibras discontinuas y separadas que es proyectado neumáticamente a alta velocidad sobre una superficie”.

Tomando una tercera enunciación para este material, la enciclopedia electrónica Wikipedia publicada en Internet presenta una definición similar a las anteriores, sin embargo añade: “...El shotcrete experimenta colocación y compactación al mismo tiempo debido a la fuerza con la que es proyectado desde la boca de salida. Este puede ser impactado sobre cualquier tipo o forma de superficie incluidas áreas verticales o invertidas”.

Las fibras añadidas al shotcrete pueden ser de acero, de vidrio, sintéticas o hechas de materiales naturales. La inclusión de estas adiciones tiene como propósito mejorar las propiedades del shotcrete tales como ductilidad, tenacidad, resistencia a la flexión, resistencia al impacto, resistencia a la fatiga (ciclos de carga y descarga) e incluso incrementar ligeramente la resistencia a la compresión.

1.3 Características del material.

El concreto lanzado (shotcrete) reforzado con fibras metálicas, objeto de este estudio, incorpora un volumen relativamente pequeño de estas fibras en comparación con su masa total (hasta un 2%).

Las propiedades características de este material son definidas por el código ACI 506.1R-98 en función a 5 criterios base:

Resistencia a la flexión y compresión:

Las resistencias típicas a la flexión obtenidas a las 28 días a partir de testigos prismáticos (vigas), obtenidas de acuerdo a la norma ASTM C78, se sitúan en un rango entre 42 kg/cm^2 (4.1 MPa) y 105 kg/cm^2 (10.3 MPa). Cabe señalar que este rango se basa en los valores típicos especificados para minería y construcción, sin embargo es posible incrementar la resistencia dependiendo de los requerimientos estructurales del proyecto siempre que esto sea factible tecnológica y prácticamente.

La misma norma sitúa la resistencia en compresión del shotcrete entre 296 kg/cm^2 (29 MPa) y 530 kg/cm^2 (52 MPa), aplicándose la misma consideración que en el caso anterior.

Es característico del proceso de compactación por impacto del shotcrete, el hecho que las fibras en la mezcla ya colocada se orienten paralelas a la superficie sobre la cual se ha hecho la aplicación. Esta distribución afecta positivamente el comportamiento a flexión de la estructura de shotcrete.

Resistencia al impacto:

De acuerdo al ensayo para cargas de impacto descrito en el código ACI 544.2R, se espera que el número de golpes del martillo estándar requeridos para fisurar y separar los especímenes de shotcrete reforzado con fibras a los 28 días, se encuentre entre 100 y 500 dependiendo de la dosis y tipo de fibras. En comparación las mezclas de shotcrete sin fibras requieren usualmente 10 a 40 golpes para alcanzar la falla.

Tenacidad:

La cantidad de energía requerida para producir la falla en este tipo de concreto, dependerá de la dosis de fibra y su tipo. De acuerdo a las pruebas realizadas bajo la norma ASTM C 1018, en vigas pequeñas (100 x 100 x 350 mm), se espera que esta energía sea 10 a 20 veces la requerida para hacer fallar una muestra control sin fibra, bajo las mismas condiciones de ensayo.

Esfuerzos de tracción al 90% de la carga de falla:

A pesar de que este parámetro no es de referencia común, permite evaluar el comportamiento de shotcrete frente a cargas aplicadas rápidamente hasta llegar a la falla. De acuerdo a los ensayos realizados por R.A. Kaden descritos en su libro "Fiber Reinforced Shotcrete: Ririe Dam and Little Goose (CPRR) Relocation" publicado por el ACI internacional, se espera que el desempeño del shotcrete reforzado con fibras sea aproximadamente el doble del obtenido por el shotcrete sin este refuerzo.

Resistencia al desprendimiento (prueba de adherencia):

Los ensayos realizados sobre anclajes embebidos durante el proceso de vaciado, muestran una resistencia al desprendimiento del shotcrete reforzado con fibra superior en más de 50% con respecto a la resistencia de su contraparte de shotcrete carente de este refuerzo.

1.4 Mecanismo de fractura y propagación de fisuras en el concreto. Acción a realizar por las fibras metálicas.

Dada la naturaleza heterogénea de los componentes del concreto y del shotcrete, las teorías clásicas de comportamiento lineal de fractura no son aplicables, desarrollándose para este fenómeno modelos no lineales que representan con mayor precisión este mecanismo.

El tema central en la mecánica de los cambios inducidos por cargas aplicadas al concreto, lo constituye la disminución de la habilidad del material para transferir esfuerzos durante la creciente deformación que experimenta.

Es un hecho muy bien establecido, que la falla del concreto por carga aplicada es consecuencia de una serie de fisuras internas que se van sucediendo en secuencia hasta desembocar en el colapso.

El desarrollo gradual de microfisuras en el concreto sometido a cargas es observado bajo esfuerzos de compresión, tracción y otras sollicitaciones.

Estas microfisuras son visibles con la ayuda de fotografías de rayos X y microscópicas, en donde puede observarse incluso la existencia de estas fracturas en el concreto antes de ser sometido a esfuerzo. Este fenómeno es el resultado de procesos de hidratación y secado del concreto, así como de la segregación y exudado. Las pequeñas fisuras constituyen el punto de partida del proceso de agrietamiento al aplicarse la carga. Al 30% de la carga máxima, estas fisuras se incrementan en longitud, espesor y número, concentrándose en la interfase entre la pasta de cemento y la partícula del agregado.

Entre el 70% y 90% de la carga máxima, las fisuras a través de la pasta de mortero comienzan a ser apreciables, uniendo las fisuras en la interfase de los agregados.

Cuando este patrón de fisuras se extiende por la matriz de concreto, la capacidad de carga del mismo se reduce.

Se ha observado experimentalmente que la velocidad a la cual es aplicada la carga influye en la propagación de las fisuras. Cuando la tasa de incremento del esfuerzo es mantenida constante se producen menos fisuras que cuando el esfuerzo permanece constante. Consecuentemente la falla del concreto será abrupta en el primer caso y gradual en el segundo.

Una vez fisurada la matriz del concreto, su resistencia disminuye. La resistencia residual que queda en el concreto antes del colapso se origina en las siguientes fuentes según el orden de aparición:

1. Resistencia al agrietamiento debido a la adherencia entre la pasta de cemento y/o mortero y el agregado.
2. Resistencia al agrietamiento por la pasta endurecida.
3. Resistencia al agrietamiento aportada por el agregado.
4. Resistencia al agrietamiento aportada por el encaje mecánico y fricción entre las superficies a ambos lados de la fisura.

Esta resistencia del material a la propagación de las fisuras se conoce como “tenacidad de fractura”

Los poros, vacíos, fisuras y otras fallas pueden actuar como concentradores de esfuerzos al interior de la matriz de concreto, sin importar si las cargas son de tracción o compresión.

Aunque estos elementos concentradores de esfuerzos constituyen parte del fenómeno, solo son el punto inicial de la propagación de las fisuras, pues estas solo comenzarán a propagarse cuando el esfuerzo aplicado exceda la resistencia a la tracción del material.

Existen teorías que apuntan a explicar el mecanismo de propagación de fisuras desde el punto de vista de la energía contenida en este proceso. Tal es el caso del matemático Griffith, quien establece que: “las fisuras comenzarán a propagarse cuando el descenso en la energía elástica de tensión supere la cantidad de energía requerida para formar nuevas fisuras”. Este concepto se conoce como criterio Griffith, el cual es aplicable, al menos cualitativamente, al concreto.

La experiencia ha mostrado que el agrietamiento lento en materiales frágiles, como en este caso el concreto, es más extenso bajo cargas de compresión que bajo tracción. Esto explica porque estos materiales tienen una resistencia a compresión mucho mayor que a tracción.

1.5 Aplicación en la construcción de estructuras.

El shotcrete constituye un material prefabricado de rápida aplicación y puesta en servicio, que en estado endurecido permite el movimiento restringido de las estructuras sobre las que es aplicado.

Esta característica lo hace ideal para la construcción de estructuras de sostenimiento de terreno o vaciadas contra este.

En el campo de la minería este material es aplicado en la construcción del sostenimiento de los túneles, reemplazando los antiguos pórticos de madera y sistemas de anclaje convencionales.

Este tipo de estructuras, definidas por varios autores como “sostenimiento temporal activo”, deben ser capaces de absorber los movimientos naturales de los frentes de roca los cuales imprimen deformaciones a todas las estructuras apoyadas sobre estos. Este movimiento se traduce en energía de deformación misma que el shotcrete debe disipar sin llegar al colapso.

El shotcrete sin fibras, así como el concreto convencional es un material que trabajará esencialmente a compresión y mientras las cargas se orienten en este sentido no se tendrá mayores problemas, sin embargo cuando se presentan cargas perpendiculares al plano axial de compresión, la deformación inducida genera esfuerzos de tracción que el shotcrete buscará disipar en forma de fisuras. De no existir un elemento que

continúe transmitiendo los esfuerzos de tracción a través de las fisuras, la formación de estas constituirá el fin de la resistencia del shotcrete y de continuar aplicando carga en este plano, el colapso será inevitable.

Por el contrario si se añaden, en este caso, fibras metálicas (como en el presente estudio) a la matriz del shotcrete, estas comenzarán a transmitir los esfuerzos de tracción a través de las fisuras, disipando la energía y preservando la continuidad de la estructura.

Un ejemplo claro de este comportamiento se grafica en las Fig 1 y 2 donde se ilustra la clásica estructura en forma de campana, usualmente empleada en las minas.

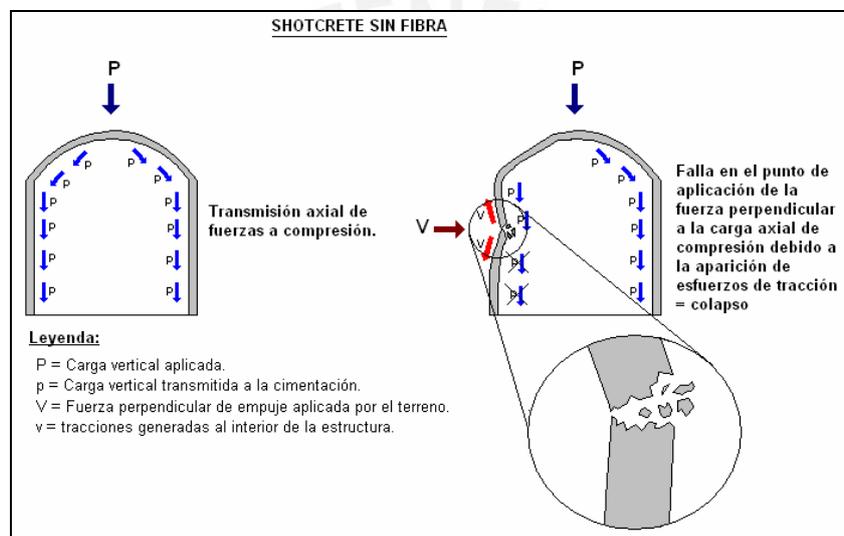


Fig. 1

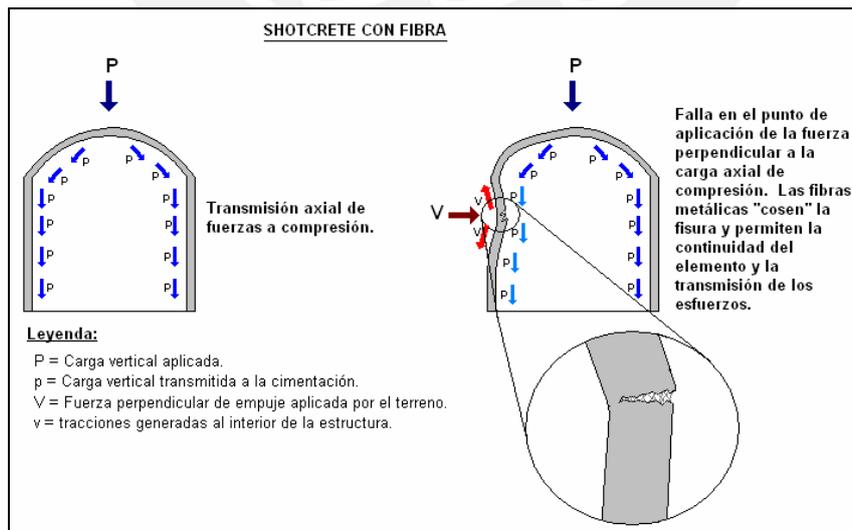


Fig. 2

En base a las experiencias obtenidas con el shotcrete reforzado con fibras metálicas en la minería y tomando en cuenta las capacidades de este material, se ha incursionado en obras civiles tales como sostenimiento de taludes, bien sea mediante la estabilización temporal o construyendo, muros de contención, e incluso estructuras como cisternas y piscinas.

Los ensayos realizados en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) y en la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), demuestran que el shotcrete reforzado con fibras tiene capacidad para absorber deformaciones muy elevadas sin colapsar a diferencia de lo exhibido por el concreto no reforzado, cuyo colapso se presenta usualmente al aparecer la primera fisura.

Las pruebas sobre paneles circulares, según la norma ASTM C 1550, han dado como resultado un incremento en el concreto de aproximadamente 100 veces la capacidad para deformarse debido a la adición de fibra.

Así mismo estas pruebas han evidenciado un ligero incremento en la resistencia a compresión en los testigos cilíndricos debido a la resistencia que aporta la fibra a la deformación en el eje perpendicular a la carga. Cabe señalar que lo anterior es logrado previendo una adecuada compactación del concreto, labor que presenta mayor dificultad en el caso de los concretos con fibra a diferencia de sus contrapartes sin este refuerzo, especialmente si esta labor se realiza manualmente.

CAPÍTULO 2

OBJETIVOS DEL ESTUDIO

2.1 Introducción

El presente estudio tiene dos clases de objetivos: Los objetivos técnicos, referidos exclusivamente a las características técnicas de los materiales evaluados, al desempeño de los mismos y los objetivos económicos, referidos principalmente a una evaluación económica de las alternativas ensayadas.

2.2 Objetivos Técnicos

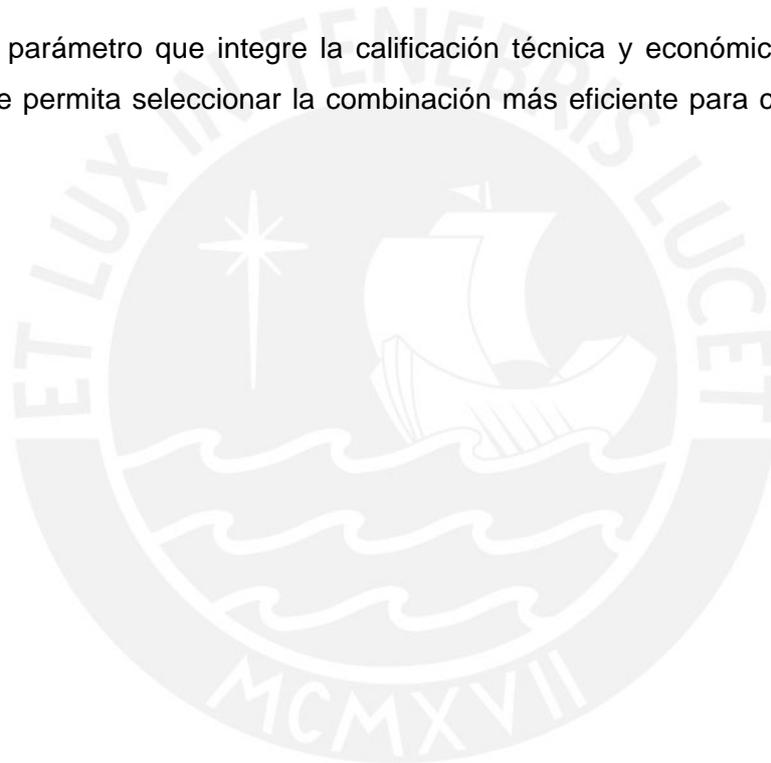
- Fabricar un dispositivo para realizar ensayos en paneles circulares de concreto reforzado con fibras de acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM C 1550. La fabricación del dispositivo comprende el diseño, construcción y calibración.
- Obtener la gráfica de fuerza vs. deformación para cada combinación de fibra ensayada en los paneles circulares de concreto y a partir de las gráficas, la energía absorbida por cada panel ensayado.
- Obtener el esfuerzo residual de cada combinación de fibra, a través del ensayo de vigas prismáticas según la norma ASTM C 1399.
Establecer los patrones de variación de la cantidad de energía absorbida para cada fabricante, tipo de fibra y dosificación. Determinar la existencia de un patrón común a todos los fabricantes.
- Determinar si existe una relación lineal entre el incremento en la dosis de fibra y el incremento o disminución de la capacidad de absorción de energía o resistencia residual de las combinaciones de fibra y fabricante.
- Verificar la existencia de una correlación entre la absorción de energía, de acuerdo a la norma ASTM C 1550 y el esfuerzo residual registrado según la norma ASTM C 1399, del concreto reforzado con fibras.
- Hallar factores comparativos para las principales propiedades del concreto reforzado con fibras a evaluar: capacidad para absorber deformaciones, capacidad para absorber energía, rigidez y resistencia. Estos factores deben permitir

comparar los distintos tipos de fibra, fabricante y dosificación sin estar afectados por las variaciones del concreto en los testigos ensayados.

- Establecer una escala de eficiencia de las fibras evaluadas de acuerdo al desempeño en una propiedad en particular. Asociar la fibra con el mejor desempeño a una aplicación específica.

2.3 Objetivos Económicos

- Establecer una calificación económica para todas las combinaciones evaluadas, en función al costo por fabricante y dosificación.
- Hallar un parámetro que integre la calificación técnica y económica en un factor global que permita seleccionar la combinación más eficiente para cada propiedad base.



CAPÍTULO 3

CONDICIONES DE BORDE DEL ESTUDIO Y EQUIPOS. DISEÑO DE LA MÁQUINA DE ENSAYOS PARA PANELES CIRCULARES.

3.1 Introducción.

Las normas marco para el presente proyecto son la ASTM C 1399 (ensayo de vigas prismáticas) y ASTM C 1550 (ensayo de paneles circulares). En el primer caso, el ensayo de vigas requiere una prensa estándar, equipada con cabezales para rotura a tres luces tal como indica la referida norma, y un sistema de registro simultáneo de fuerza aplicada y deflexión central.

En el caso del ensayo para paneles circulares, además de los dispositivos de medición mencionados en el caso anterior, se requiere contar con un marco de reacción que acomode al espécimen de ensayo y que permita la ejecución del mismo de acuerdo a las indicaciones de la correspondiente norma ASTM.

En este último caso el dispositivo de ensayo no se fabrica industrialmente, ya que los ensayos de este tipo no son comunes y por tanto no se encuentra disponible en el mercado. Las instituciones que han requerido realizar estos ensayos han optado por fabricar sus propios dispositivos. Este fue el procedimiento que se optó para la realización del presente proyecto, tomando como base las experiencias de los laboratorios de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) y las especificaciones de la norma ASTM C 1550.

Adicionalmente a la construcción del dispositivo de ensayos para paneles circulares (DEPC), se instrumentó un sistema de recopilación automática de información que permite el almacenamiento de los parámetros de ensayo en una base de datos de computadora para su posterior análisis.

Teniendo presente la importancia del control de variables durante los ensayos, el dispositivo se diseñó de forma modular, fabricando por separado cada una de sus piezas, de forma que se ajuste lo mejor posible a los requisitos técnicos de la citada norma.

Cabe señalar que existen variaciones de diseño entre el dispositivo construido para el presente proyecto y los elaborados por las instituciones anteriormente mencionadas, si bien es cierto todos están basados en las especificaciones de la norma, dichas variaciones provienen principalmente de los materiales utilizados para la fabricación de cada dispositivo, la disposición y diseño del sistema de soporte y la instrumentalización de los sistemas de adquisición de datos experimentales. A pesar de estas diferencias los parámetros conceptuales del ensayo se mantienen iguales a

lo exigido por el marco teórico, razón por la cual los resultados experimentales son válidos de acuerdo a lo indicado por la norma.

3.2 Condiciones de borde aplicadas a los ensayos.

Dado que los testigos a ensayar corresponden a un material de naturaleza anisotrópica, los resultados de dichos ensayos mostrarán variaciones acorde con esta clase de material.

Las proporciones de cemento, arena, piedra, agua, fibras metálicas e incluso las dosis de aditivos empleados marcarán las diferencias entre los testigos ensayados, mismas que se transmitirán a los resultados.

Es por este motivo que los resultados obtenidos serán analizados estadísticamente en conjunto y no individualmente.

Así mismo deben considerarse las fuentes de variación aportadas por los equipos. Con el fin de limitar el efecto de estas variables se establecieron las siguientes condiciones de borde:

- En el caso de la norma ASTM C 1550 se consideró la energía absorbida por los especímenes circulares hasta alcanzar los 35 mm de deflexión central, para fines comparativos.
- Se consideró cero deformaciones del marco de reacción y de los dispositivos de apoyo durante el ensayo de los testigos.
- Se consideró uniformidad del voltaje de la fuente de alimentación para los equipos de medición, por tanto se despreciaron los errores introducidos a las lecturas reportadas por el dispositivo de medición.
- No se consideraron las variaciones de posición de los dispositivos de soporte, del pistón de carga y del medidor de deflexión. En el caso de los dos últimos es posible que se encuentren fracciones de milímetro fuera del centro del espécimen, sin embargo ambos dispositivos se encuentran alineados respecto a la vertical.

Con respecto a la norma ASTM C 1399, ensayo de vigas prismáticas, se tomaron los mismos considerandos que en el caso anterior, en los equipos de medición y marco de reacción. Así mismo se consideró despreciable el efecto de la manipulación del testigo entre las fases de carga y recarga.

3.3 Requisitos de las normas aplicables para los dispositivos de ensayo.

Para medir las propiedades de los materiales a ensayar, el marco teórico (normas aplicables) debe garantizar la repetitividad de los ensayos realizados. La estandarización de cada ensayo se realizó fijando las variables de los mismos dentro de rangos determinados. Tanto para los ensayos de paneles circulares como para las

vigas prismáticas, las normas determinan los siguientes rangos para los equipos y la información a obtener:

3.3.1 Ensayos de Paneles Circulares ASTM C 1550:

- El equipo de registro de carga aplicada debe tener una resolución mínima de ± 50 N.
- El marco de reacción y dispositivos de apoyo deben ser capaces de soportar carga hasta 100 KN aplicados al centro del espécimen.
- Los soportes del espécimen deben tener la suficiente rigidez para no desplazarse radialmente más de 0.5 mm bajo un espécimen con 40 mm de deflexión central y una carga pico de 100 KN. Así mismo dichos soportes no se desplazarán más de 0.5 mm siguiendo la dirección de la circunferencia sobre la cual se alinean dichos soportes, bajo las condiciones mencionadas anteriormente.
- Los pivotes de los soportes no deberán restringir el movimiento del panel durante el ensayo del mismo. Así mismo deben evitar todo contacto entre el panel y el marco de reacción a medida que se deforma el panel.
- El pistón de carga consiste en un cilindro de 50 ± 5 mm de diámetro cuyo punto de contacto lo forma un casquete esférico de 80 ± 5 mm de radio.
- El transductor de deformación, que registra la deflexión central del espécimen de ensayo, deberá tener una resolución mínima de 0.05 mm.
- Los testigos a ensayar tendrán las siguientes dimensiones: 800 ± 10 mm de diámetro y $75 -5/+15$ mm de espesor. La desviación estándar de un total de 10 mediciones será menor a 3 mm.
- El sistema digital de adquisición de datos debe registrar, para un ensayo hasta 40 mm de deflexión central, al menos 800 pares de datos de deflexión y carga aplicada a intervalos de 0.05 mm. Posterior a este límite, los intervalos de medición serán hasta 0.20 mm.

Para ensayos con deflexiones máximas por debajo de 40 mm se deberán considerar un mínimo de 100 pares de datos para efectos del cálculo de energía.

- Cada material o mezcla a ensayar deberá contar con al menos tres especímenes. Cada muestra consistirá de al menos 2 ensayos exitosos, considerando bajo dicha condición a aquellos especímenes que presenten al menos tres fallas radiales. Aquellos paneles que muestren una única falla a través del diámetro serán descartados.

3.3.2 Ensayos de Vigas Prismáticas ASTM C 1399:

- La celda de carga a emplear tendrá una capacidad mínima de 44.5 KN.
- La deflexión debe ser medida con un instrumento capaz de registrar deformaciones con una resolución mínima de 0.025 mm.

- El equipo de registro de datos debe recopilar simultáneamente la deflexión del espécimen y la carga aplicada.
- El dispositivo de carga deberá contar con una placa de acero de 100 mm de ancho, 350 mm de largo y 12 mm de espesor.
- Los testigos prismáticos (vigas) tendrán las siguientes dimensiones: 100 mm de ancho, 350 mm de largo y 100 mm de espesor.

3.4 Implementación de los equipos de ensayos.

La ejecución de los ensayos de paneles circulares requiere un dispositivo especial que reúna los requisitos antes mencionados. Para el desarrollo de este trabajo se diseñó y construyó el mencionado dispositivo, ajustándolo a lo exigido por la norma ASTM C 1550.

3.4.1 Diseño del equipo:

Teniendo presente las exigencias propias del ensayo así como las tolerancias en las deformaciones admisibles del marco de reacción del dispositivo de ensayo de paneles circulares (DEPC), se realizó una verificación del diseño y materiales a emplear, aplicando un programa de cálculo estructural (en este caso, el software de diseño SAP 2000).

Los mariales empleados fueron piezas de acero reticulado “Superstud” elaborados por el fabricante EFCO, con dimensiones de 1800 mm y de 900 mm, sección de 230x230 mm y un peso de 25 y 42.73 kg cada uno respectivamente (Figs 3,4,5 y 6).

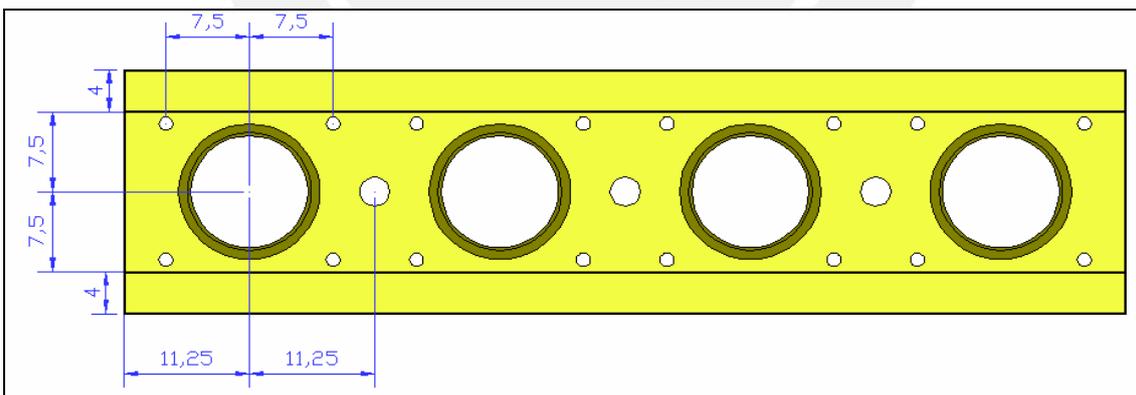


Fig. 3

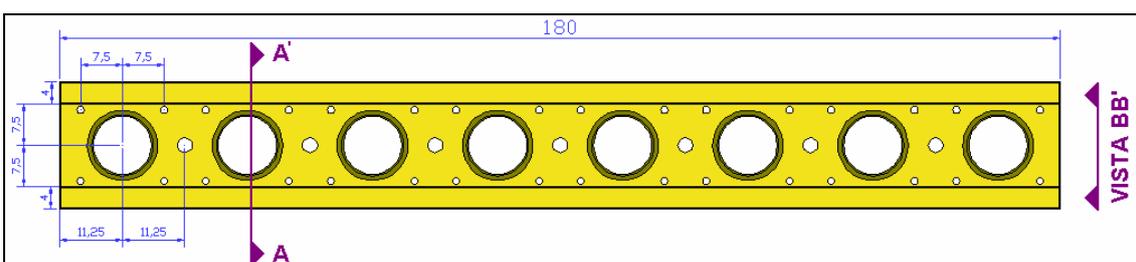


Fig. 4

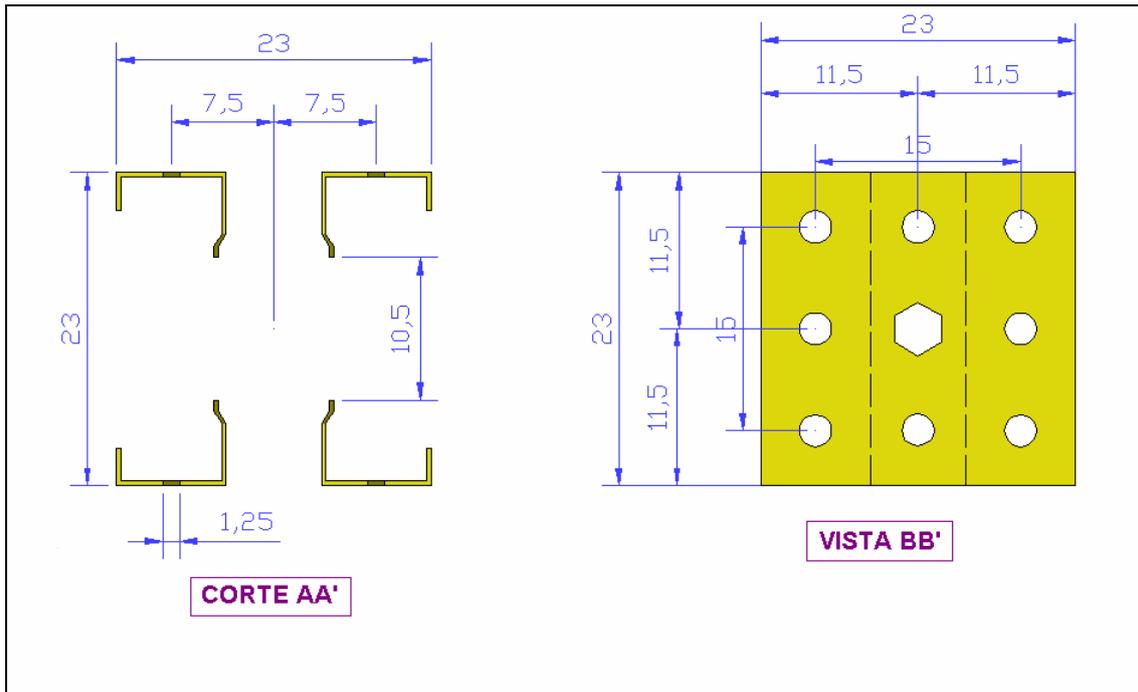


Fig. 5

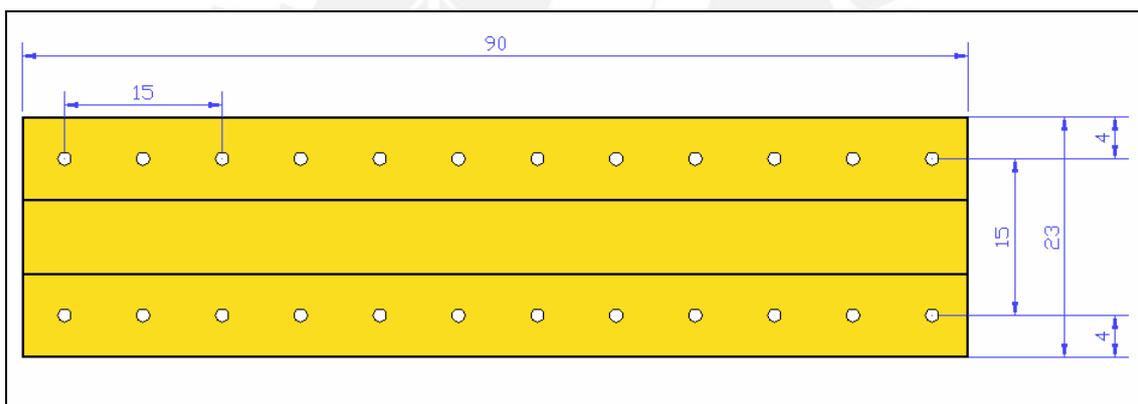


Fig. 6

Nota: Todas las medidas en cm.

Los apoyos para los paneles se fabrican en acero sólido con paredes de 1 cm de espesor. La forma de cada uno de los apoyos se torneó ajustándose a las dimensiones sugeridas por la norma antes indicada.

En la parte superior de cada apoyo se construyó un dispositivo de soporte omnidireccional con libertad de giro en los tres ejes, sujetado por resortes elásticos (Fig. 7).

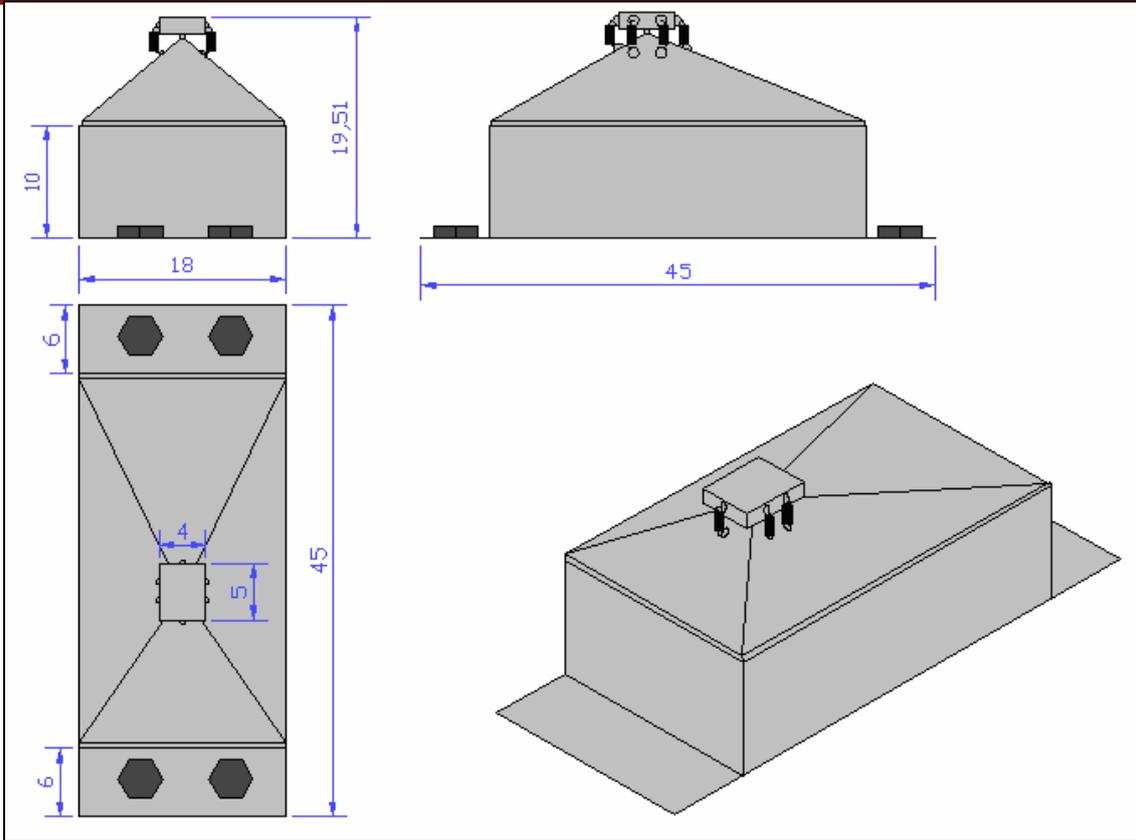


Fig. 7

Nota: Todas las medidas en cm.

De acuerdo a la especificación del fabricante de los bastidores Superstud, las secciones como resistencia última a la compresión: $f'_c = 344$ MPa.

Con base a este parámetro se pre diseñó el marco de reacción del dispositivo (Fig. 8) de tal forma que las fuerzas del ensayo impriman a la estructura una deformación uniforme y se encuentren por debajo de la resistencia otorgada por los bastidores (Fig. 9).

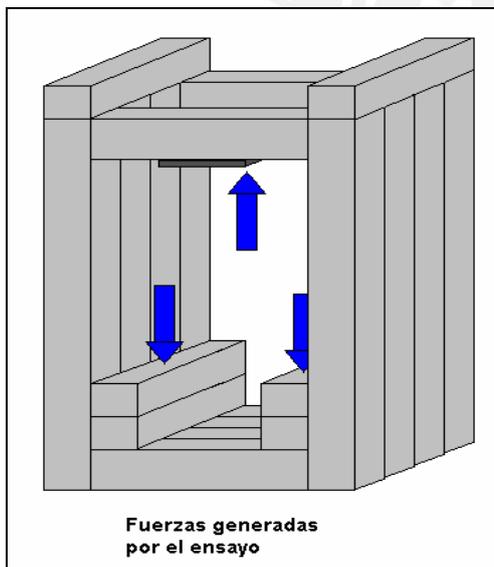


Fig. 8

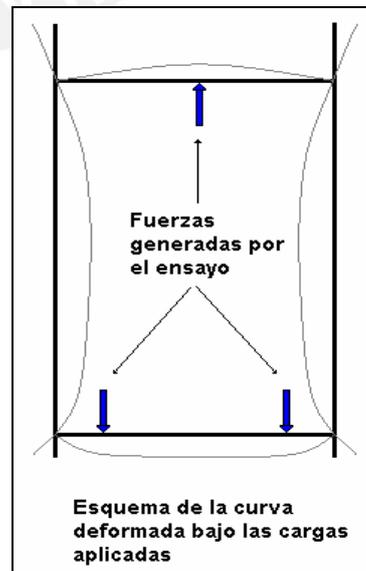


Fig. 9

El sistema prediseñado se modeló en el software de cálculo estructural, SAP 2000, con el fin de determinar la distribución de fuerzas actuantes en cada punto de la estructura. Para los fines de verificación del diseño se definió secciones genéricas para todos los elementos y solo se consideró la reacción sobre la estructura debido a la fuerza aplicada por el pistón de carga, ya que esta constituirá la fuerza crítica a aplicar sobre el marco de reacción. Se describe a continuación cada una de las etapas ejecutadas:

Etapa 1:

Se creó un modelo de “alambre” de la estructura prediseñada, tal cual se espera que funcione (Fig. 10), cabe señalar que todo modelo es solamente una aproximación a la realidad.

En este caso se modelaron los elementos como líneas unidas a los ejes. Dado que solo se verificarán las fuerzas actuantes y su distribución, se definió una sección genérica aplicada a todos los elementos.

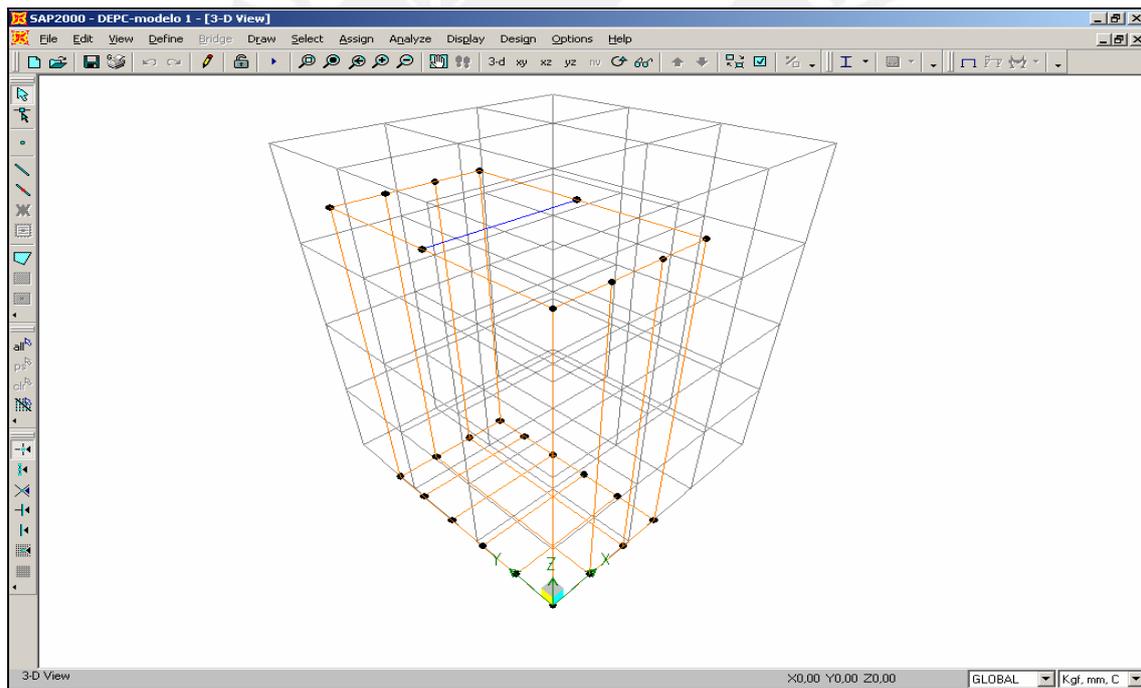


Fig. 10

Etapa 2:

Se definió los apoyos para la estructura, en este caso se consideraron para todos los nudos de la base, libertad de giro en los tres ejes y traslación en los ejes X e Y. Dado que la estructura trabajará sobre una base de concreto se restringe la traslación en el eje Z (Fig. 11).

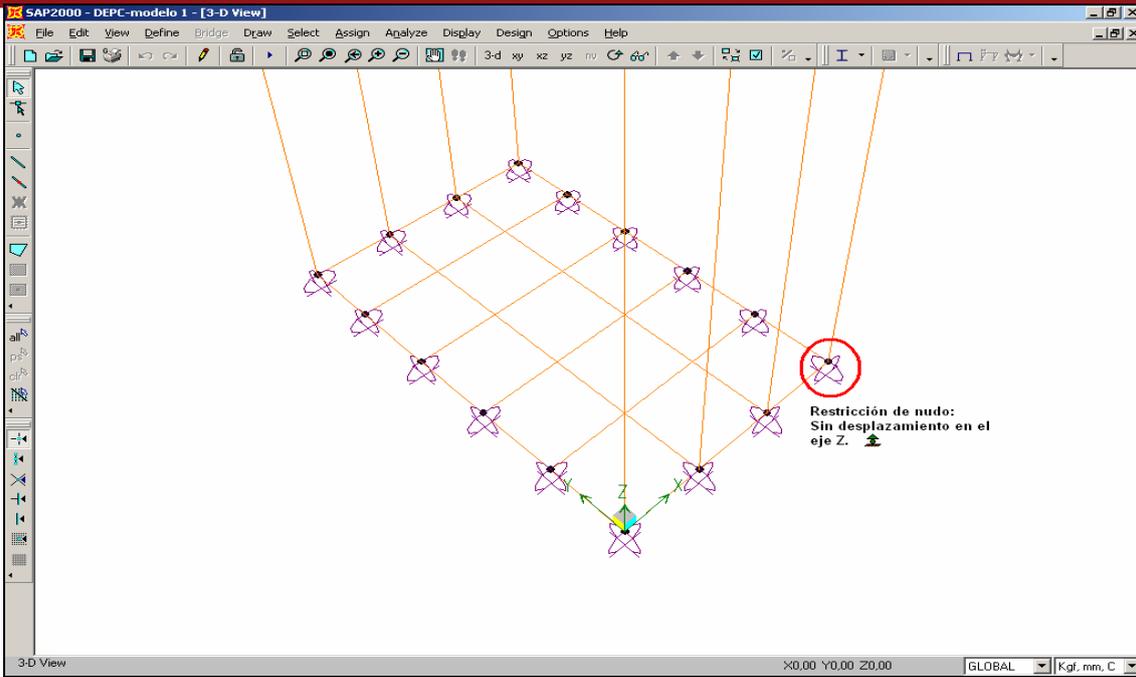


Fig. 11

Etapas 3:

Se definió el caso de carga a trabajar (Fig. 12). Solo interesa la distribución de las fuerzas actuantes sobre la configuración geométrica elegida, por tanto se omite la acción de la gravedad (de estar forma no es necesario definir la sección y masa de los elementos).

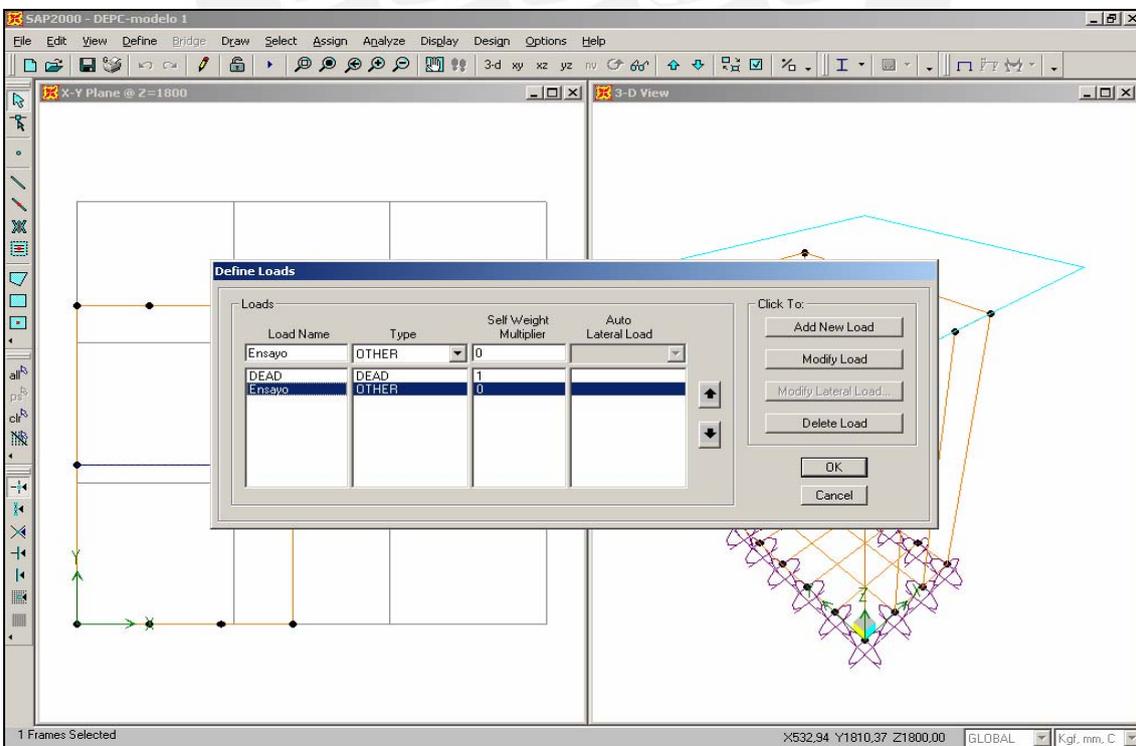


Fig. 12

Etapa 4:

Se asignó la carga aplicada a la estructura (Fig. 13). Para nuestro análisis se consideró la máxima carga a trabajar 40 KN y la condición más crítica (aplicada puntualmente sobre el elemento que representa la plancha de acero).

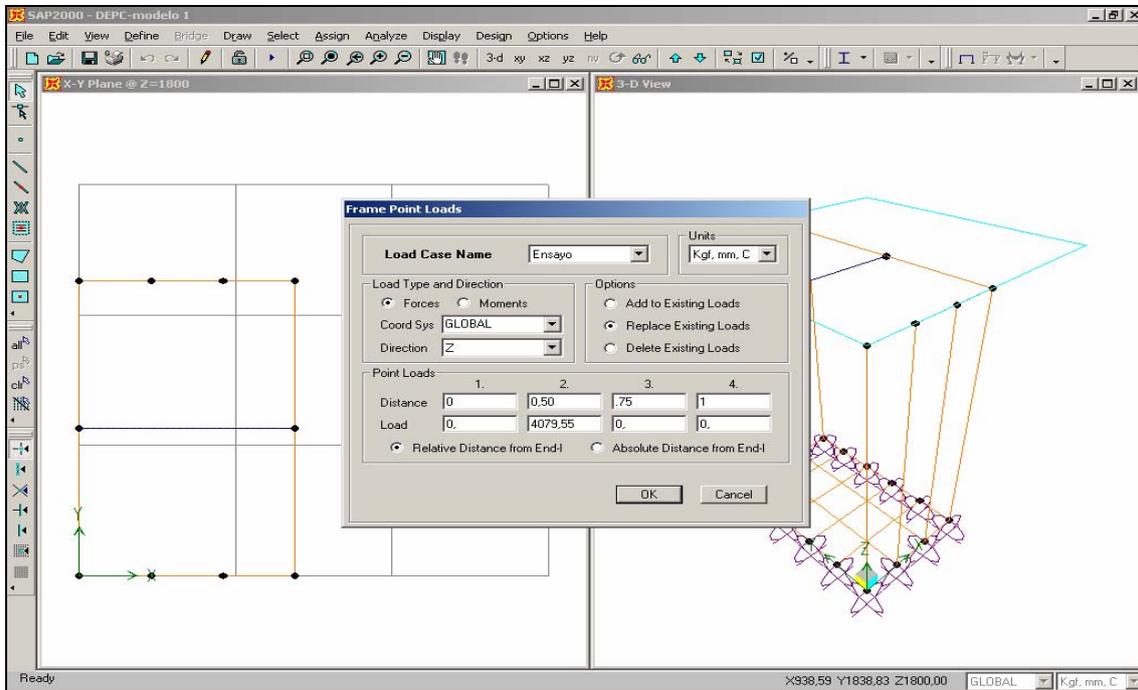


Fig. 13

Etapa 5:

Se ejecutó el análisis de la estructura (Fig. 14). Dado que no se han definido todos los parámetros que intervienen en un ensayo completo, el programa alerta por defecto sobre los valores omitidos.

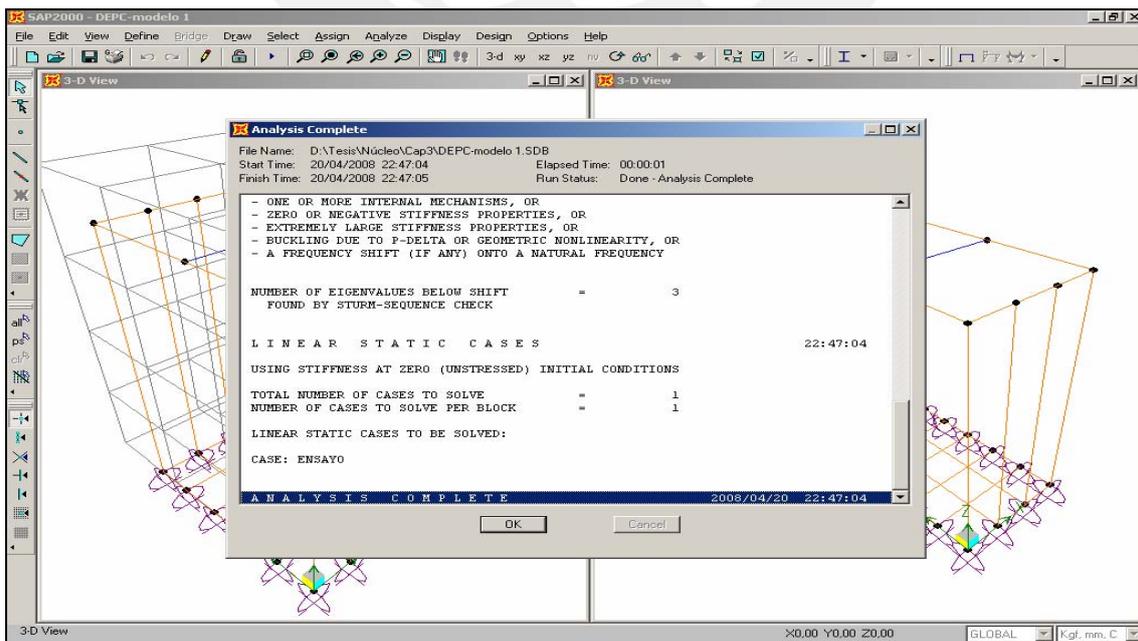


Fig. 14

Etapa 6:

Culminado el proceso de análisis, se visualizan las fuerzas aplicadas sobre cada uno de los elementos (Figs 15 a 21). Estos datos se exportaron para su respectivo procesamiento al programa Microsoft Excel (tabla 3.01).

Como referencia, se muestra la curva deformada de la estructura (Fig. 22). Cabe señalar que solo interesa la forma y no los valores de deformación ya que estos dependen de las propiedades del material y secciones de los elementos, mismos que no fueron sido definidos para el análisis.

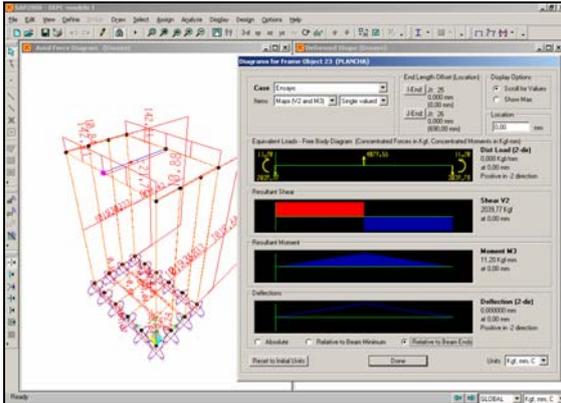


Fig. 15

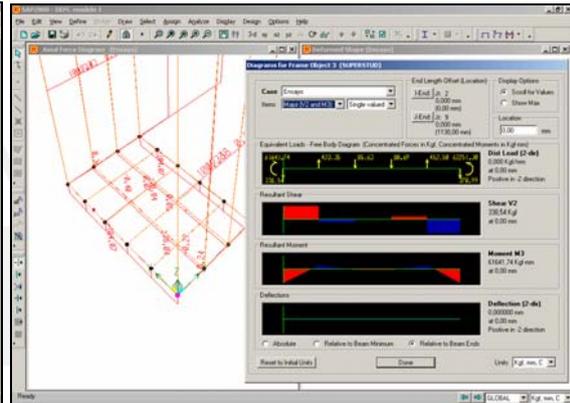


Fig. 16

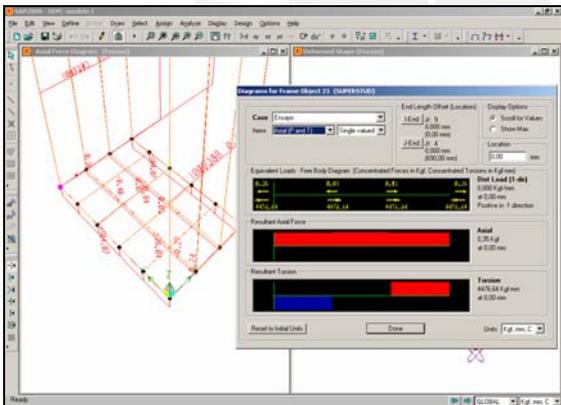


Fig. 17

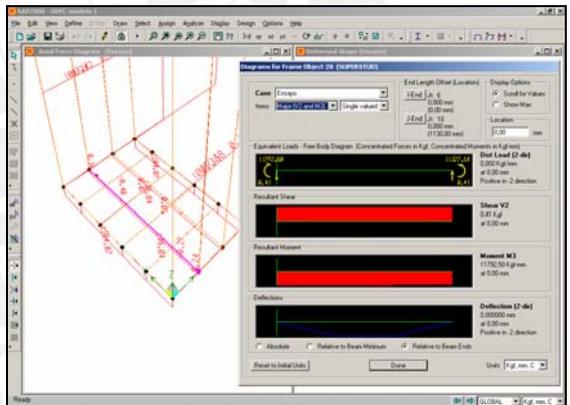


Fig.18

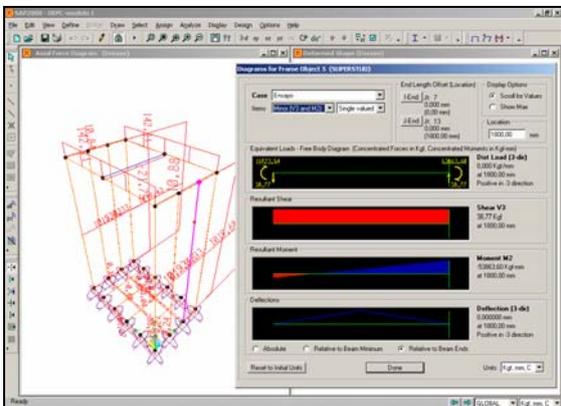


Fig. 19

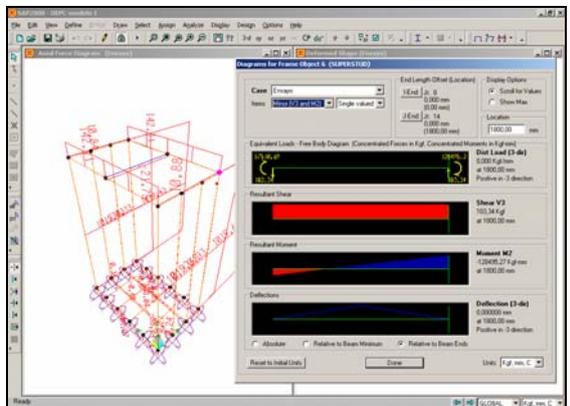


Fig. 20

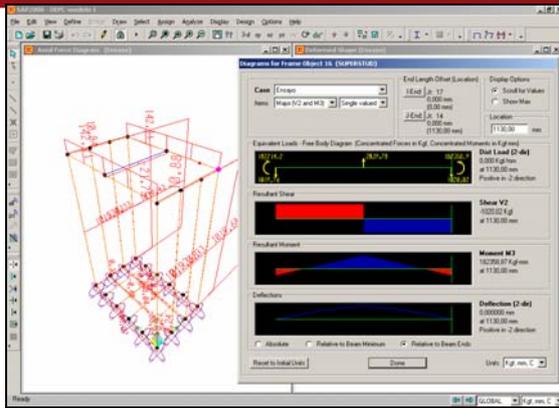


Fig. 21

Nota: Se muestran las gráficas de los elementos con mayor carga en la estructura.

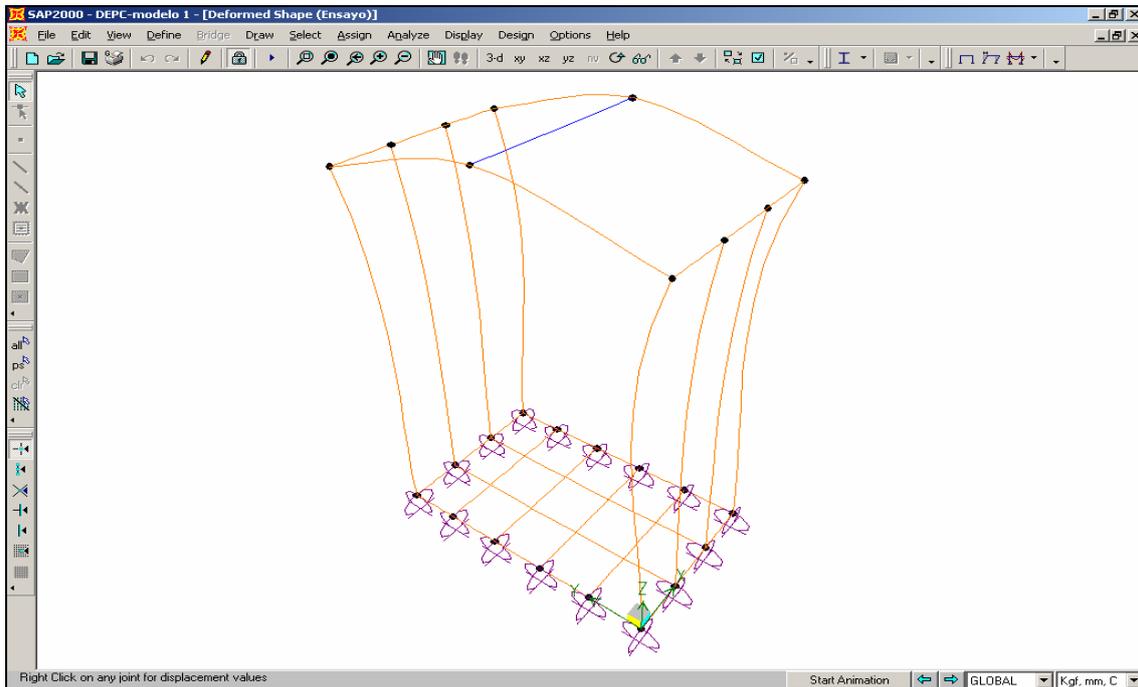


Fig. 22

Los máximos valores alcanzados por los elementos analizados son los siguientes:

TABLA 3.01

FUERZAS MÁXIMAS APLICADAS							
ID Elemento	Ubicación relativa desde el extremo	Carga axial (Kgf)	Fuerza cortante eje 2 (Kgf)	Fuerza cortante eje 3 (Kgf)	Torsión (Kgf-mm)	Momento Flector eje 2 (Kgf-mm)	Momento flector eje 3 (Kgf-mm)
1	1800	1019.68	-0.01	103.34	-123.31	-128495.27	17.78
2	1800	1019.43	-0.01	-103.47	122.76	128462.57	17.78
3	1130	-104.07	-370.99	0.34	-0.51	-55.12	62251.30
4	1800	0.33	-0.01	38.77	-111.91	-53863.60	10.67
5	1800	0.33	0.01	38.77	111.91	-53863.60	-10.67
6	1800	1019.68	0.01	103.34	123.31	-128495.27	-17.78
7	1800	0.33	-0.01	-38.64	111.34	53751.65	10.67
8	1800	0.33	0.01	-38.64	-111.34	53751.65	-10.67
9	1800	1019.43	0.01	-103.47	-122.76	128462.57	-17.78
10	690	-0.40	0.00	0.00	0.00	-2.49	-0.38
11	690	0.07	0.00	0.00	0.00	0.71	-0.14
12	690	0.05	0.00	0.00	0.00	-0.60	-0.13
13	690	-0.27	0.00	0.00	0.00	1.89	-0.36
14	460	10.88	0.33	-38.77	53863.60	-4690.07	52.70

15	230	10.84	-0.33	-38.64	53751.65	4674.53	52.68
16	565	142.11	1019.76	-10.86	-5.60	2045.02	-393949.89
	1130	142.11	-1020.02	10.89	5.60	-4103.86	182358.87
17	565	142.11	1019.76	10.86	5.60	-2045.02	-393949.89
	1130	142.11	-1020.02	-10.89	-5.60	4103.86	182358.87
18	0	-104.07	370.99	-0.34	0.51	-55.12	62251.30
19	0	-38.04	-0.41	0.00	0.00	-8.22	11327.58
	1130	-38.04	-0.41	0.00	0.00	-3.22	11792.50
20	0	-38.04	0.41	0.00	0.00	-3.22	11792.50
	1130	-38.04	0.41	0.00	0.00	-8.22	11327.58
21	460	0.36	0.00	0.00	0.00	32.20	-0.55
	460	0.35	0.05	-0.60	-4476.64	-70.92	4.68
	690	0.35	0.05	-0.60	-4476.64	67.64	-7.69
22	0	0.24	-0.05	-0.73	-4131.04	-83.44	-7.72
	230	0.24	-0.05	-0.73	-4131.04	84.67	4.68
23	345	-21.75	-2039.78	0.00	0.00	6.72	-703711.17

Se verifican en la tabla 3.02, los máximos valores obtenidos en los elementos con los límites permitidos por el fabricante. Esta comparación no incluye el elemento 23 por tratarse de la plancha de acero.

TABLA 3.02

Tipo de fuerza	Máximo registrado	Límite del Fabricante (EFCO)	Resultado
Carga axial (Kgf)	1019.68	13300	F.S.= 13
Fuerza cortante (Kgf)	1020.02	8900	F.S. = 8
Momento Flector (Kgf-mm)	393949.89	3880000	F.S. = 9
Torsión (Kgf-mm)	53863.60	388000	F.S. = 7
Conclusión: El diseño seleccionado sujeto a la carga máxima aplicada por el ensayo se encuentra por debajo de los límites permitidos por el fabricante de los elementos metálicos, siendo el factor de seguridad 7 para la carga máxima indicada.			

Nota: F.S. = Factor de seguridad.

3.4.2 Ensamblaje del dispositivo:

Una vez que se verificó la configuración elegida, se procedió a la construcción del dispositivo de ensayos (DEPC), contando para este propósito con los siguientes componentes:

- 23 Unidades Superstud de 900 mm. (Fig. 6)
- 09 Unidades Superstud de 1800 mm. (Fig. 4)
- 03 Soportes con pivotes de acero.
- 01 Placa de acero para base de pistón (900 mm x 450 mm x 40 mm)
- 01 Pistón y anillo de carga de prensa estándar.
- 01 Bomba de aceite hidráulico de marcha regulable.
- 01 Percutor cilíndrico con punta semiesférica, de acuerdo a lo indicado en la norma ASTM C 1550
- 01 Transductor de desplazamiento lineal con resolución mayor o igual a lo requerido por la norma ASTM C 1550.
- 01 Dispositivo electrónico de adquisición de datos, con interfase digital.
- 01 Estación de control (PC).

El ensamblaje del dispositivo se realizó siguiendo las siguientes etapas:

Etapa 1:

Se ensambló dos placas compuestas por 4 unidades de 1800 mm de longitud. Cada placa está rematada en la parte superior por una unidad de 900 mm, misma que une a su vez a las cuatro unidades perpendiculares (Fig. 23).

La unión de cada unidad vertical con el bastidor superior se realizó colocando 4 pernos por cada una de las cuatro unidades perpendiculares.

Ambas placas se unen entre sí por dos unidades de 900 mm ubicadas a cada extremo de las placas debajo de los bastidores paralelos (Fig. 24). La unión entre estos bastidores y los elementos verticales se realizó colocando 4 pernos por cada lado del bastidor horizontal (unión estándar).

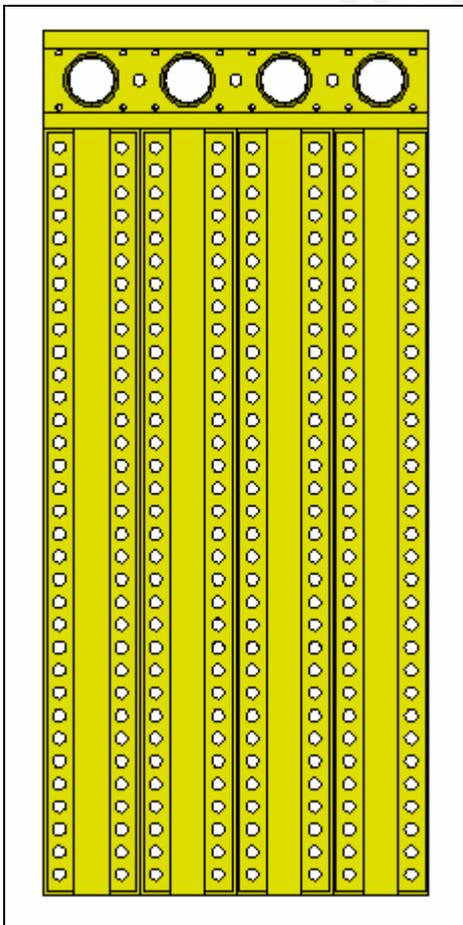


Fig. 23

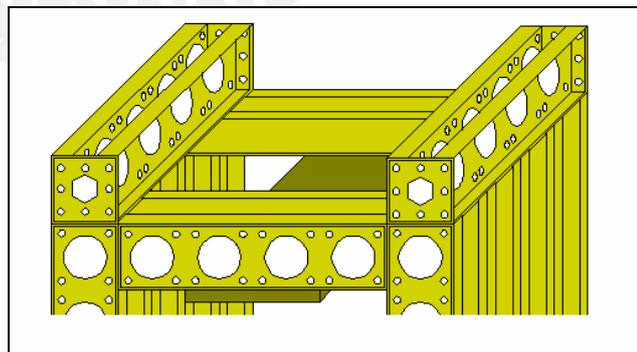


Fig. 24

Etapa 2:

Cada uno de los elementos verticales se unió con su opuesto en la parte inferior a través de un elemento horizontal de 900 mm. A diferencia de la parte superior, en donde solo se colocaron 2 elementos horizontales, en la parte inferior se ubicaron cuatro de estos elementos, de manera que conforman una base sólida para la estructura uniendo los ocho elementos verticales.

Sobre esta base se instalaron 3 niveles de unidades horizontales de 900 mm (Fig. 25). Cada nivel está compuesto de 4 unidades horizontales de 900mm ubicadas paralelamente, y unidas a las unidades del nivel inferior, colocando 8 pernos equidistantes por cada unidad horizontal (Fig. 26).

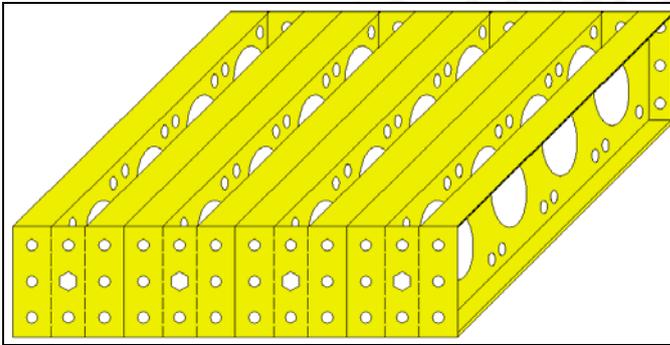


Fig. 25

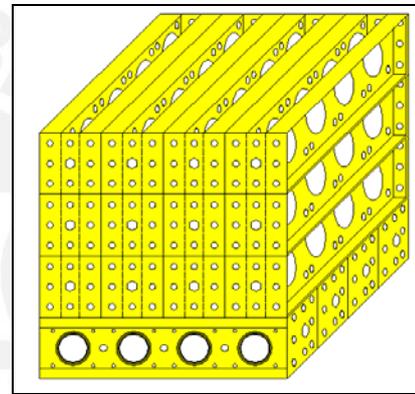


Fig. 26

Con el fin de rigidizar la base superior, se instaló un bastidor de 900 mm, paralelo a la base uniendo cada uno de los bastidores perpendiculares mediante la unión estándar de 4 pernos (Fig. 27).

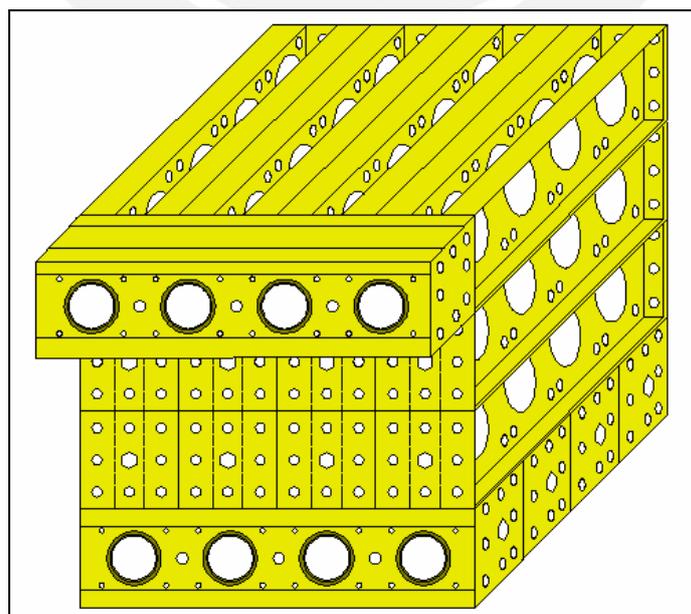


Fig. 27

Etapa 3:

Una vez ensamblada la base, el marco de reacción del dispositivo estará formado por 4 marcos paralelos unidos superior e inferiormente (Fig. 28). En la parte superior del dispositivo se instaló una plancha acerada de interfase, misma que contiene las instalaciones mecánicas del dispositivo.

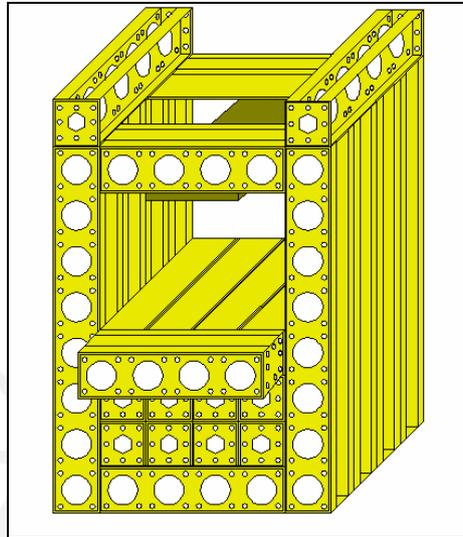


Fig. 28

La plancha acerada de interfase, tiene 12 perforaciones principales y 8 secundarias (para el empernado a los bastidores de apoyo). Las perforaciones principales son para la sujeción del anillo de carga, la admisión del aceite hidráulico del pistón, la salida del transductor de presión y los resortes de retroceso (Fig. 29).

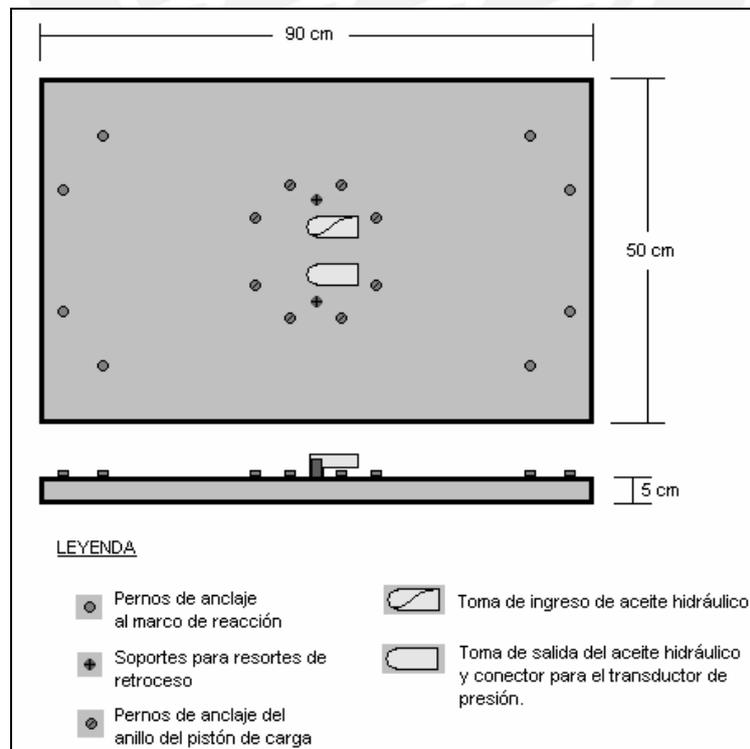


Fig. 29

El cada empernado consiste en un perno de acero, arandela y tuerca, de acuerdo al esquema mostrado (Fig. 30):

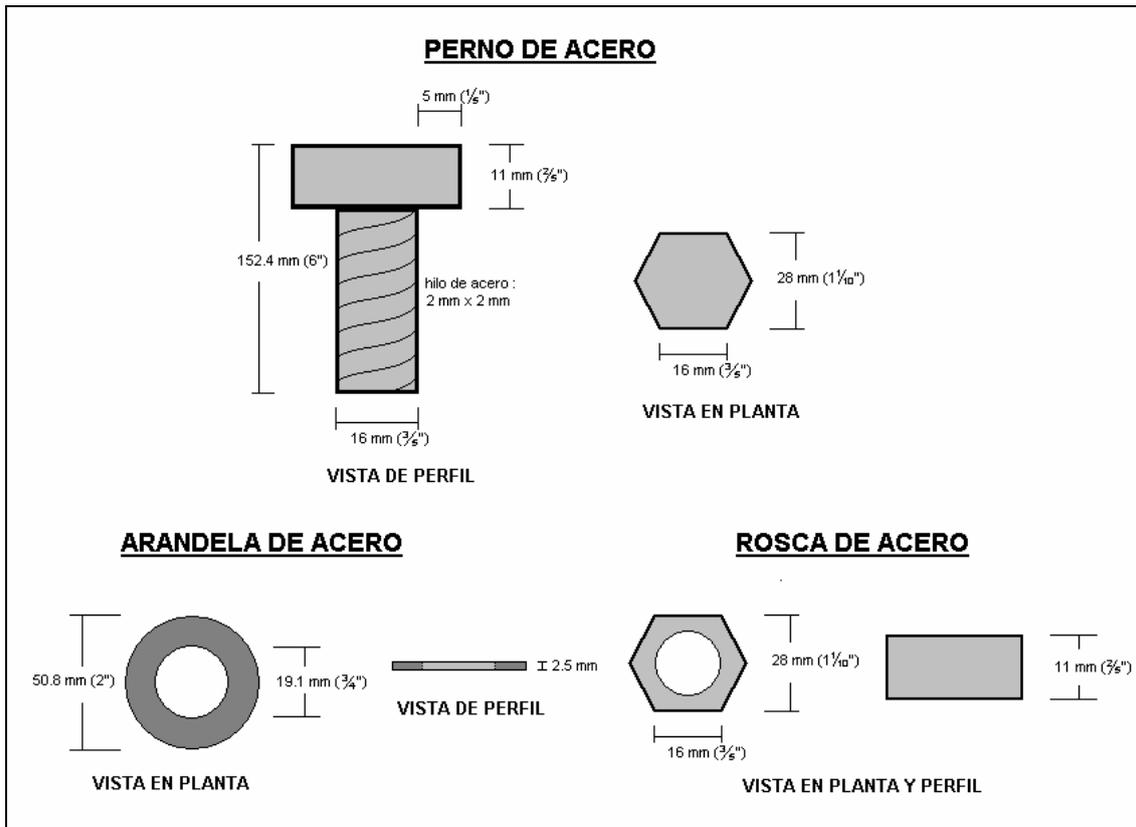


Fig. 30

El dispositivo para el ensayo de las vigas prismáticas, de acuerdo a la norma ASTM C 1399, consiste en una prensa estándar a la cual se le adaptó los cabezales indicados por la norma.

3.5 Calibración de los equipos.

Se realizó la calibración de los equipos electrónicos, tanto para el dispositivo de ensayo para paneles circulares (DEPC), ensamblado según las indicaciones dadas en líneas anteriores, como para la prensa del ensayo de las vigas prismáticas, tomando en cuenta lo siguiente:

- La baja presión de trabajo del pistón de carga, en contraste con las presiones halladas en una prensa estándar para ensayos a compresión. En todos los casos se esperan fuerzas a compresión inferiores a los 30 KN, en tanto que las prensas para ensayos a compresión (probetas cilíndricas de 6"x12") se encuentran preparadas para ensayar testigos hasta los 1000 KN.
- El dispositivo de registro de datos VR18, requiere como parámetro la máxima lectura del transductor de presión por lo que debe hallarse la correlación entre la presión del aceite hidráulico registrada y la fuerza aplicada.

- La baja resistencia a cargas puntuales que presenta el marco de reacción, el cual inicia su deformación a partir de los 20 KN de carga puntual aplicada sobre cualquier bastidor horizontal.

La correlación entre presión vs. fuerza aplicada se realizó colocando una celda de verificación de carga, apoyada sobre los bastidores “Superstud”, y aplicando presión a ritmo constante. Los valores de fuerza aplicada (dados por la celda) y presión (dados por el transductor) se registraron simultáneamente por el dispositivo VR18, hasta alcanzar los 10.5 KN.

Con los datos registrados se realizaron dos gráficas, una para el DEPC, con transductor de 100 bares y otra para la prensa de vigas prismáticas, con transductor de 50 bares. Se realizó en cada gráfica un ajuste lineal de los datos, obteniendo la ecuación matemática para cada transductor. De acuerdo a cada equipo se halló las cargas máximas a registrar (Figs 31 y 32) indicadas en la tabla 3.03.

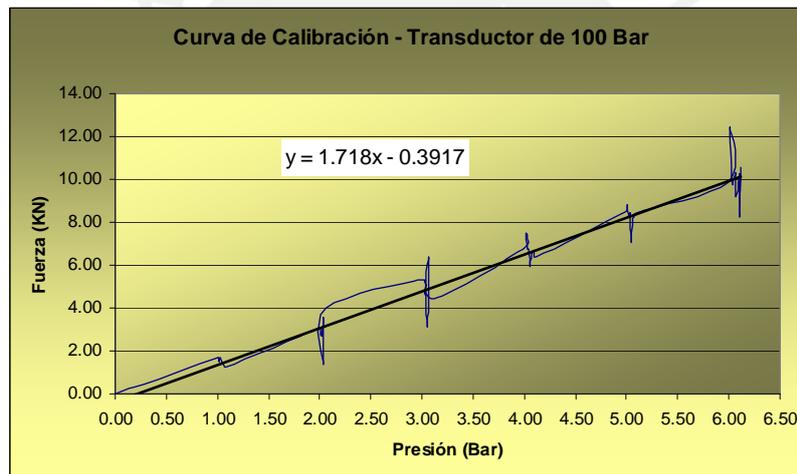


Fig. 31

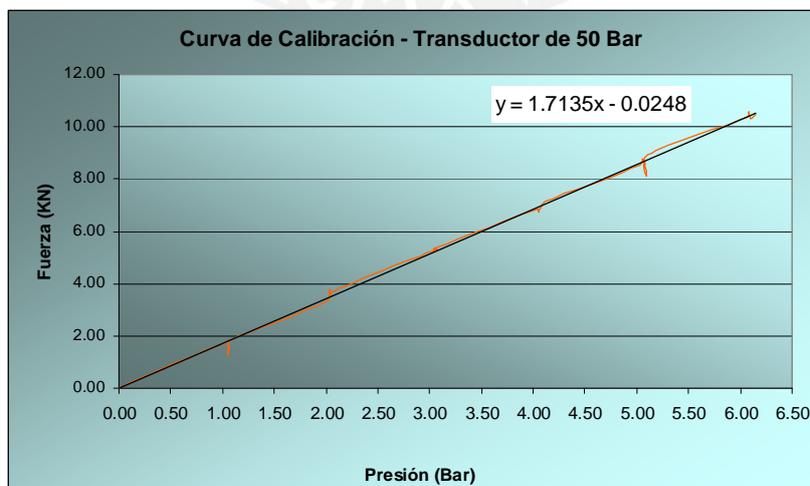


Fig. 32

TABLA 3.03

Equipo	Carga máxima (KN)
Transductor 100 bar.	171.41
Transductor 50 bar.	85.65

3.6 Esquema general de los dispositivos.

El sistema de ensayo, tanto para los paneles circulares como para las vigas prismáticas se compone de tres elementos: Los dispositivos de ensayo (DEPC y prensa de vigas), el registrador electrónico que interpreta las señales eléctricas de los dispositivos y la computadora para el procesamiento de los datos y análisis.

El dispositivo registrador de datos cuenta adicionalmente con una fuente de voltaje estabilizada, debido a que la información proveniente de los dispositivos son señales eléctricas de bajo voltaje. Los datos técnicos y especificaciones de cada uno de los dispositivos empleados se adjunta en los anexos.

El siguiente esquema, muestra el flujo de adquisición de la información experimental a través de los dispositivos electrónicos (Fig. 33).

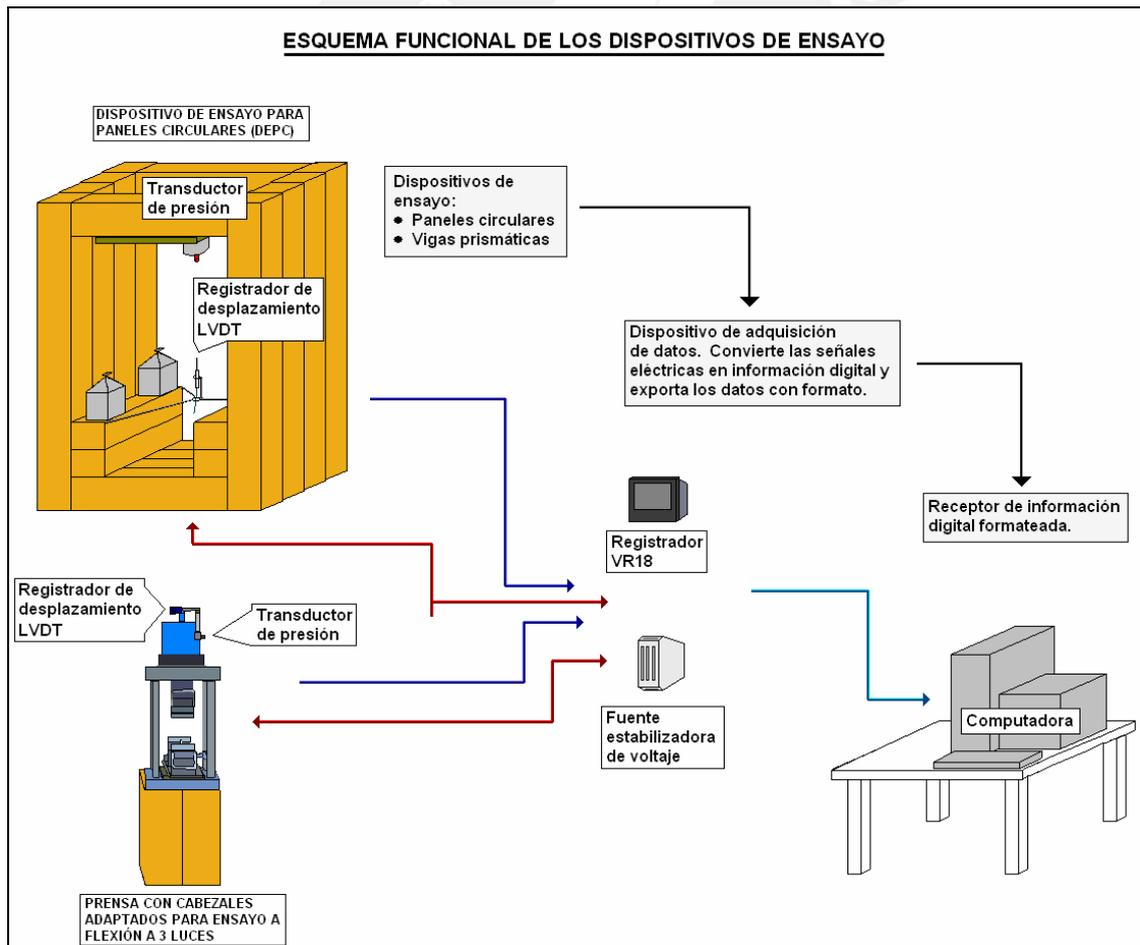


Fig. 33

3.7 Datos proporcionados.

La información obtenida del sistema consiste en datos digitales formateados de forma que puedan ser trabajados en un programa de cómputo, en este caso el programa Microsoft Excel. Esta data es el producto final de una cadena de transformadores de información, los cuales convierten las fuerzas y deformaciones que ocurren durante los ensayos en información electrónica procesable. Se detalla a continuación la información de entrada y salida por cada uno de los equipos que intervienen en los ensayos:

Transductores de presión

Entrada: Presión de aceite hidráulico aplicado directamente sobre el dispositivo, mediante entrada directa al interior del anillo del pistón de carga.

Salida: Señal eléctrica (voltaje).

Transductores de desplazamiento (LVDT)

Entrada: Desplazamiento del sensor en contacto con el testigo ensayado.

Salida: Señal eléctrica (voltaje)

Fuente estabilizadora

Entrada: Voltaje doméstico, corriente alterna 230 voltios, 60 hertz.

Salida: Señal eléctrica libre de variaciones, corriente continua estabilizada para transductores.

Dispositivo de adquisición de datos (VR18)

Entrada: Señales eléctricas de los transductores.

Salida: Información digital binaria exportada como archivo de datos tabulados compatible con el programa Microsoft Excel.

Computadora

Entrada: Información digital tabulada.

Salida: Información procesada.

CAPÍTULO 4

EJECUCIÓN DE ENSAYOS EXPERIMENTALES EN PANELES CIRCULARES Y VIGAS PRISMÁTICAS DE CONCRETO REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS

4.1 Introducción

Definidas las condiciones de borde y parámetros marco de los ensayos a realizar se procedió a la ejecución de los mismos, observando los procedimientos descritos por las normas aplicables a cada ensayo.

Debido a la naturaleza variable del material y de los procedimientos empleados para la elaboración de los testigos, se previó obtener resultados que escapen a lo descrito por la teoría, sin embargo estos obedecen a las condiciones reales del trabajo en campo y por tanto fueron igualmente analizados. Factores como, acumulación de fibra en un extremo del testigo, diferencias en la densidad de los testigos, propiedades de la mezcla de shotcrete, variaciones del equipo entre ensayos, colocación de los paneles y/o vigas entre ensayos, distribución de los esfuerzos internos durante el ensayo, etc. Si bien son considerados dentro de las condiciones de borde propias de toda prueba experimental, pueden generar (y de hecho así sucede) resultados imprevistos e incluso contradictorios a lo establecido en el marco teórico.

4.2 Cronograma de ensayos

La elaboración de los testigos y la ejecución de los ensayos se programaron considerando edad de ensayo de 56 días para los paneles circulares y 57 días para las vigas prismáticas.

Los especímenes de ensayo se moldearon de la siguiente manera:

- ✓ Se asignó una fecha para cada fabricante y tipo de fibra a evaluar.
- ✓ En cada fecha se moldearon 4 paneles circulares por dosificación de fibra empleada (20 kg/m^3 , 30 kg/m^3 y 40 kg/m^3). De forma paralela se llenaron dos moldes rectangulares para posteriormente cortar las vigas prismáticas y obtener núcleos diamantinos para los ensayos de resistencia.
- ✓ Después de tres días de curado con mantas húmedas cada panel se introdujo a la poza de curado, en un ambiente saturado con cal.
- ✓ Cumplida la edad de ensayo, los paneles se retiraron de la poza de curado y se secaron exponiéndolos a la intemperie por 24 horas, al cabo de las cuales se procedió al ensayo respectivo. Para el caso de las vigas prismáticas estas se cortaron de sus respectivos moldes al momento de ser retirados de la poza de

curado, siguiendo el mismo procedimiento para la extracción de los núcleos diamantinos.

Se presenta a continuación el cronograma de ensayo efectuado para los 85 paneles circulares y las 63 vigas prismáticas considerando siguientes tipos de fibras y fabricantes:

- Fabricante 1 – Tipo A (20 kg/m³, 30 kg/m³, 40 kg/m³)
- Fabricante 1 – Tipo B (20 kg/m³, 30 kg/m³, 40 kg/m³)
- Fabricante 2 – Tipo A (20 kg/m³, 30 kg/m³, 40 kg/m³)
- Fabricante 2 – Tipo B (20 kg/m³, 30 kg/m³, 40 kg/m³)
- Fabricante 3 – Tipo A (20 kg/m³)
- Fabricante 4 – Tipo A (20 kg/m³, 30 kg/m³, 40 kg/m³)
- Fabricante 4 – Tipo B (20 kg/m³, 30 kg/m³, 40 kg/m³)
- Fabricante 5 – Tipo A (20 kg/m³, 40 kg/m³)

Cabe señalar que en cada caso se trabajó solo con las dosis recomendadas por los fabricantes, siendo en algunos casos tres dosificaciones y en otros dos e incluso una.

Para la elaboración de los especímenes y ejecución de los ensayos se contó con el apoyo de la empresa Unión de Concreteras S.A. la cual aportó las instalaciones, los materiales y los equipos para la realización del presente estudio.

CRONOGRAMA DE ENSAYOS

Fecha de Ensayo	Dia 1			Dia 2			Dia 3			Dia 4			Dia 5		
Dosificación de ensayo	20 kg/m ³	30 kg/m ³	40 kg/m ³	20 kg/m ³	30 kg/m ³	40 kg/m ³	20 kg/m ³	30 kg/m ³	40 kg/m ³	20 kg/m ³	30 kg/m ³	40 kg/m ³	20 kg/m ³	30 kg/m ³	40 kg/m ³
Fabricante y tipo de fibra															
Fabricante 1 - Tipo A											4 paneles	4 paneles			
											3 vigas	3 vigas			
Fabricante 1 - Tipo B													4 paneles	4 paneles	4 paneles
													3 vigas	2 vigas	3 vigas
Fabricante 2 - Tipo A	4 paneles	4 paneles	4 paneles												
	3 vigas	3 vigas	3 vigas												
Fabricante 2 - Tipo B				4 paneles	4 paneles				4 paneles						
				3 vigas	3 vigas				3 vigas						
Fabricante 3 - Tipo A															
Fabricante 4 - Tipo A															
Fabricante 4 - Tipo B															
Fabricante 5 - Tipo A															

Fecha de Ensayo	Dia 6			Dia 7			Dia 8			Dia 9		
Dosificación de ensayo	20 kg/m ³	30 kg/m ³	40 kg/m ³	20 kg/m ³	30 kg/m ³	40 kg/m ³	20 kg/m ³	30 kg/m ³	40 kg/m ³	20 kg/m ³	30 kg/m ³	40 kg/m ³
Fabricante y tipo de fibra												
Fabricante 1 - Tipo A										4 paneles		
										3 vigas		
Fabricante 1 - Tipo B												
Fabricante 2 - Tipo A												
Fabricante 2 - Tipo B												
Fabricante 3 - Tipo A				5 paneles								
				3 vigas								
Fabricante 4 - Tipo A	4 paneles	4 paneles	4 paneles									
	3 vigas	3 vigas	3 vigas									
Fabricante 4 - Tipo B								4 paneles	4 paneles	4 paneles		
								3 vigas	3 vigas	3 vigas		
Fabricante 5 - Tipo A						4 paneles				4 paneles		
						2 vigas				3 vigas		

4.3 Ejecución de ensayos en paneles circulares

4.3.1 Elaboración de testigos y descripción del ensayo:

Los paneles circulares a ensayar se moldearon de acuerdo a lo requerido en el acápite 7.1 de la norma ASTM C 1550, considerando las dimensiones del molde, la forma del vaciado, el curado y la ejecución del ensayo.

Los moldes fueron construidos de acero según la recomendación de la norma, conservando las medidas internas 800 mm (con una variación de 10 mm) y una profundidad de 75 mm. (Figs. 34 y 35).

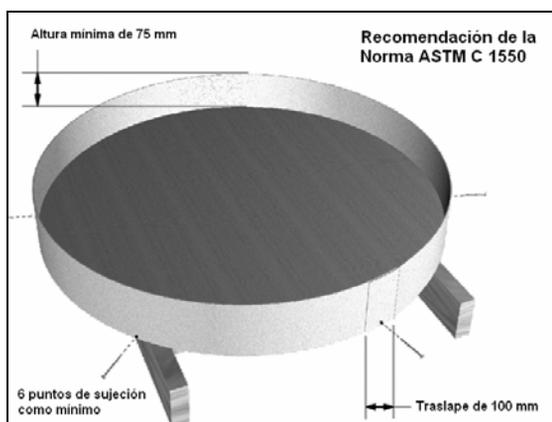


Fig. 34



Fig. 35

Previo a cada jornada de vaciado, los moldes fueron ubicados sobre soportes inclinados a 45° (Fig. 36). Se aplicó desmoldante a las superficies interiores a fin de evitar que el espécimen se adhiriera al molde y se provoquen daños al mismo durante el desencofrado (Fig. 37).



Fig. 36



Fig. 37

Se programó 9 jornadas de vaciado, vaciando 4 moldes por cada tipo de fibra y por cada dosificación indicada.

El vaciado de los moldes se realizó con un equipo de concreto lanzado (Fig. 38) proyectando la mezcla de concreto sobre los moldes siguiendo una espiral desde el centro hacia fuera (Fig. 39).



Fig. 38



Fig. 39

Esta metodología se empleó a fin de obtener, en la medida de lo posible, una masa uniforme en toda la extensión del panel.

Una vez moldeados los paneles, estos se retiraron rápidamente de sus soportes para darle el acabado superficial, antes que el endurecimiento del concreto lo impida (Fig. 40).



Fig. 40

Al término de cada jornada los paneles moldeados se colocaron en parihuelas bajo un secado húmedo con mantas y plástico protector (Fig. 41). Luego de 3 días dichos paneles

se colocaron en la poza de curado hasta la víspera de sus respectivos ensayos (Figs. 42 y 43).



Fig. 41

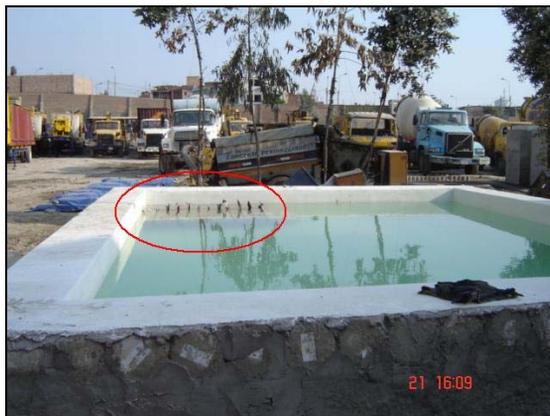


Fig. 42



Fig. 43

Concluido el período de curado para los especímenes, estos se trasladaron al laboratorio de pruebas donde se les tomó las medidas correspondientes y dejaron secar durante 24 horas. Una vez secos los especímenes, se procedió a colocarlos manualmente sobre el dispositivo de ensayo, ubicando los tres puntos de apoyo pivotantes sobre la circunferencia interna de 750 mm de cada testigo. La disposición de los paneles al interior del dispositivo de ensayos se realizó de forma que el pistón de carga se ubique sobre el centro del panel y el dispositivo de medición de desplazamientos (LVDT) se ubique debajo de este. La ubicación del testigo sobre los pivotes así como la ubicación de los dispositivos de carga y medición de desplazamiento corresponden a lo especificado por la norma ASTM C1550 (Figs. 44 y 45).

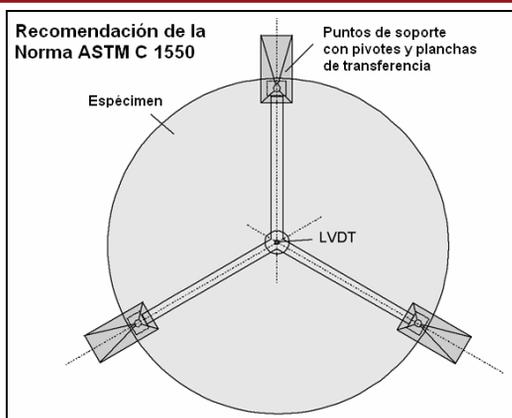


Fig. 44



Fig. 45

El ensayo consistió en aplicar, de forma constante, deformación al centro del panel con un pistón semiesférico. La velocidad de avance del pistón se ajustó a lo indicado en el acápite 9.3 de la norma ASTM C 1550.

A medida que se va aplicando la deformación al panel, se registra en tiempo real datos de fuerza aplicada y deflexión central. Dicha información es almacenada por la computadora de forma simultánea a la ejecución del ensayo.

El ensayo del testigo se detiene una vez alcanzados los 45 mm de deflexión central o el colapso del panel. Los datos almacenados en la computadora son convertidos a una base de datos para su análisis posterior. Luego de finalizar el ensayo, se retira el panel de la máquina de ensayos y se realizan las observaciones físicas.

Una vez culminado el trabajo en el panel este es desechado.

El objetivo del ensayo es obtener para cada testigo los datos de fuerza vs. deformación durante la ejecución del ensayo hasta que este llegue a la deflexión final.

Con los datos de fuerza (KN) y deflexión central (mm), se construyó, de acuerdo al acápite 10 de la norma ASTM C 1550, la curva de fuerza vs. deformación, la cual constituye una propiedad física de cada panel. Calculando la integral de dicha curva (el área bajo la misma) se obtuvo la **energía total**, expresada en joules, absorbida por cada panel de shotcrete.

La gráfica muestra el punto de falla del concreto y el inicio del trabajo de la fibra como elemento resistente frente a la deformación. Este punto se muestra como un pico de resistencia máxima a partir del cual la resistencia comienza a descender a medida que se incrementa la deflexión central.

Tomando este punto como inicio, la integral de la curva desde este punto da como resultado la **energía absorbida por las fibras metálicas** presentes en la masa de concreto, también llamada energía residual (Fig. 46).

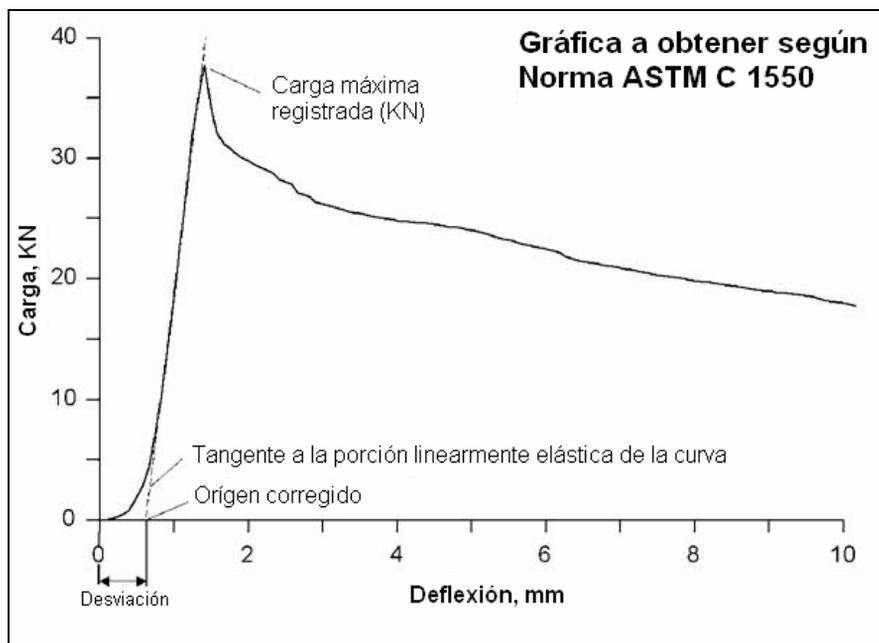


Fig. 46

Con estos dos parámetros, energía total y energía residual se caracteriza a cada panel, por lo que cada dosificación y tipo de fibra se tendrá un rango de energía absorbida y residual. Dado que no todos los paneles alcanzan los 45 mm de deflexión antes del colapso y a efectos de poder establecer una comparación entre distintos tipos de fibra y dosificaciones, se definió como deformación final 35 mm de deflexión central. En consecuencia se consideró los datos la energía hasta este límite, en todos los cálculos realizados.

4.3.2 Parámetros registrados:

De acuerdo a los requerimientos de la norma ASTM C 1550, cada panel debe ser verificado antes del ensayo a fin de asegurar la uniformidad de las medidas de los testigos a ser ensayados. Se midió tres veces el diámetro y el espesor de cada panel así como la desviación estándar de estas medidas, en cumplimiento de lo indicado por la norma indicada.

Así mismo el resultado del ensayo de un testigo será válido cuando la falla ocurre de acuerdo a lo descrito en la norma; es decir formando al menos tres fisuras radiales.

De cada testigo se obtendrán los siguientes parámetros:

- Antes del ensayo: Espesor promedio del panel (mm), desviación estándar del espesor, diámetro promedio del panel (mm), desviación estándar del diámetro.
- Después del ensayo: Carga de falla del panel, deflexión de falla del panel (mm), energía total absorbida hasta los 35 mm, energía residual absorbida hasta los 35 mm, tipo de falla observada.

4.3.3 Mecanismo de falla:

De acuerdo con la norma base, acápite 7.5 de la norma ASTM C 1550, un ensayo exitoso será aquel en el cual el panel falle formando un mínimo de tres fisuras radiales (condicionado por los dispositivos de soporte y carga).

Debido a las posibles variaciones de la matriz de concreto al interior del panel es probable que se produzca una sola fisura longitudinal (falla en forma de viga). En estos casos el ensayo se considera inválido y el resultado se descartará.

4.4 Ejecución de ensayos en vigas prismáticas

4.4.1 Elaboración de testigos y descripción del ensayo:

Para la elaboración de las vigas prismáticas, se moldearon paneles rectangulares de 600x600 mm dichos paneles se moldearon paralelamente a los paneles circulares. Los testigos cortados de los paneles rectangulares tienen como dimensiones 350x100x100 mm, de acuerdo a lo requerido por el acápite 7.3.2 de la norma ASTM C 1399.

Los moldes empleados se fabricaron de acero a fin de mantener las dimensiones de cada panel y garantizar un ambiente rígido para la mezcla de shotcrete (Fig. 47).



Fig. 47

Previo a cada jornada de vaciado, los moldes son ubicados sobre soportes inclinados a 45° (Fig. 48). De igual forma que para los paneles circulares, se aplicó desmoldante a las superficies interiores (Fig. 49).



Fig. 48



Fig. 49

Los vaciados para las vigas prismáticas se realizaron en simultáneo con los paneles circulares, elaborando 2 moldes por cada tipo de fibra y por cada dosificación indicada.

El vaciado de los moldes se realizó con el mismo equipo de concreto lanzado proyectando la mezcla de concreto sobre los moldes manteniendo la metodología empleada en los paneles circulares (Fig. 50).



Fig. 50

Una vez moldeados los paneles, estos se retiraron rápidamente de sus soportes para darle el acabado superficial, antes que el endurecimiento del concreto lo impida.

Al término de cada jornada los paneles moldeados se colocaron en parihuelas bajo un secado húmedo con mantas y plástico protector (Fig. 51). Luego de 3 días dichos paneles se colocaron en la poza metálica hasta la víspera de sus respectivos ensayos (Fig. 52).



Fig. 51



Fig. 52

Concluido el período de curado para los especímenes, estos fueron retirados de la poza de curado y cortados para extraer las vigas de 100x100x350 mm.

Una vez cortadas las vigas estas se trasladaron al laboratorio de pruebas, donde se les tomaron las medidas correspondientes y se dejaron secar por un período de 24 horas.

Los ensayos se realizaron siguiendo el procedimiento descrito en el acápite 8 de la norma ASTM C 1399. Las vigas prismáticas se colocaron en una prensa configurada según los requerimientos del acápite 4.1 de la mencionada norma (Fig. 53).

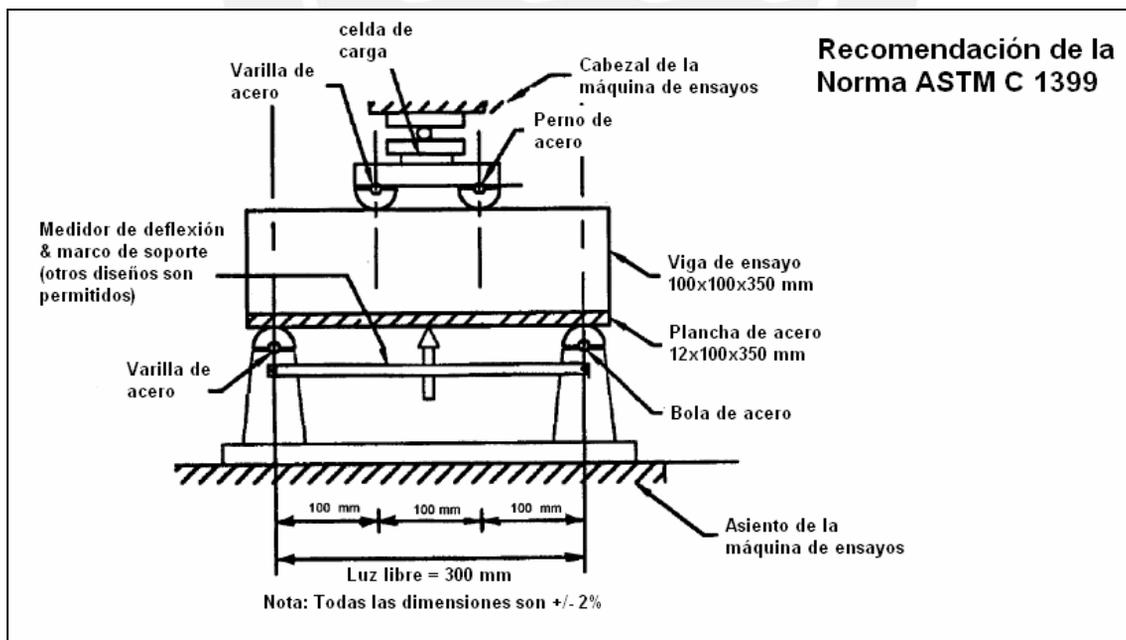


Fig. 53

El ensayo de cada viga se realizó de la siguiente manera:

Previo a la colocación del testigo en el dispositivo se instaló sobre los soportes pivotantes, la plancha metálica rígida. Sobre esta plancha se ubicó el testigo haciendo coincidir las marcas de la viga con las existentes en el dispositivo de ensayo de forma que el conjunto quede centrado según el esquema presentado en la figura 53. La viga se ubicó sobre la plancha colocando la cara corta paralela a la misma.

La plancha rígida tiene en el centro un orificio por donde atraviesa el dispositivo de medición de desplazamiento LVDT, el cual se encuentra en contacto con la superficie del testigo.

La ejecución del ensayo se llevó a cabo en dos etapas. En la primera etapa, se aplica una carga sobre la viga a una velocidad constante hasta alcanzar los 0.5 mm de deflexión central. Si la fisura no se produce luego de alcanzar esta deflexión, el resultado es inválido. Luego de alcanzados los 0.5 mm de deflexión, se detiene el ensayo, se almacenan los datos y se retira la plancha rígida.

La segunda etapa del ensayo consiste en aplicar nuevamente carga sobre la viga ya fisurada, partiendo de cero (se reinicia el dispositivo de medición de desplazamiento) hasta llegar a los 1.25 mm de deflexión, culminando de esta forma con el ensayo de la viga.

El objetivo del ensayo es obtener para cada testigo los datos de fuerza (N) vs. deformación (mm) durante ambas etapas del ensayo de forma que se puedan construir las curvas de carga y recarga del espécimen (Fig. 54).

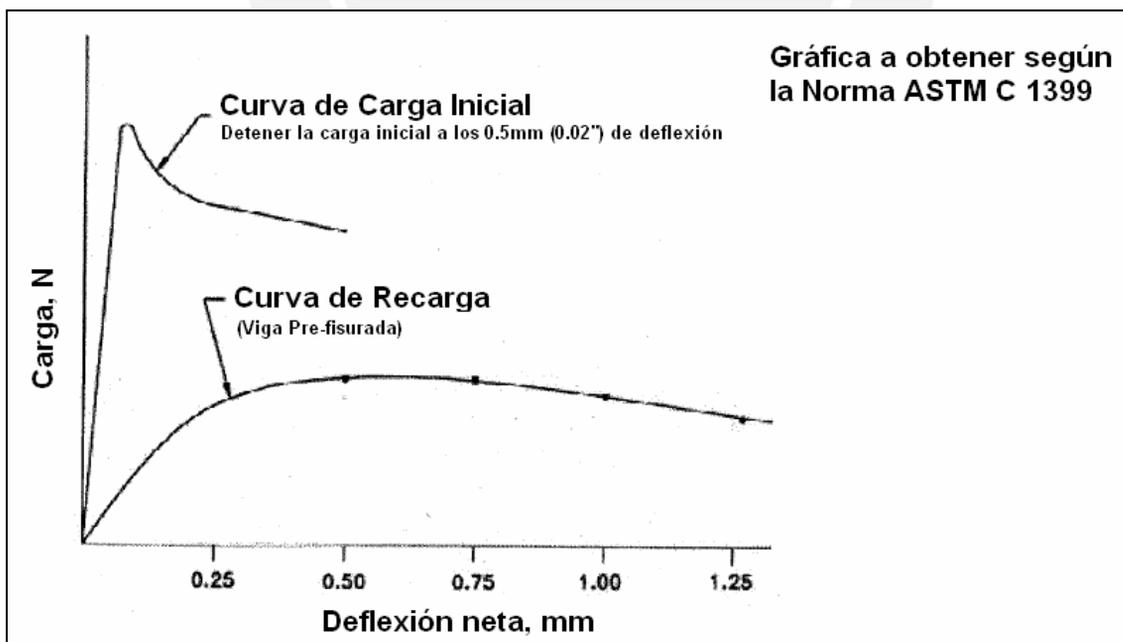


Fig. 54

De estas curvas se obtendrá la fuerza residual promedio, en MPa, aportada por las fibras metálicas al interior de la masa de concreto.

Con este valor de fuerza residual promedio de cada testigo, se establecieron rangos de evaluación para cada dosificación y tipo de fibra, mismos que se han empleado en el análisis desarrollado en la sección 5.

4.4.2 Parámetros registrados:

De acuerdo a los requerimientos de la norma ASTM C 1399, se verificarán las medidas de todas las vigas prismáticas a ensayar. Se midió tres veces la altura, longitud y ancho de cada viga, tomándose como valor el promedio de cada una de estas dimensiones.

Así mismo el resultado del ensayo de un testigo será válido cuando la falla ocurre de acuerdo a lo descrito en la norma.

De cada testigo se obtendrán los siguientes parámetros:

- Antes del ensayo: Dimensiones promedio de la viga, historial de curado.
- Después del ensayo: Carga de primera fisura, deflexión de fisuración, tipo de falla observada, carga máxima del ensayo, ancho promedio de la fisura, deflexión para la carga máxima.

4.4.3 Mecanismo de falla:

En este ensayo la condición crítica de falla es la ocurrencia de la fisura dentro de los primeros 0.5mm de desplazamiento del centro de la viga.

Luego de la primera fisura es posible que la viga presente fisuras adicionales durante la segunda etapa del ensayo. En estos casos se considerará la fisura central.

En caso de colapso de la viga durante la recarga, se registrará la deflexión y la carga aplicada hasta ese punto.

4.5 Resumen de resultados

Conforme a los ensayos realizados para los paneles circulares y las vigas prismáticas, se obtienen las gráficas de energía absorbida en el primer caso y del esfuerzo residual en el segundo, para cada dosificación de fibra y para cada fabricante.

4.5.1 Resultados de paneles circulares

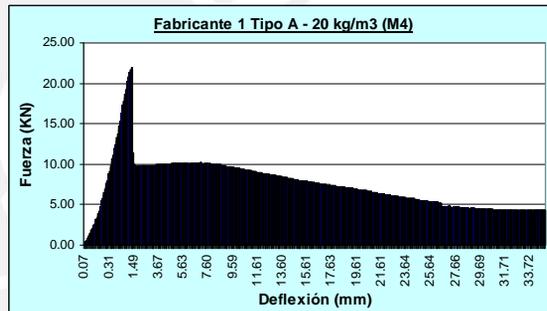
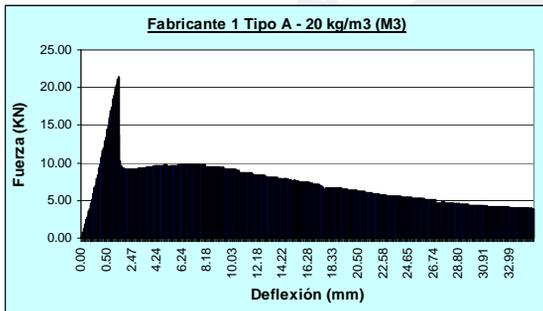
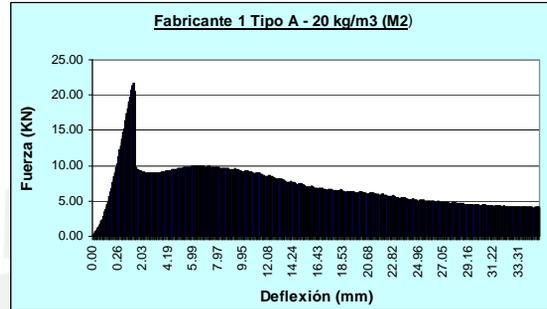
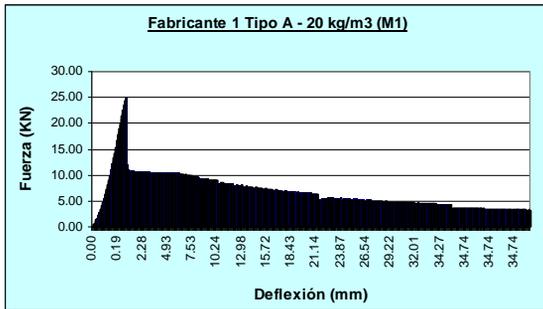
El resultado de cada panel ensayado se representa por la gráfica fuerza vs. deformación. El comportamiento del material en la totalidad de los casos válidos es concordante con lo predicho por la norma ASTM C 1550.

Todas las gráficas presentan una primera zona linealmente pronunciada, aportada por el concreto, un pico máximo de resistencia seguido inmediatamente por una abrupta caída y

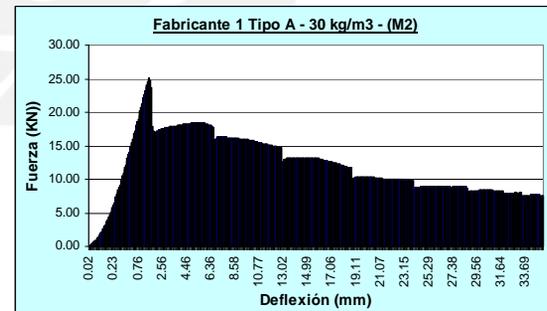
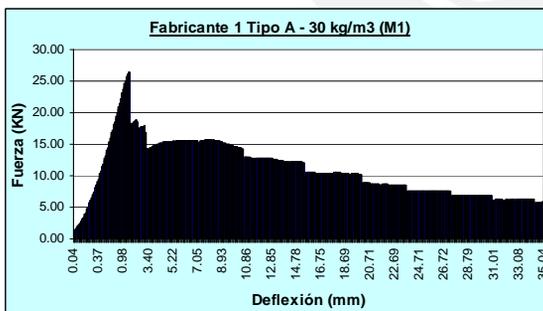
finalmente una zona de “fluencia” en donde la resistencia desciende paulatinamente a medida que se incrementa la deformación.

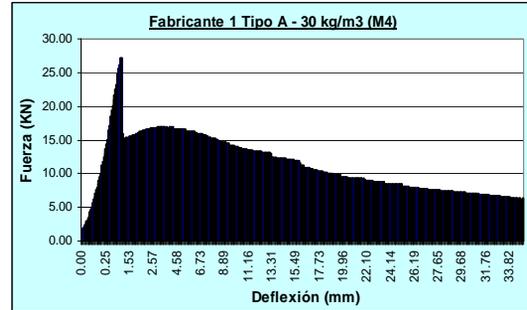
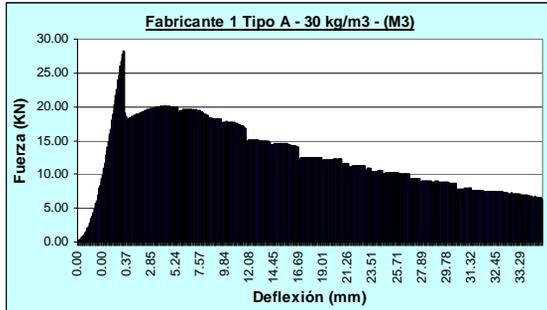
Fabricante 1 – Tipo A

Dosis de fibra: 20 kg/m³:

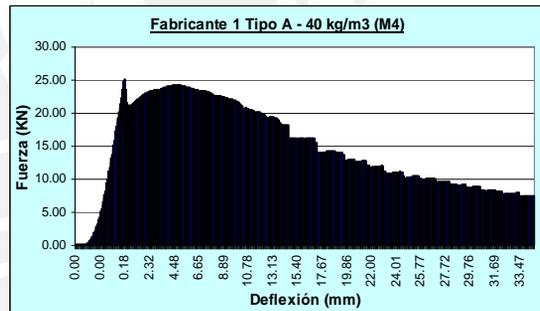
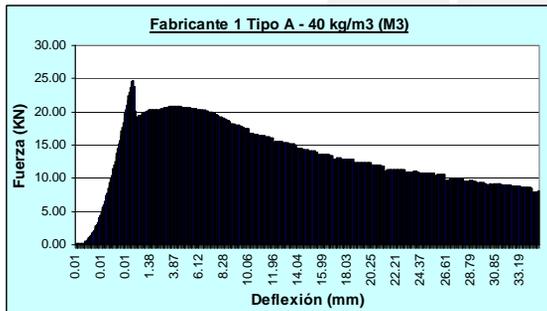
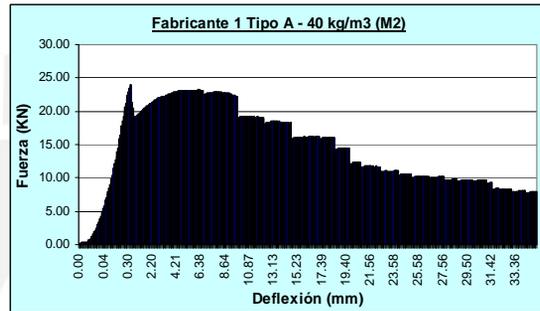
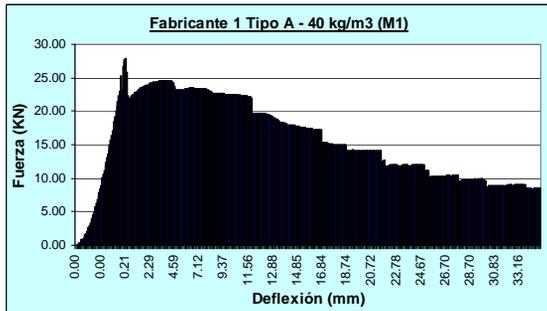


Dosis de fibra: 30 kg/m³:



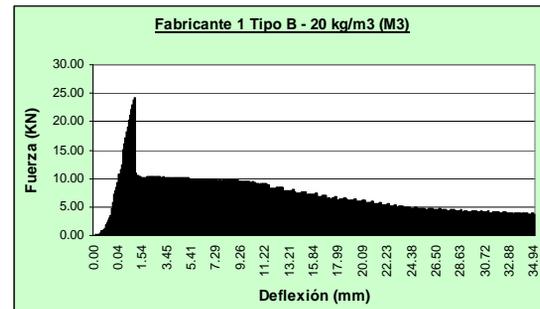
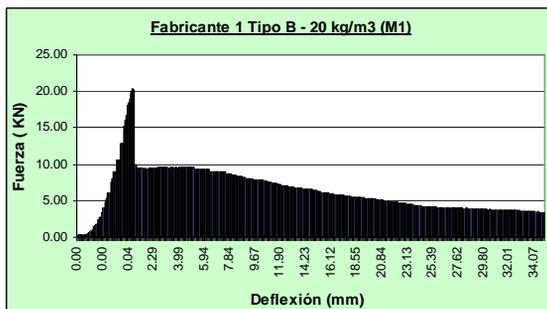


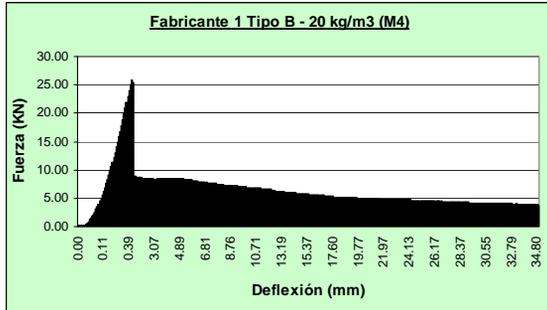
Dosis de fibra: 40 kg/m³:



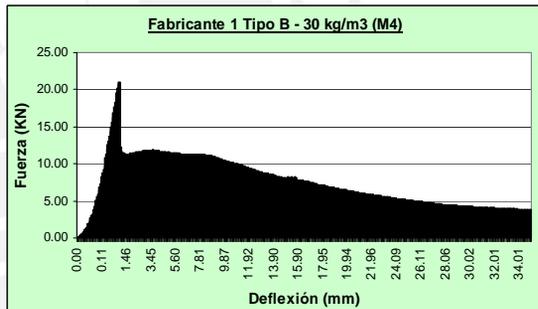
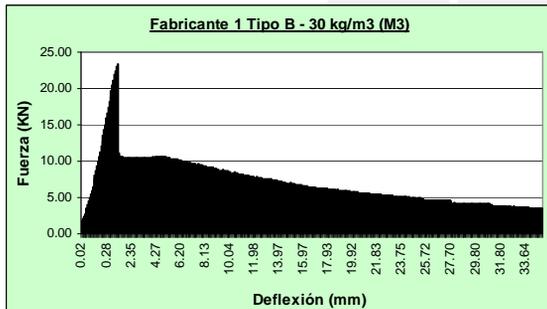
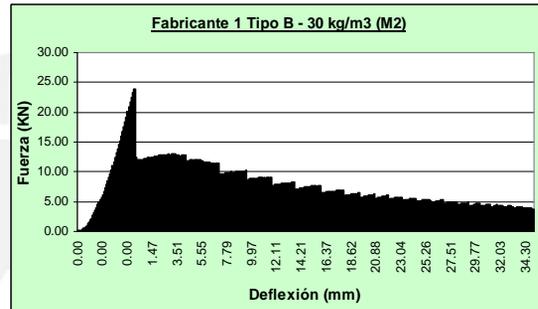
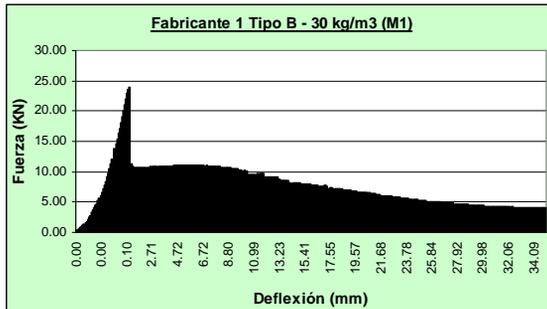
Fabricante 1 – Tipo B

Dosis de fibra: 20 kg/m³:

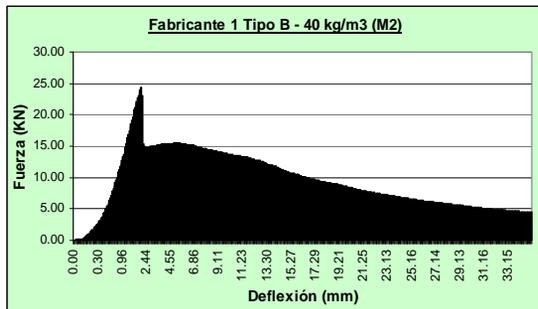
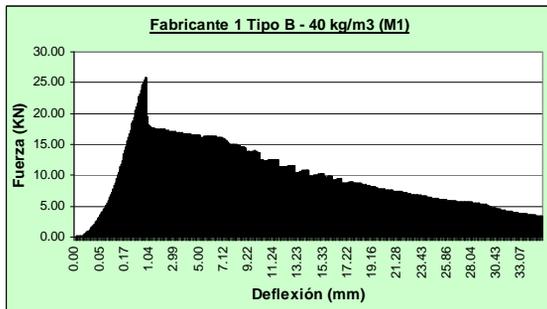


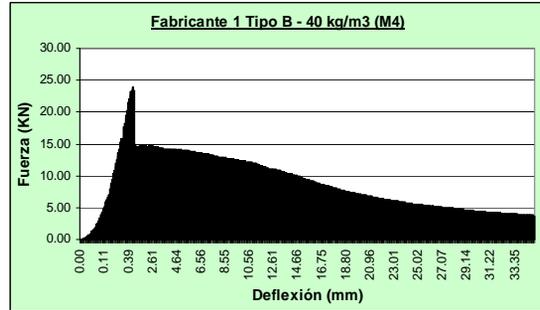
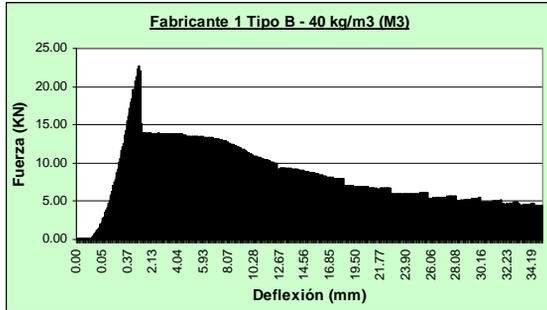


Dosis de fibra: 30 kg/m³:



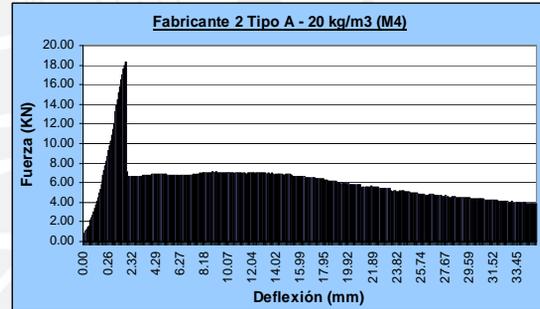
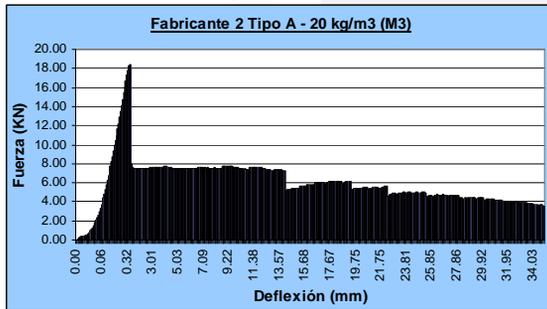
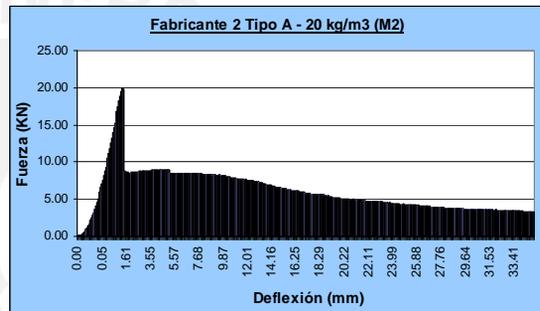
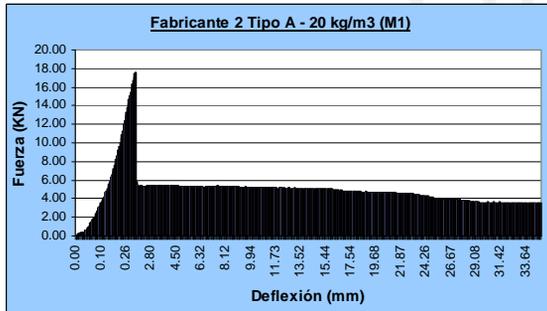
Dosis de fibra: 40 kg/m³:



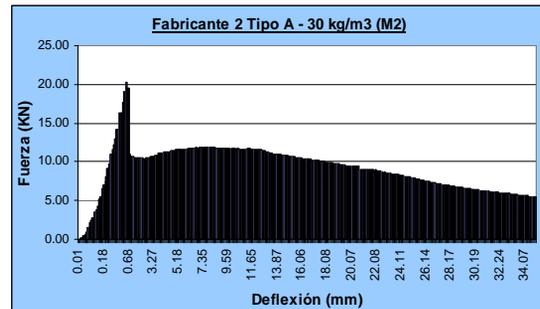
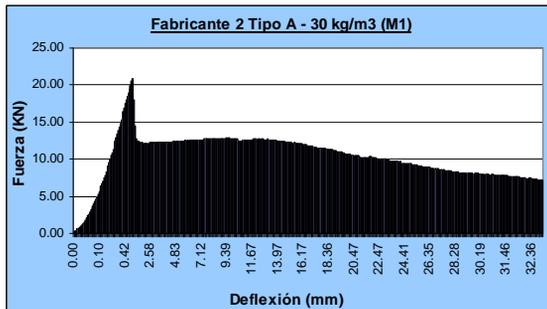


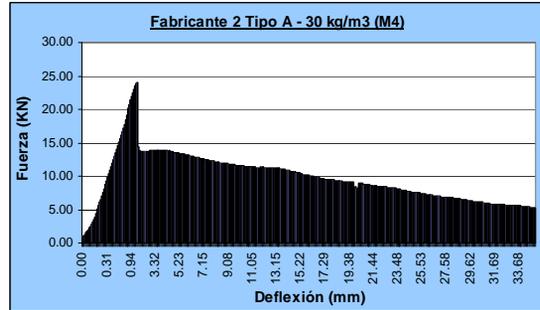
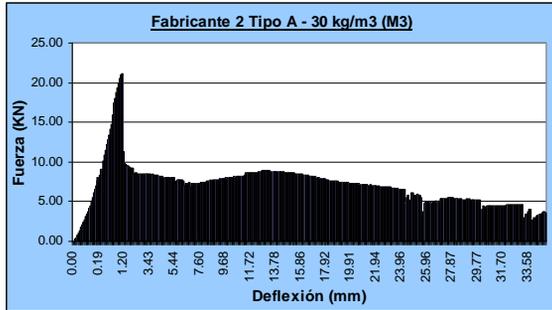
Fabricante 2 – Tipo A

Dosis de fibra: 20 kg/m³:

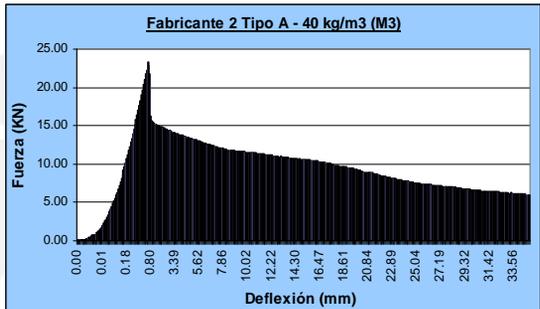
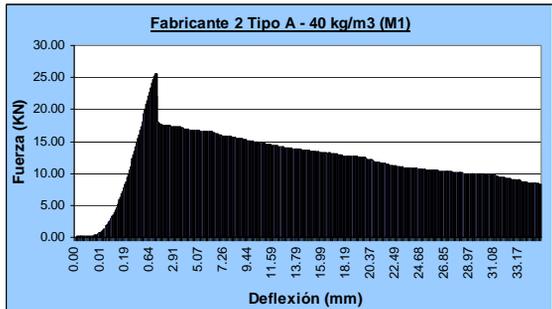


Dosis de fibra: 30 kg/m³:



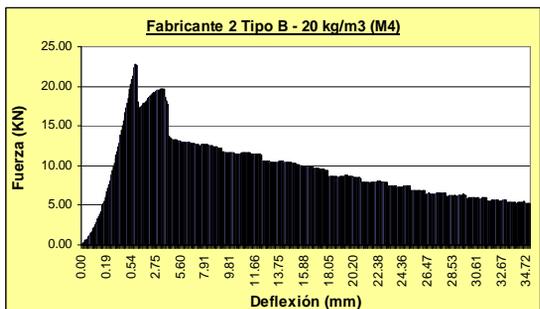
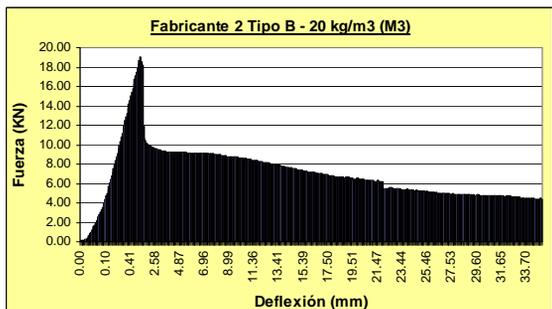
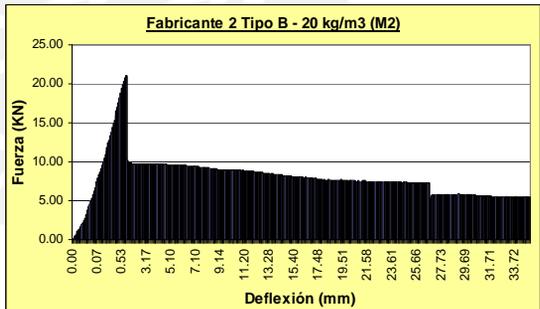
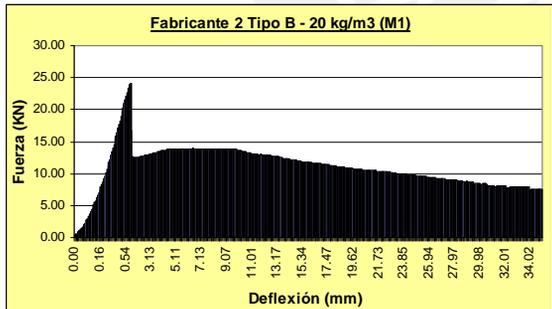


Dosis de fibra: 40 kg/m³:

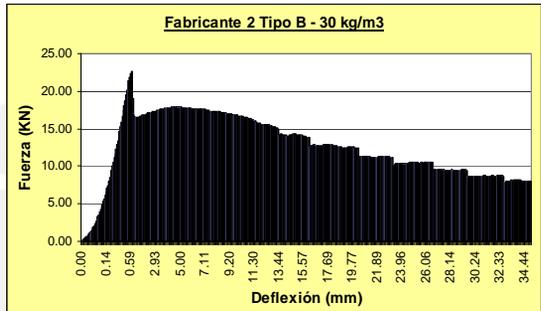
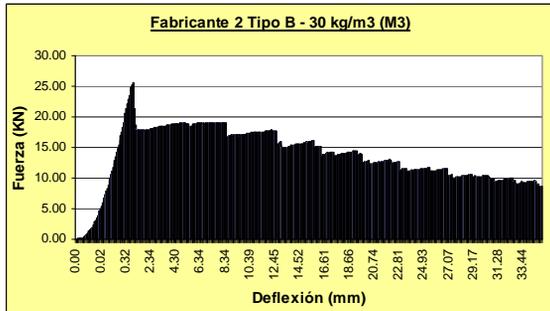
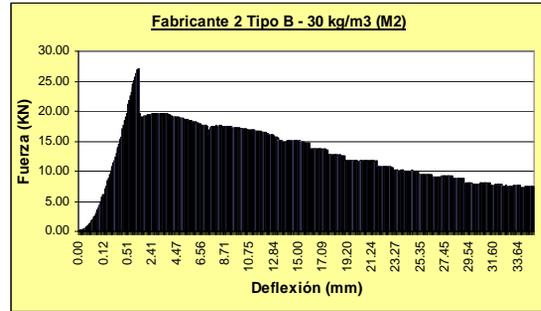
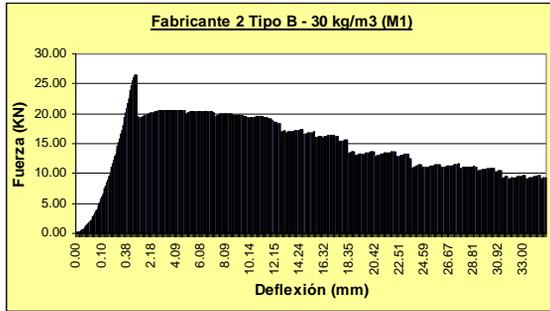


Fabricante 2 – Tipo B

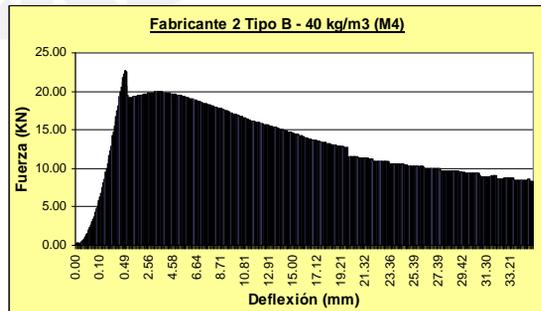
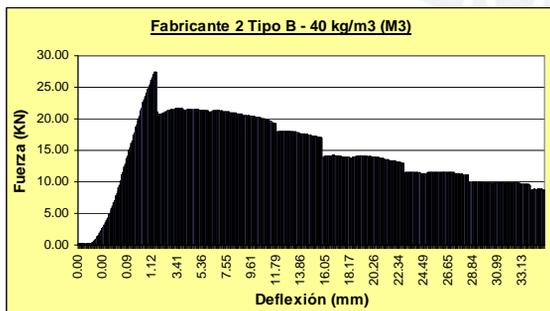
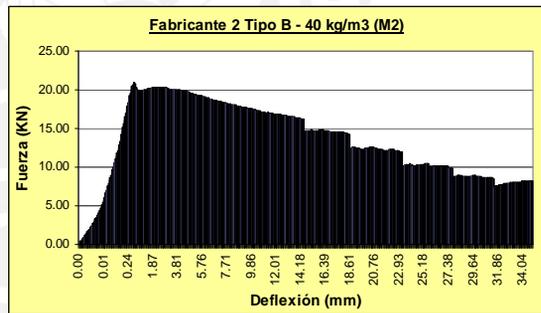
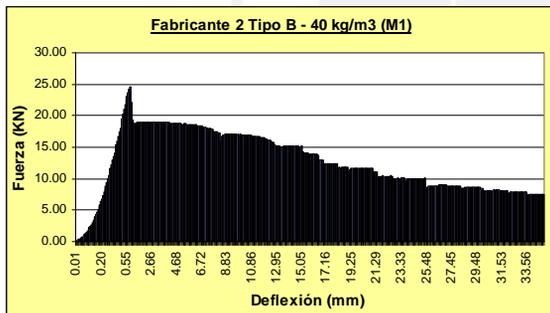
Dosis de fibra: 20 kg/m³:



Dosis de fibra: 30 kg/m³:

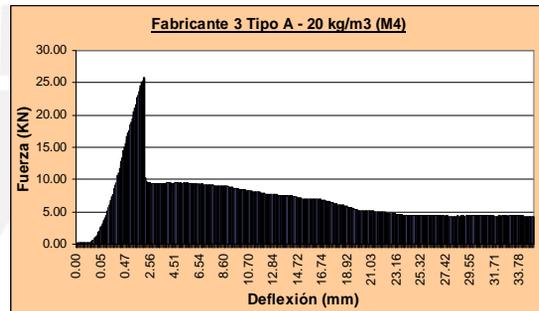
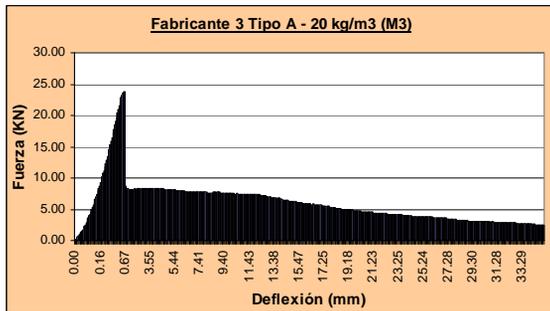
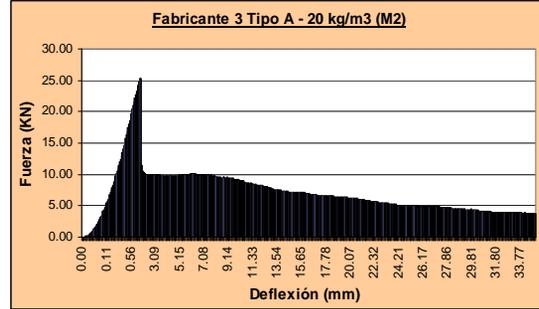
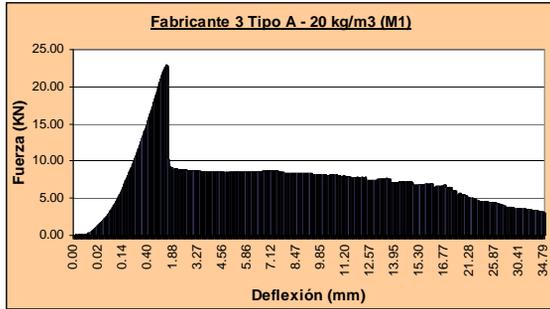


Dosis de fibra: 40 kg/m³:



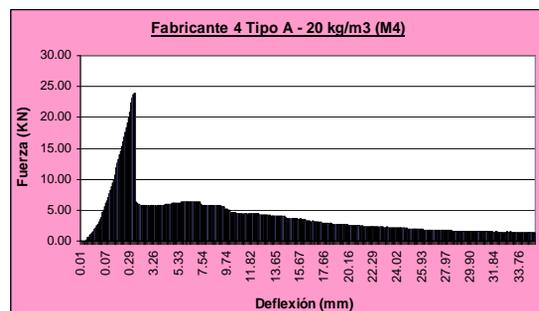
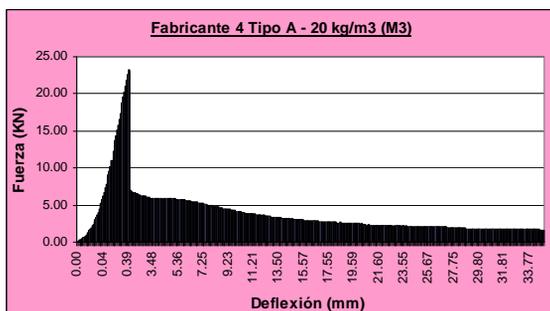
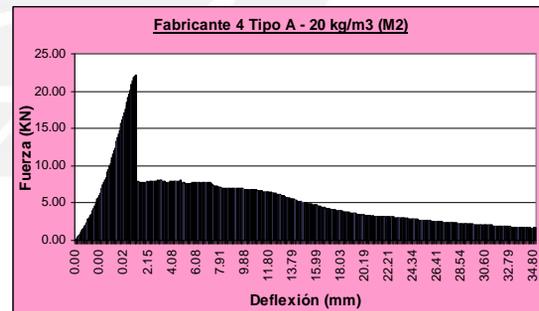
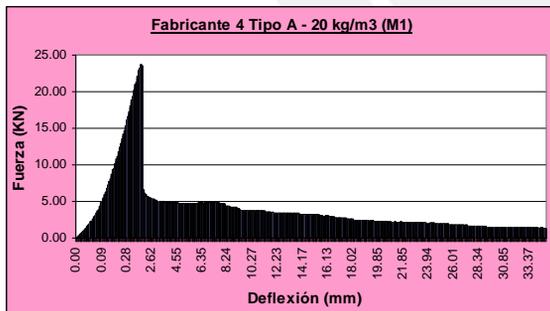
Fabricante 3 – Tipo A

Dosis de fibra: 20 kg/m³:

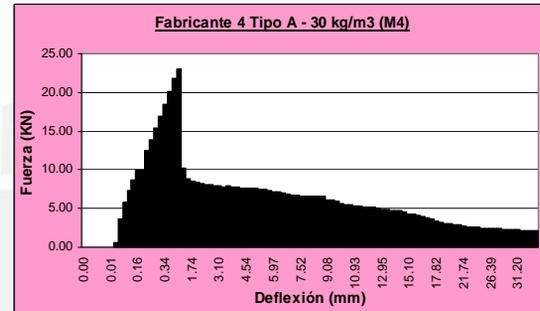
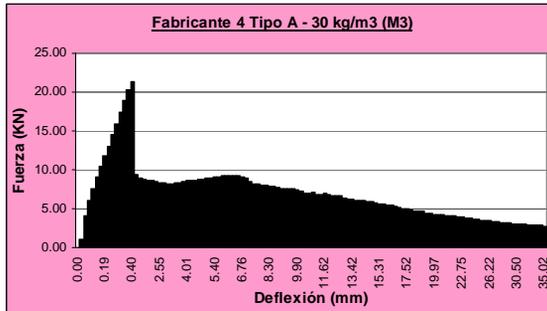
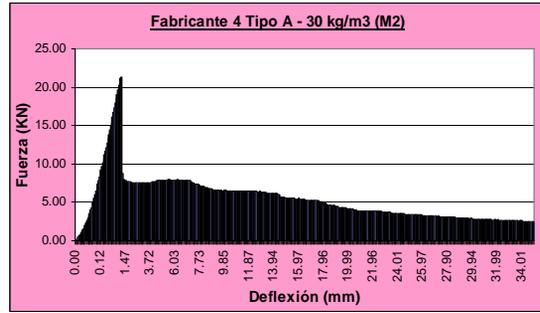
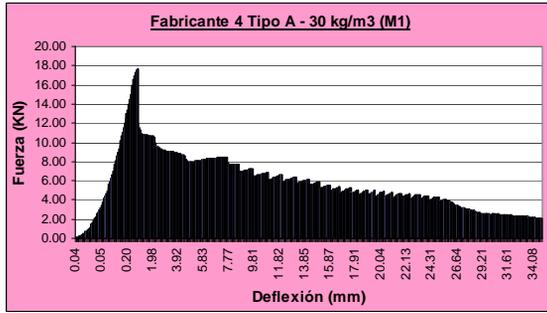


Fabricante 4 – Tipo A

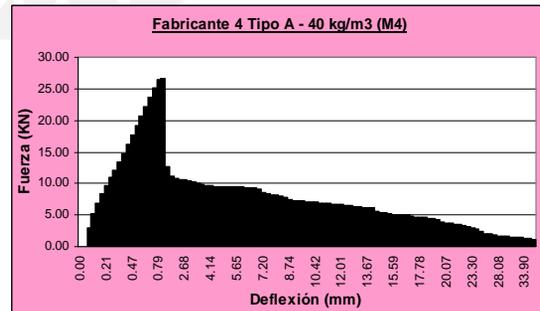
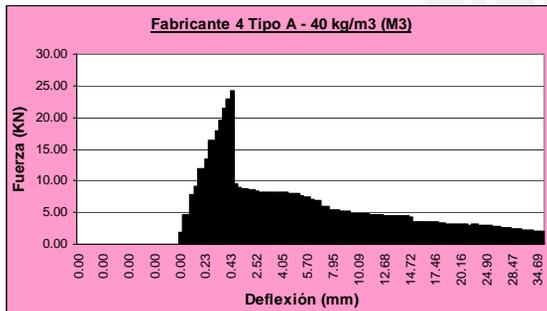
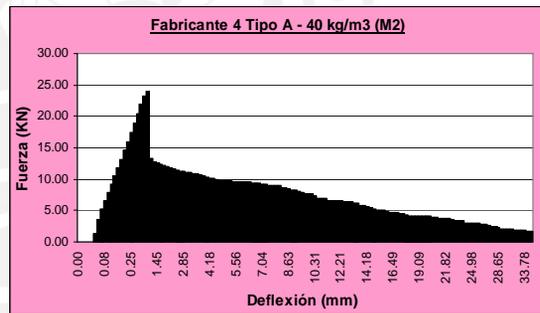
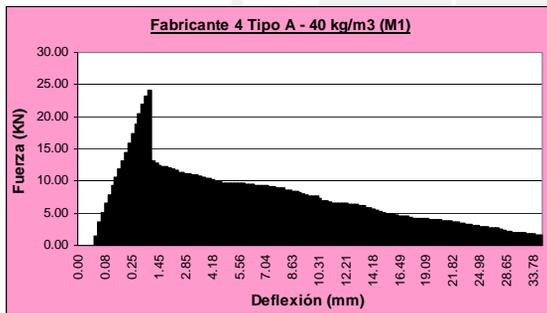
Dosis de fibra: 20 kg/m³:



Dosis de fibra: 30 kg/m³:

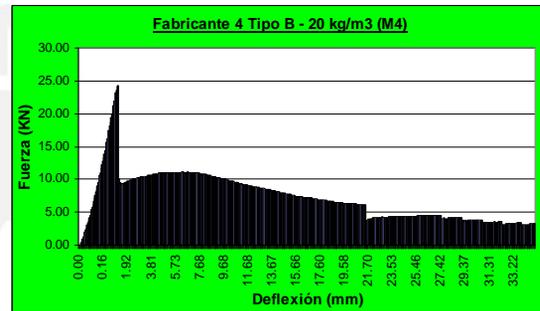
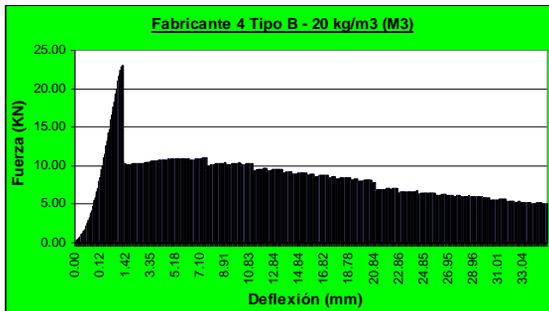
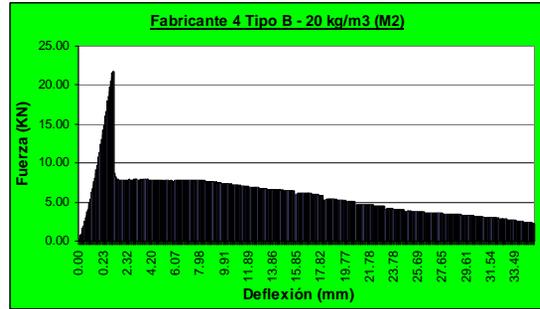
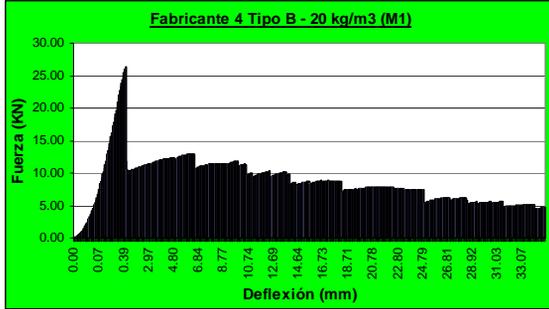


Dosis de fibra: 40 kg/m³:

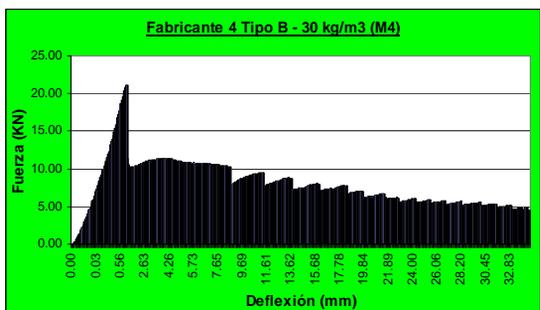
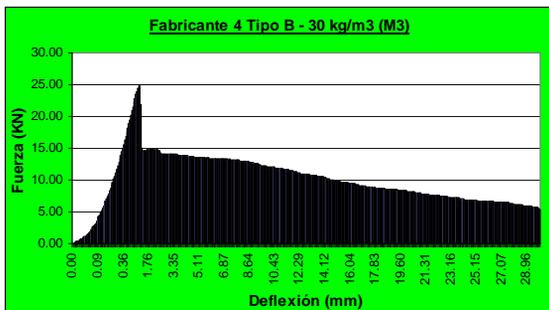
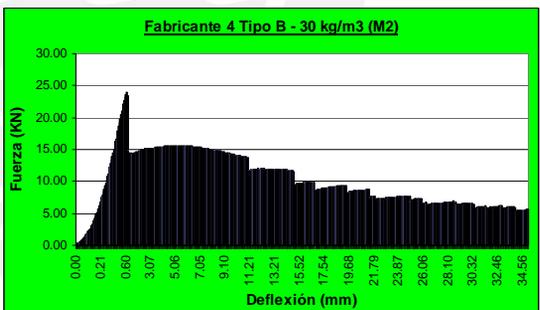
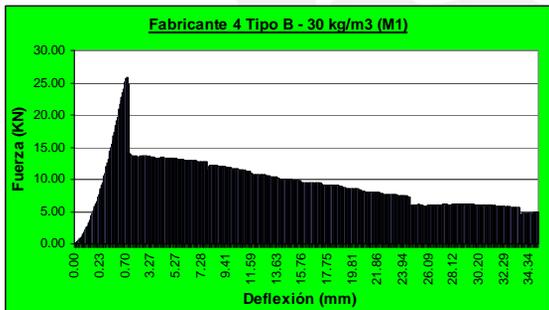


Fabricante 4 – Tipo B

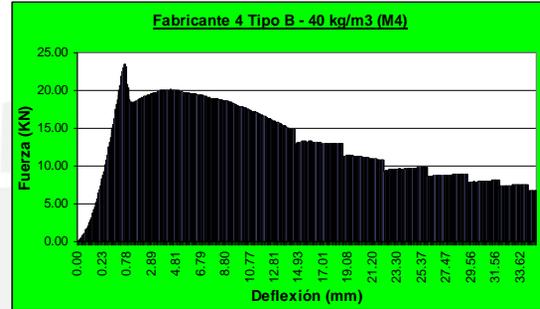
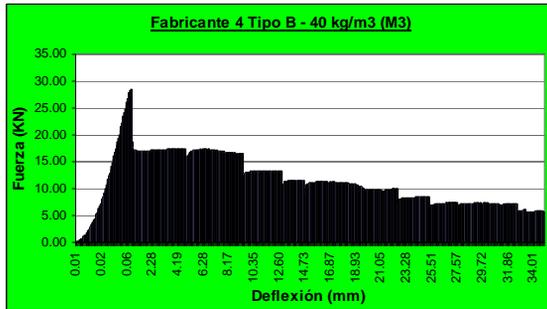
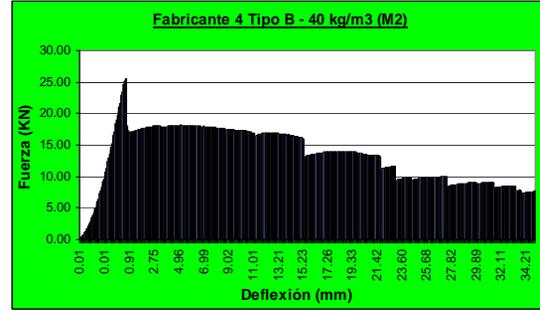
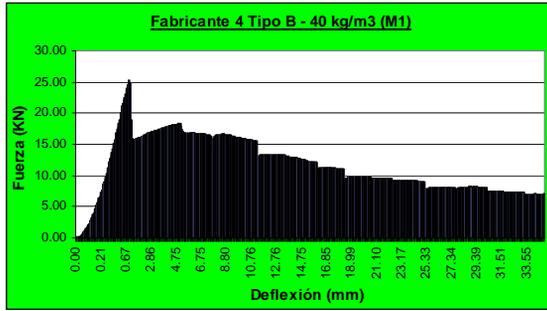
Dosis de fibra: 20 kg/m³:



Dosis de fibra: 30 kg/m³:

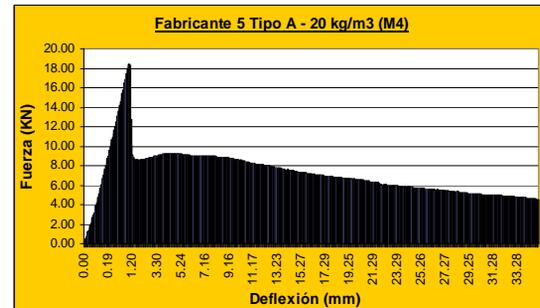
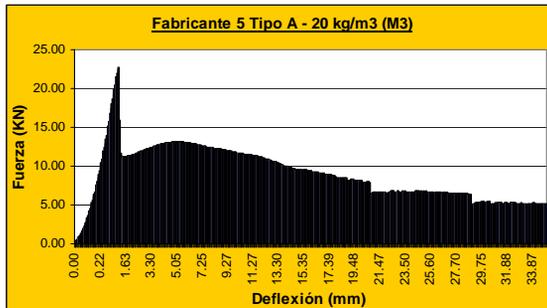
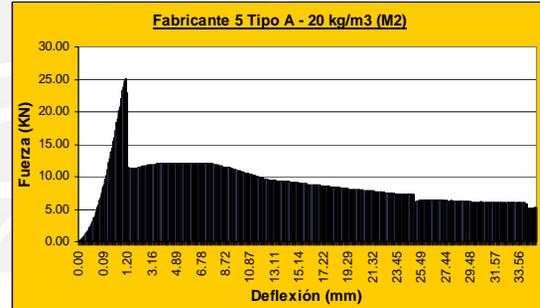
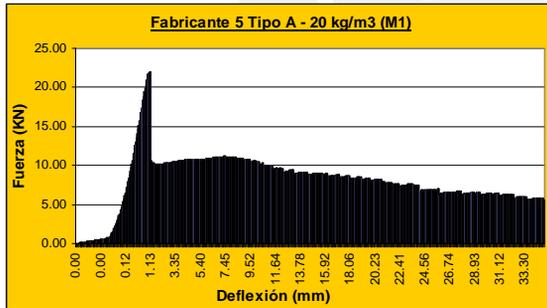


Dosis de fibra: 40 kg/m³:

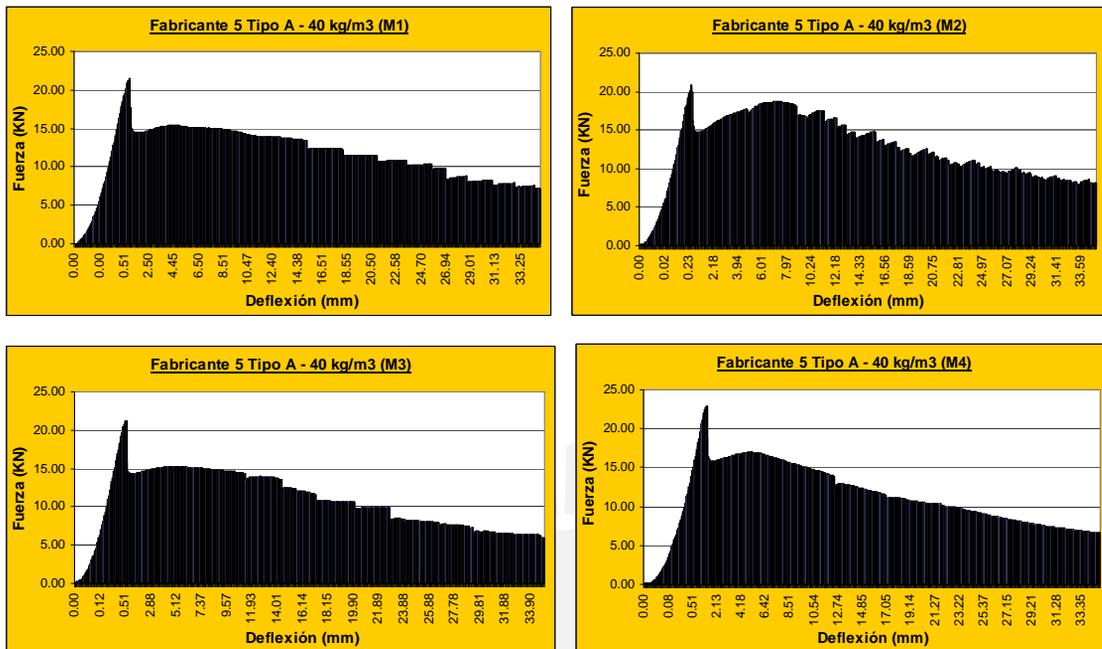


Fabricante 5 – Tipo A

Dosis de fibra: 20 kg/m³:



Dosis de fibra: 40 kg/m³:



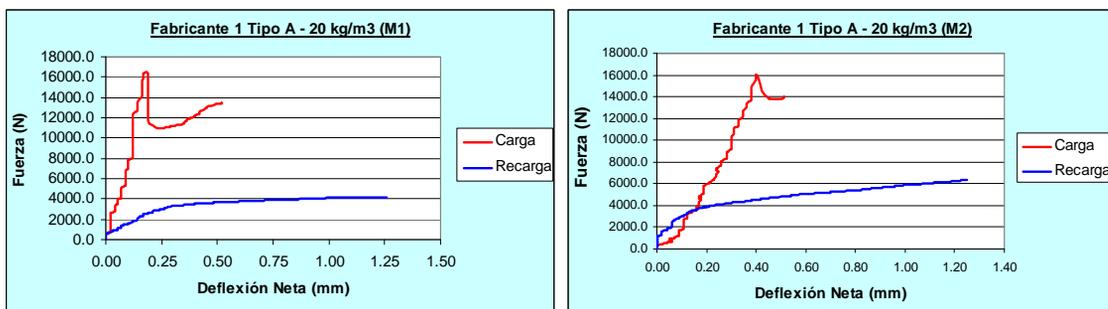
De acuerdo a los resultados experimentales derivados del ensayo de cada panel se han descartado aquellos testigos que han fallado antes de los 35mm de deflexión central o que han presentado una única fisura central (falla tipo viga), debido a que estas fallas evidencian defectos en la fabricación de los testigos y por lo tanto no pueden ser objeto de comparación.

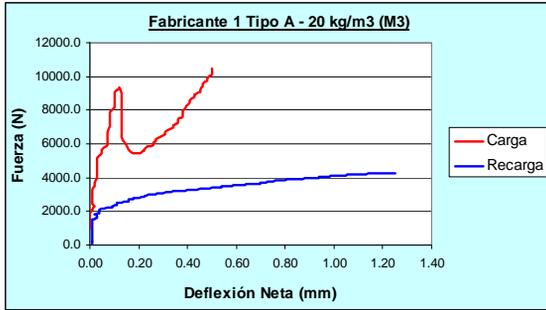
4.5.2 Resultados de vigas prismáticas:

El resultado de cada viga ensayada se representa por la gráfica fuerza vs. deformación. Tal como se observa el comportamiento de las curvas de carga y recarga depende del tipo de fibra ensayada, resultando en algunos casos en la inversión de la gráfica.

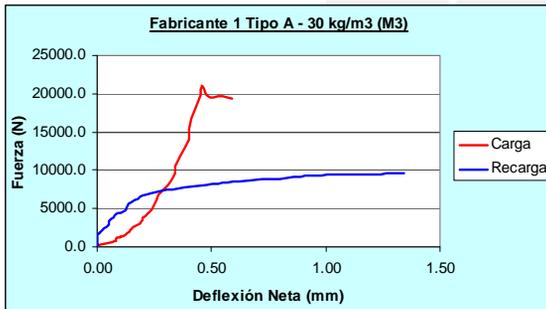
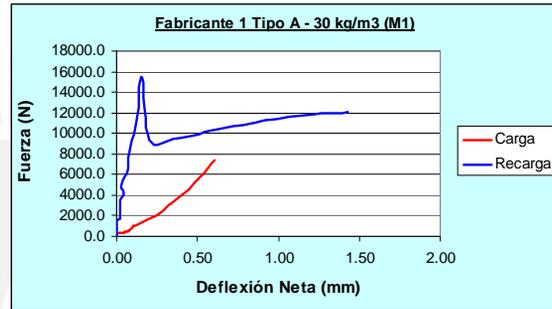
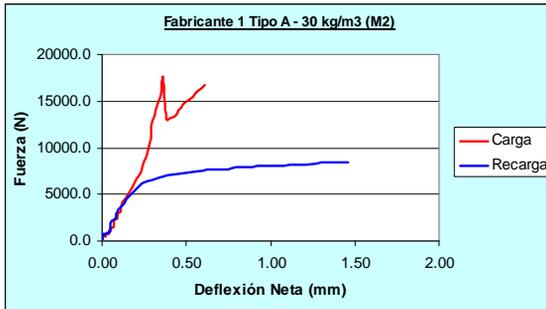
Fabricante 1 – Tipo A

Dosis de fibra: 20 kg/m³:

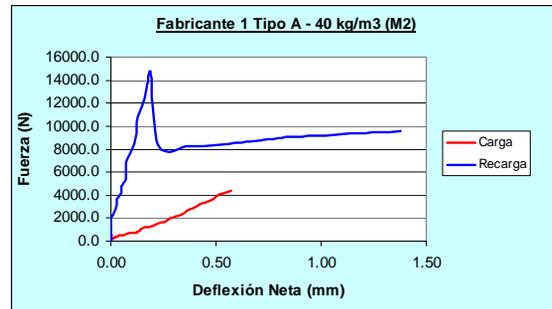
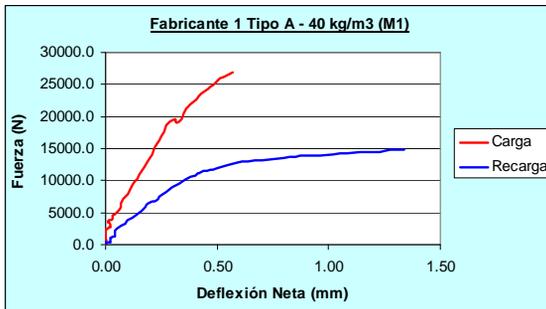


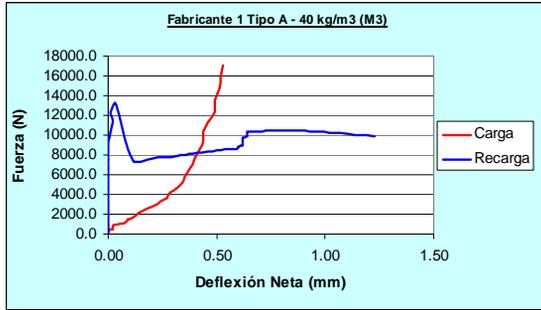


Dosis de fibra: 30 kg/m³:



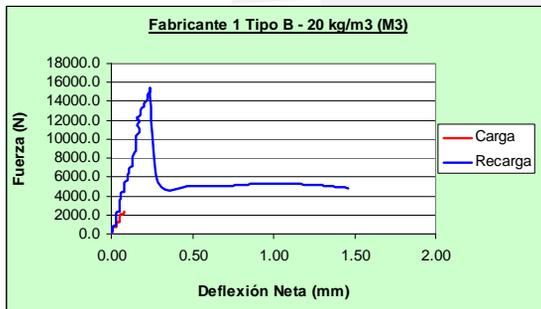
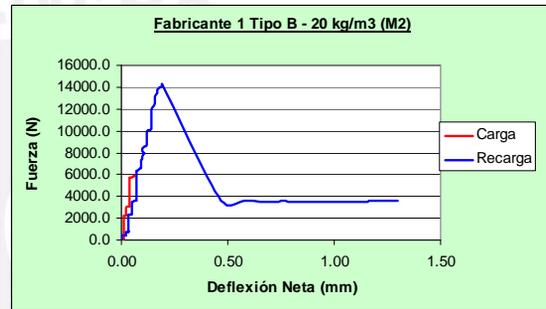
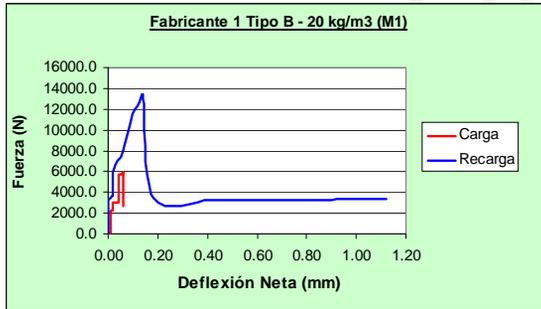
Dosis de fibra: 40 kg/m³:



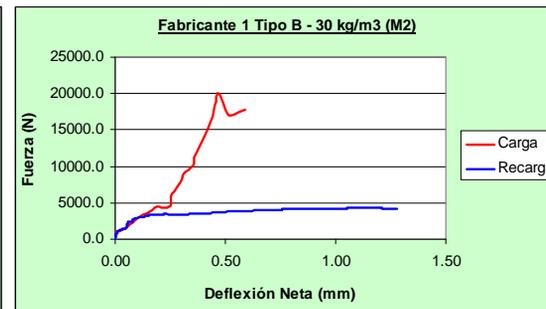
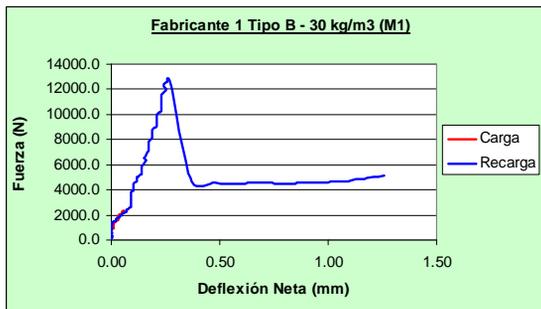


Fabricante 1 – Tipo B

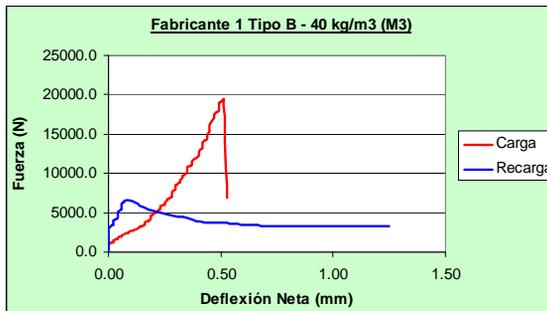
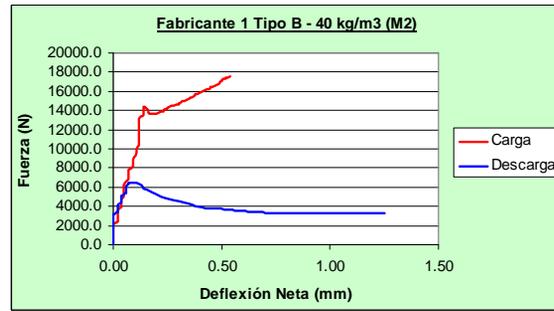
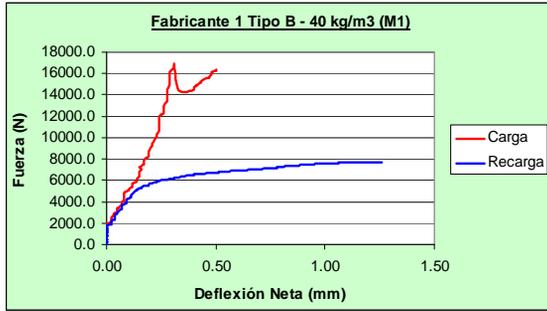
Dosis de fibra: 20 kg/m³:



Dosis de fibra: 30 kg/m³:

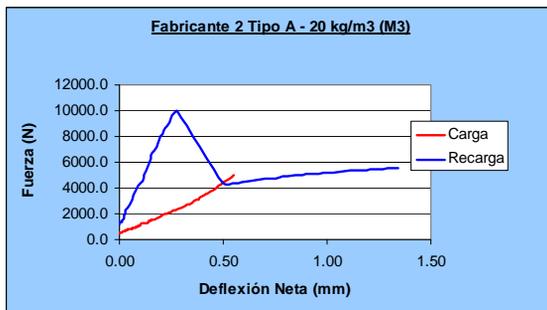
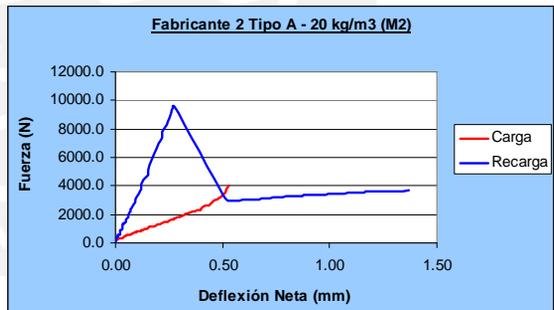
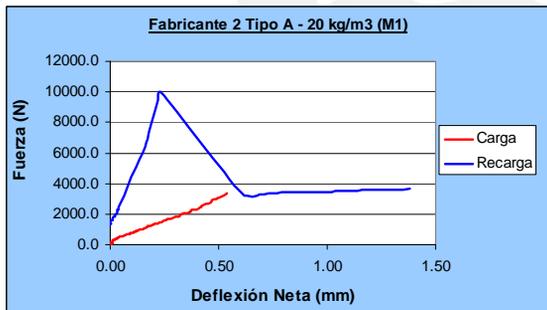


Dosis de fibra: 40 kg/m³:

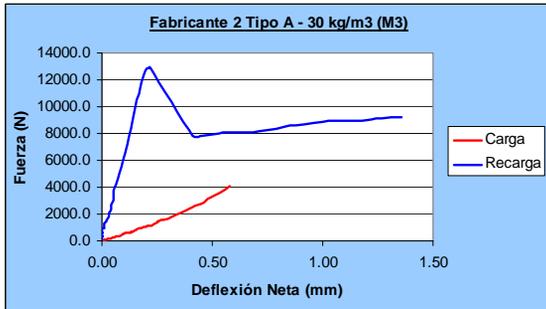
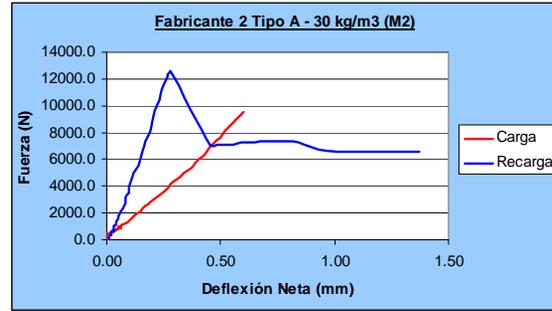
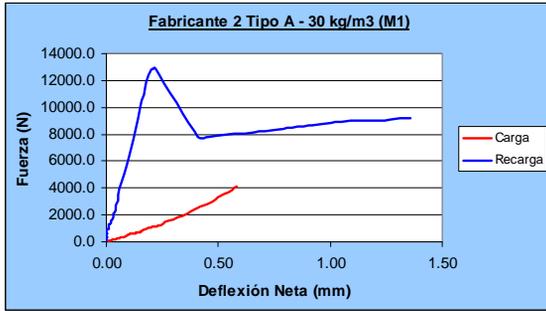


Fabricante 2 – Tipo A

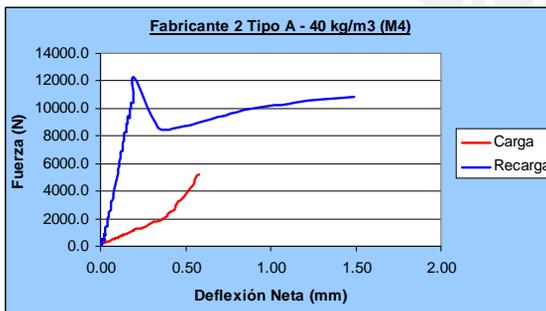
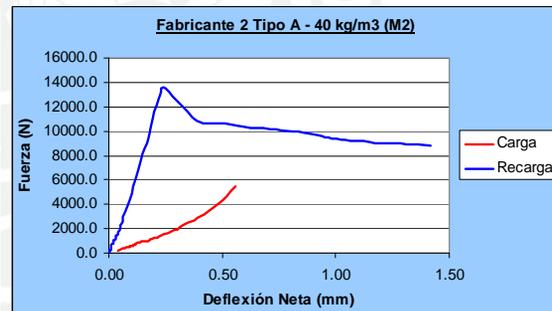
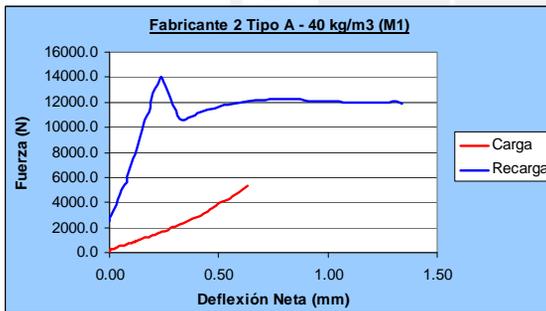
Dosis de fibra: 20 kg/m³:



Dosis de fibra: 30 kg/m³:

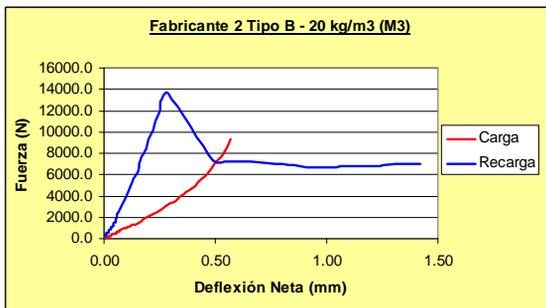
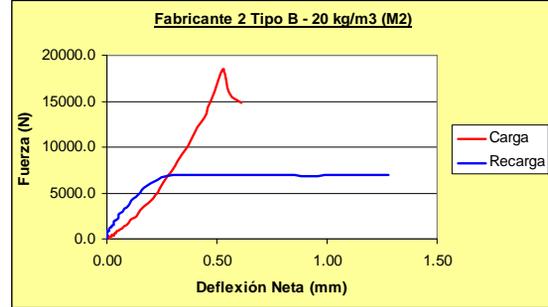
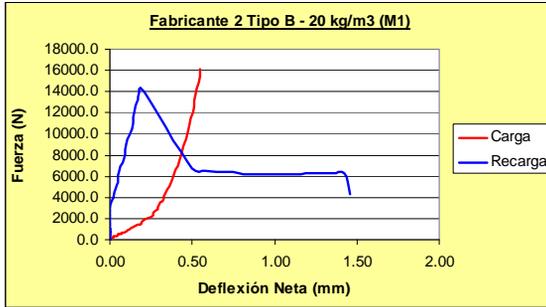


Dosis de fibra: 40 kg/m³:

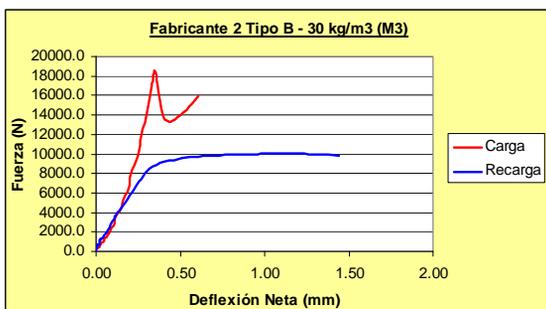
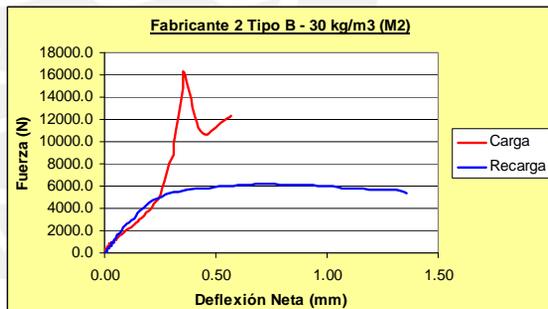
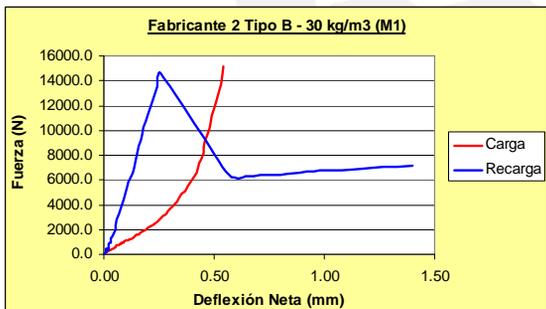


Fabricante 2 – Tipo B

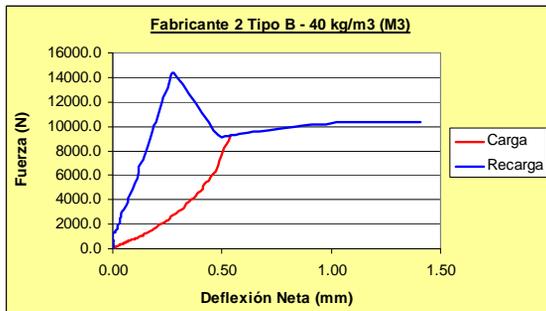
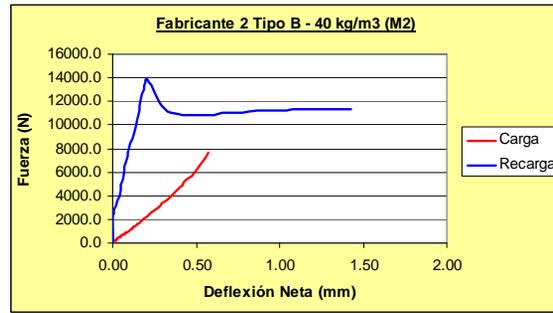
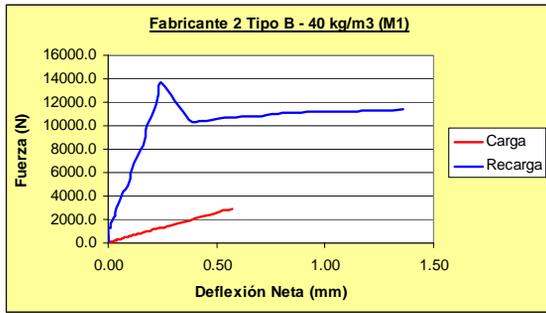
Dosis de fibra: 20 kg/m³:



Dosis de fibra: 30 kg/m³:

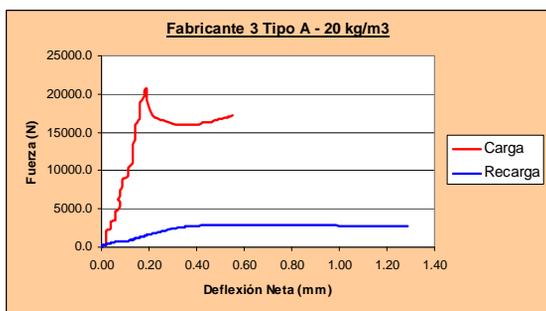
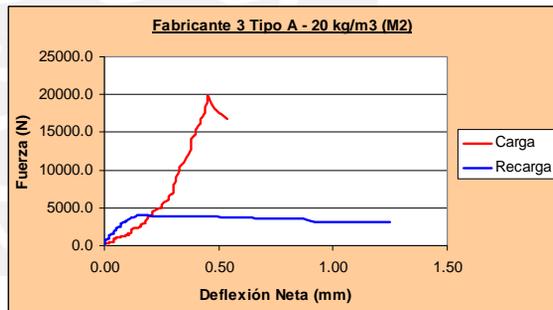
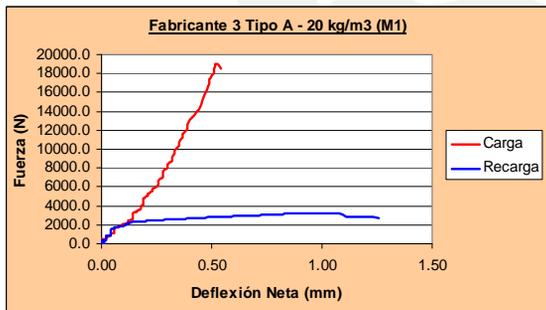


Dosis de fibra: 40 kg/m³:



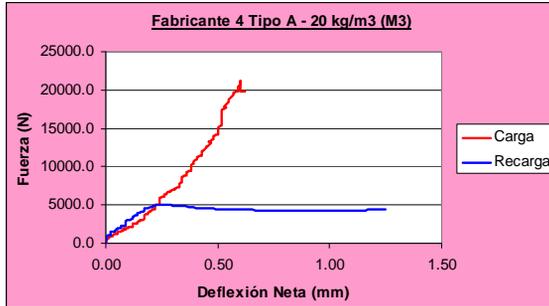
Fabricante 3 – Tipo A

Dosis de fibra: 20 kg/m³:

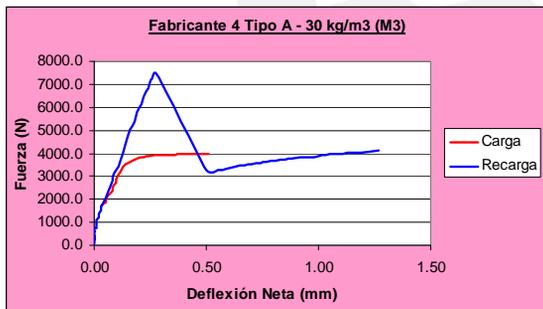
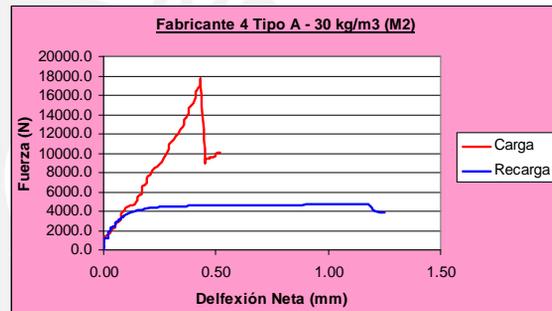
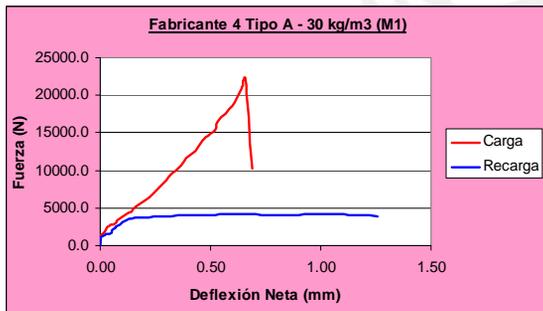


Fabricante 4 – Tipo A

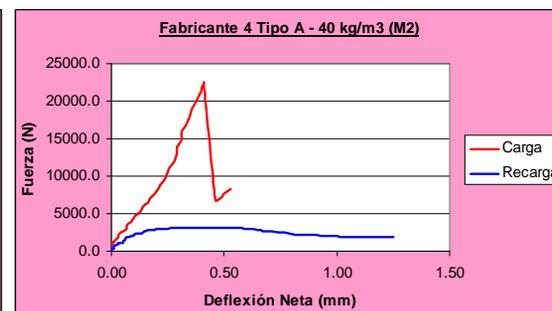
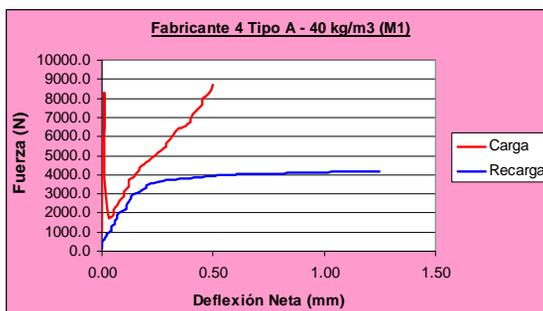
Dosis de fibra: 20 kg/m³:

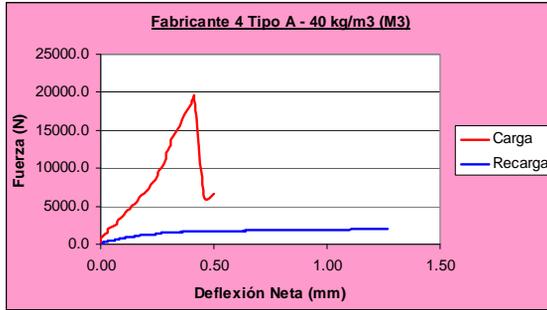


Dosis de fibra: 30 kg/m³:



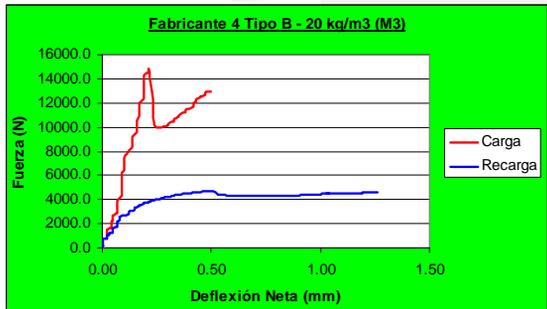
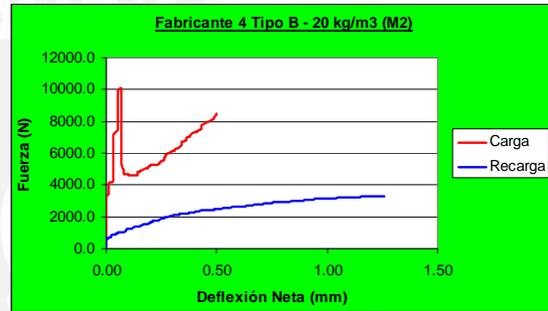
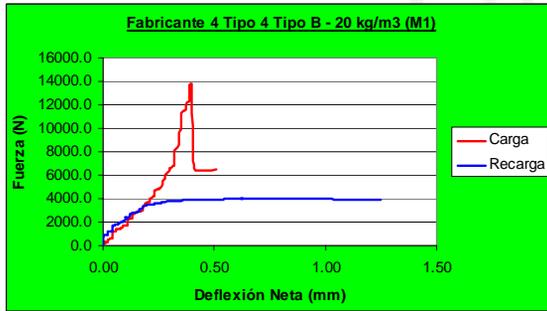
Dosis de fibra: 40 kg/m³:



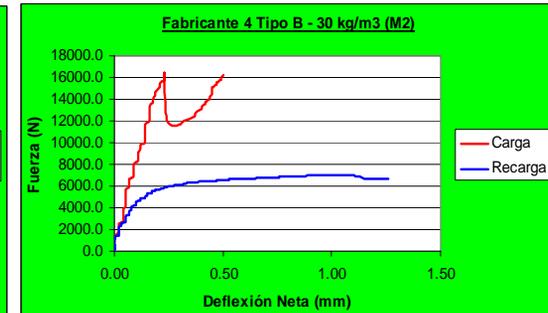
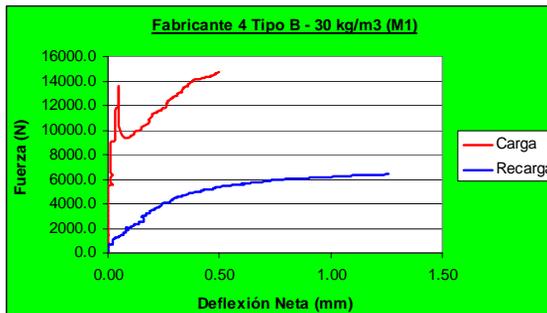


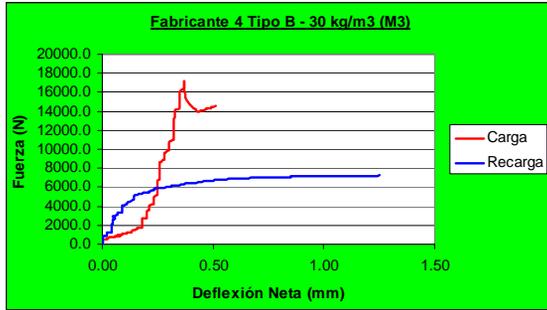
Fabricante 4 – Tipo B

Dosis de fibra: 20 kg/m³:

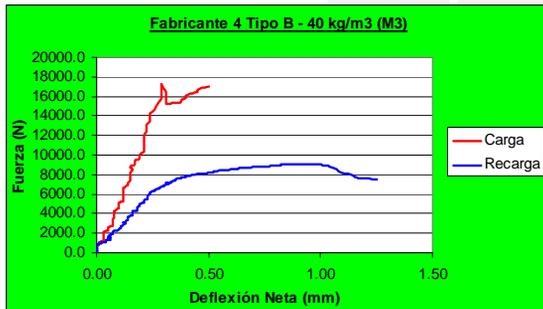
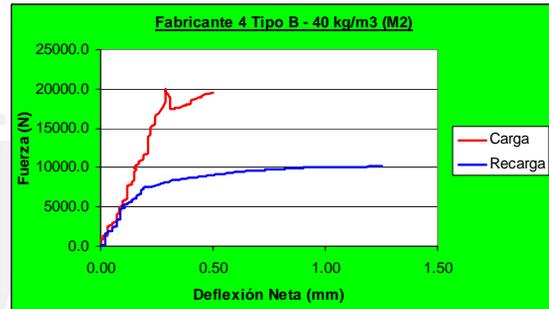
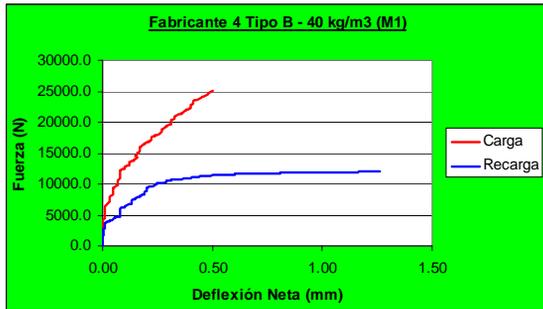


Dosis de fibra: 30 kg/m³:



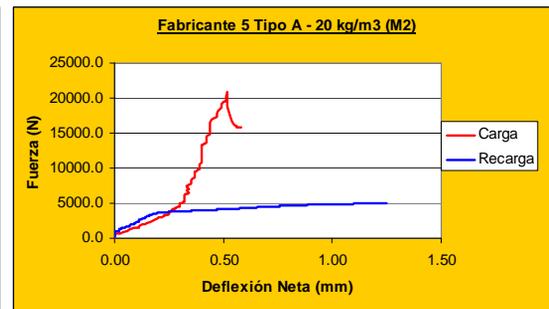
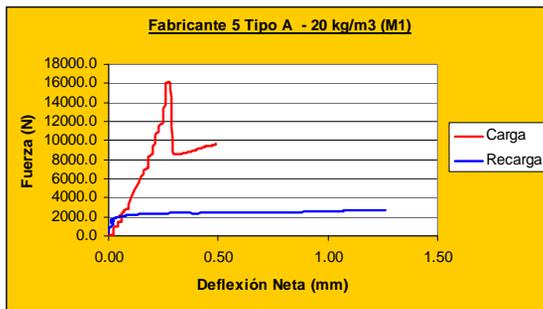


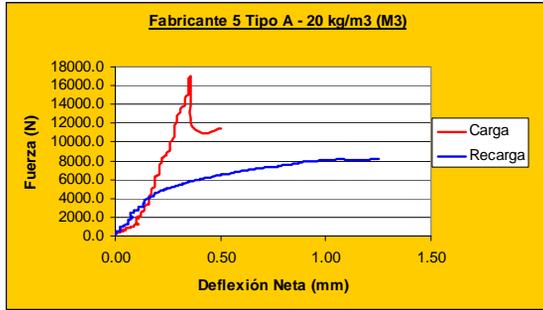
Dosis de fibra: 40 kg/m³:



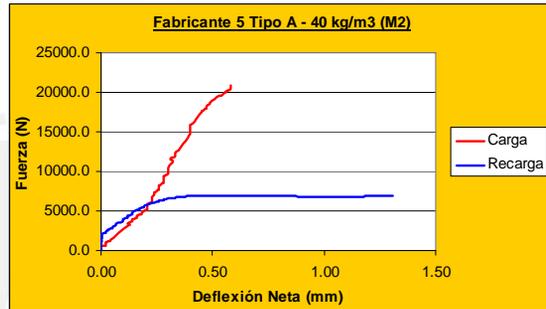
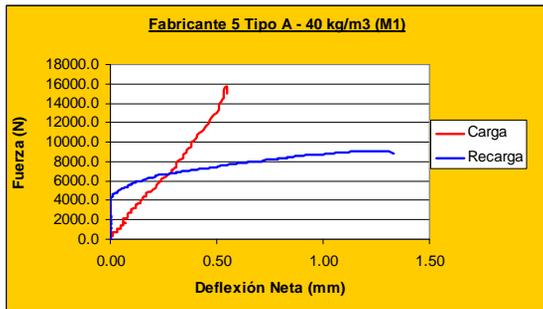
Fabricante 5 – Tipo A

Dosis de fibra: 20 kg/m³:





Dosis de fibra: 40 kg/m³:



CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

5.1 Análisis de la relación entre el incremento de la capacidad de absorción de energía y la dosificación de fibra, por fabricante.

Tomando como base los resultados experimentales de la energía absorbida por el concreto para cada una de las combinaciones de fibra y fabricante, es posible construir una relación gráfica entre el incremento en la dosificación de fibra y la cantidad total de energía (incluyendo la energía aportada por el concreto) que puede absorber el material hasta la deformación especificada.

Tal como muestran las gráficas (Figs 55 a 62), esta relación es característica del material y varía para cada tipo de fibra aún si son del mismo fabricante ya que dependen la morfología y composición de cada filamento particular.

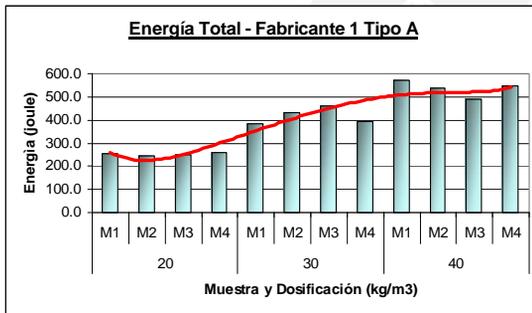


Fig. 55

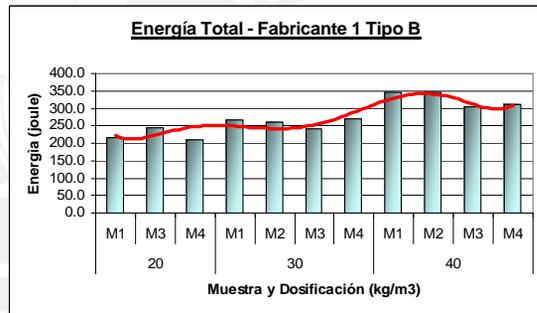


Fig. 56

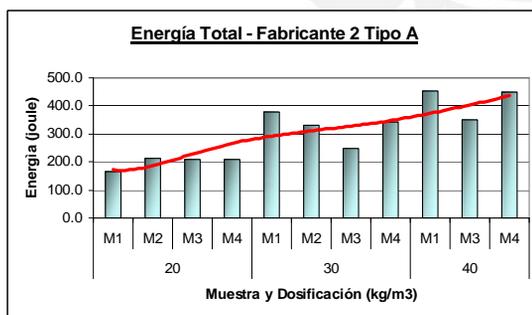


Fig. 57

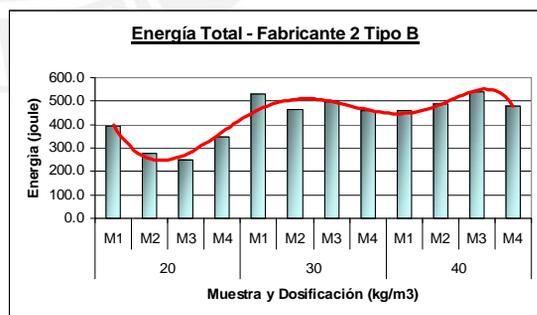


Fig. 58

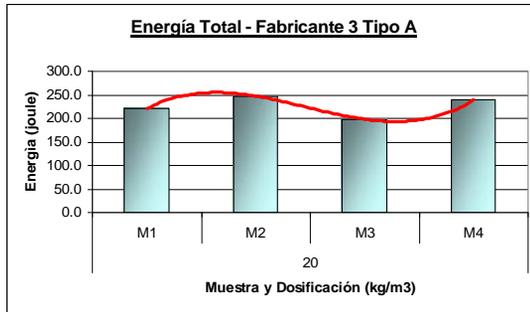


Fig. 59

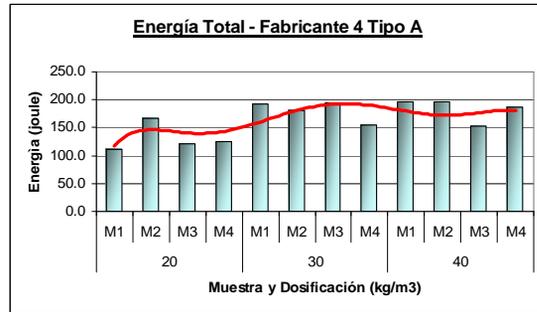


Fig. 60

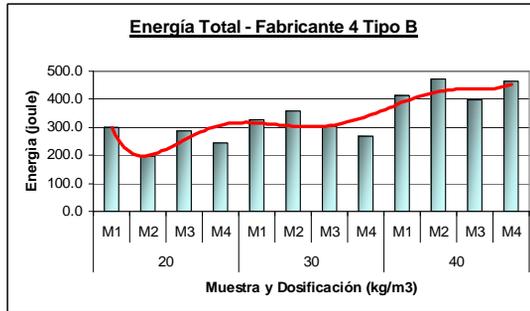


Fig. 61

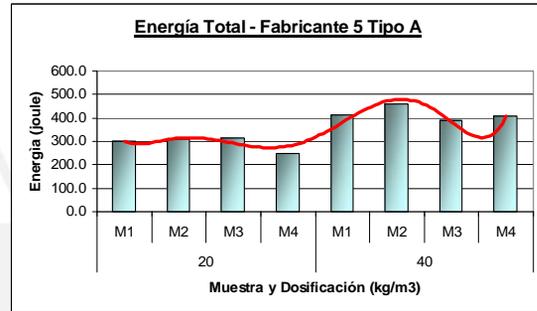


Fig. 62

En todos los casos analizados puede observarse un incremento de energía absorbida paralelo al incremento en la dosificación de fibra en el concreto.

Queda de manifiesto que la absorción de energía que hace el concreto, considerando hasta la aparición de la primera fisura, es pequeña en comparación a la energía que absorbe la fibra en su interior. Cabe señalar que no hay una relación lineal común a todos los tipos de fibra entre el aporte del concreto y la dosificación, ya que tal como se muestra en el siguiente gráfico cada fabricante y tipo de fibra exhibe un patrón particular, aún cuando se trate del mismo contenido de cemento (Fig. 63).

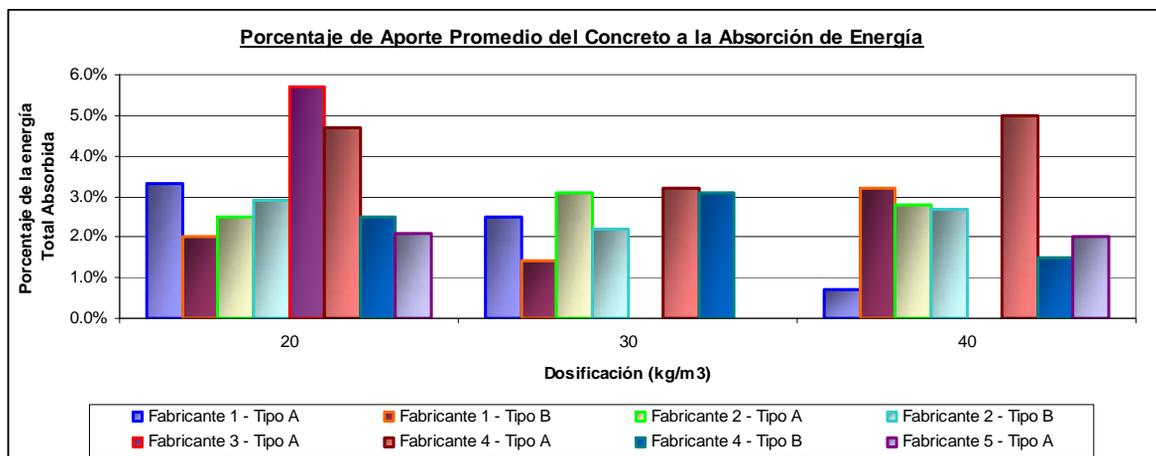


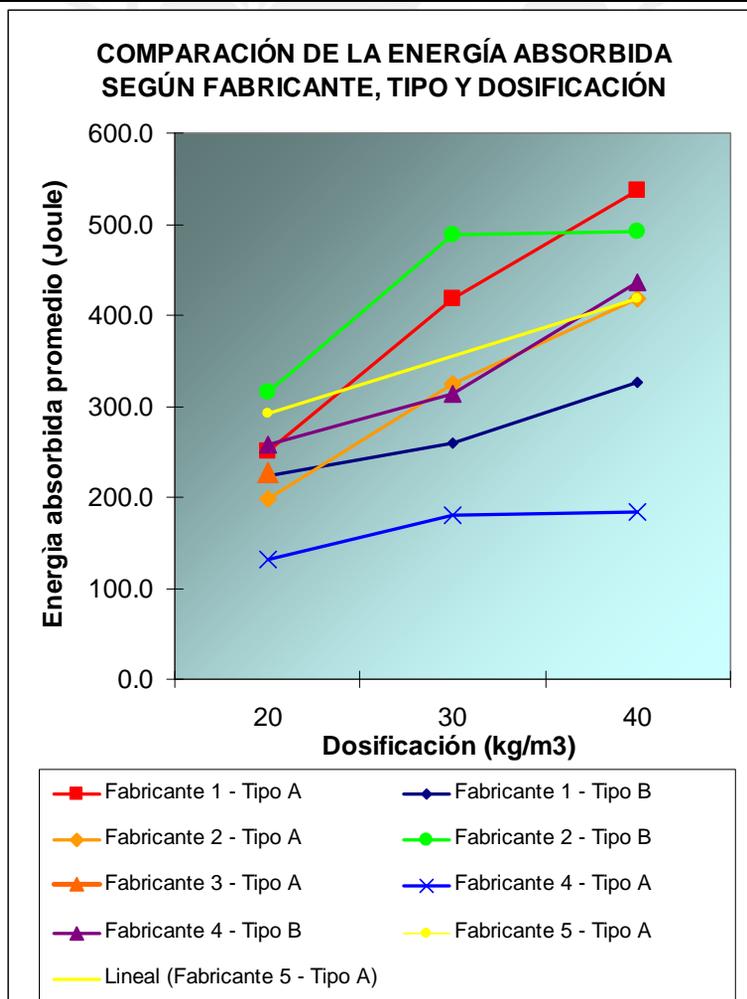
Fig. 63

5.2 Comparación de absorción de energía vs. dosificación entre fabricantes.

Tomando como base la cantidad de energía absorbida por cada fabricante, tipo de fibra y dosificación se establece una comparación directa entre las capacidades de cada material (tabla 5.01). A fin de reducir las variables propias de cada espécimen (distribución de la fibra al interior del panel, variaciones en las dimensiones, dispersión de la resistencia del concreto, entre otros) se toma como parámetro de comparación la energía total absorbida promedio de los paneles válidamente ensayados.

TABLA 5.01

Fabricante y Tipo	20	30	40	Dosis (kg/m ³)
Fabricante 1 - Tipo A	251.1	418.1	536.8	Energía Promedio (Joule)
Fabricante 1 - Tipo B	223.8	259.6	326.8	
Fabricante 2 - Tipo A	199.1	324.0	417.3	
Fabricante 2 - Tipo B	316.1	488.4	491.3	
Fabricante 3 - Tipo A	226.2			
Fabricante 4 - Tipo A	131.0	180.8	182.9	
Fabricante 4 - Tipo B	257.3	314.0	436.6	



Dado que cada muestra presenta una variación de la resistencia del concreto, debido a las tolerancias en la dosificación del mismo, cualquier comparación directa entre fabricantes y tipos de fibra se vería alterada por estas variaciones, especialmente si tomamos en cuenta que la deflexión y la carga pico de fisuración del concreto se encuentran asociadas a la resistencia a la tracción del material y en consecuencia a la resistencia en compresión. A fin de poder establecer una comparación válida entre muestras de diferente resistencias, se comparan “factores de carga y de deflexión”, los cuales son el resultado de la carga de fisuración entre la resistencia de la muestra y la deflexión entre la carga aplicada, respectivamente. De esta forma se compensa la variable resistencia y se colocan a las muestras bajo las mismas condiciones (por lo menos, desde el punto de vista de resistencia). Los siguientes gráficos muestran los valores logrados por cada muestra según el fabricante. Dichos valores pueden ser cuantificados y comparados para una posterior calificación de las fibras según desempeño (Figs. 64 a 73).

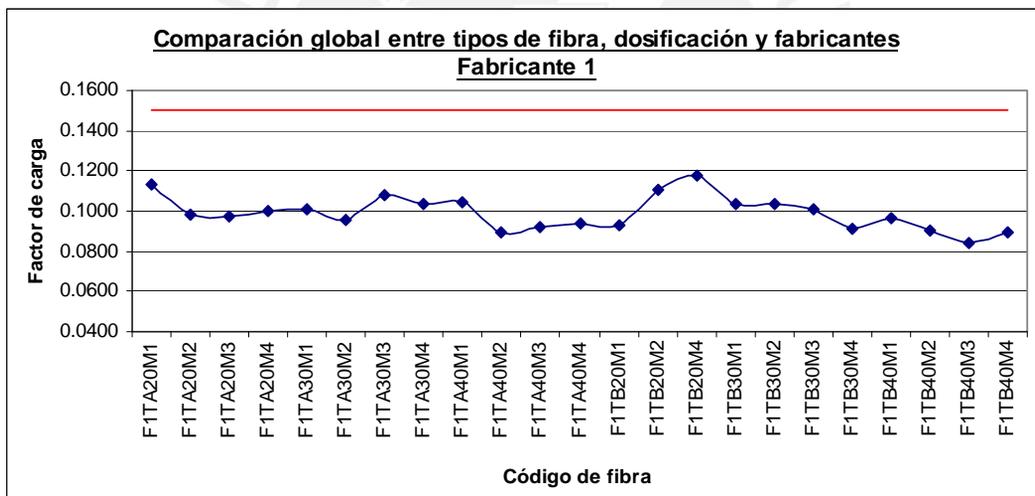


Fig. 64

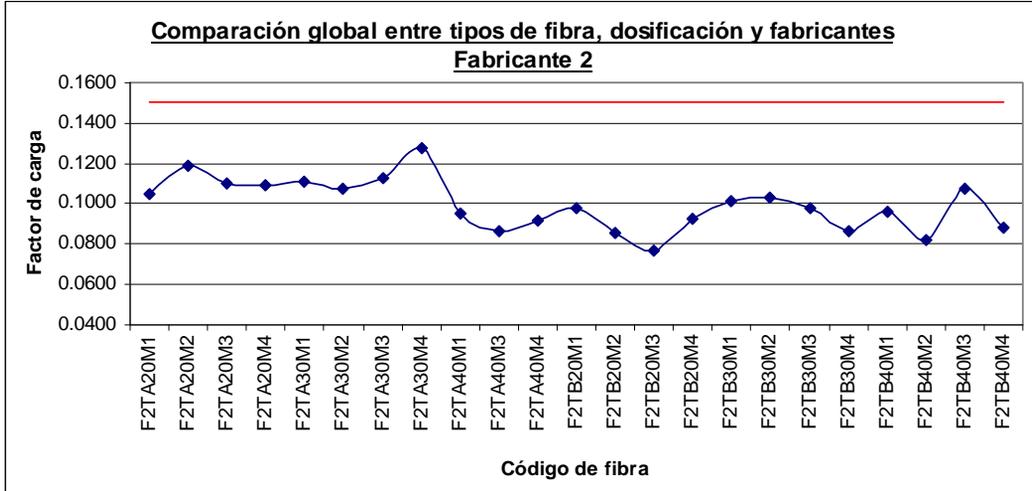


Fig. 65

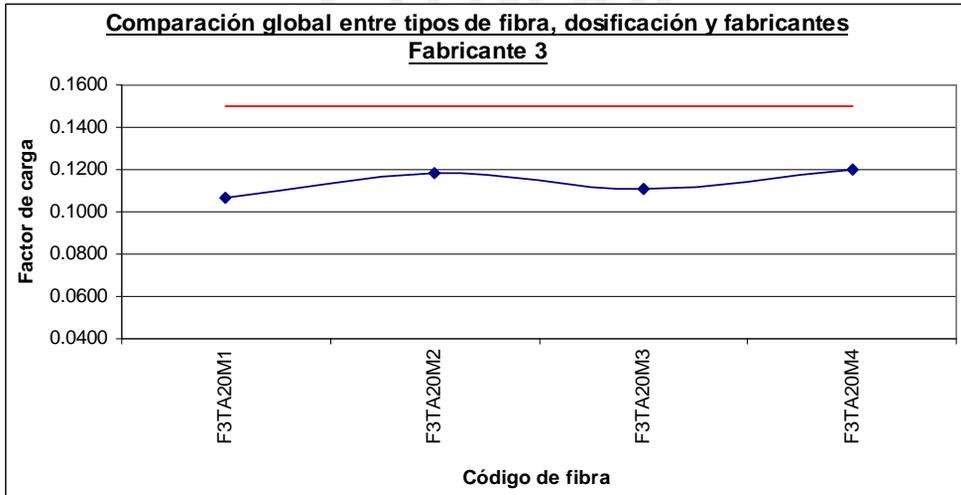


Fig. 66

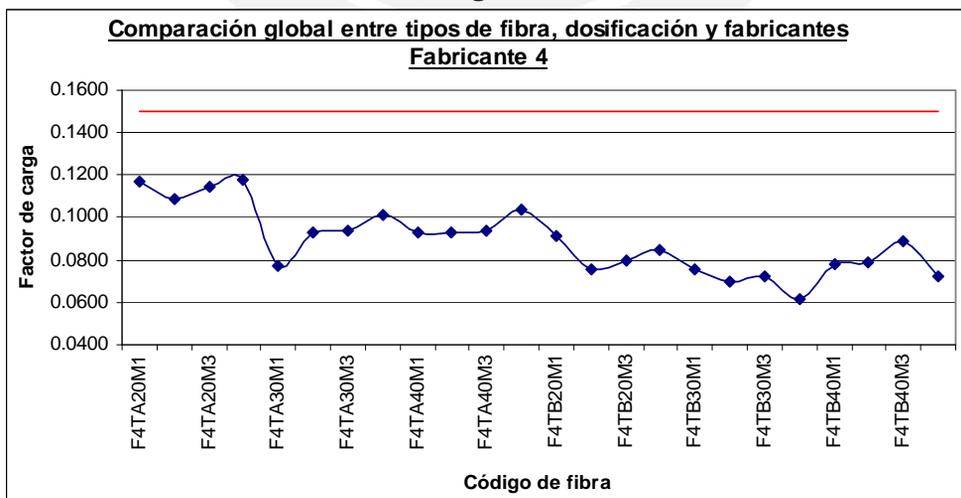


Fig. 67

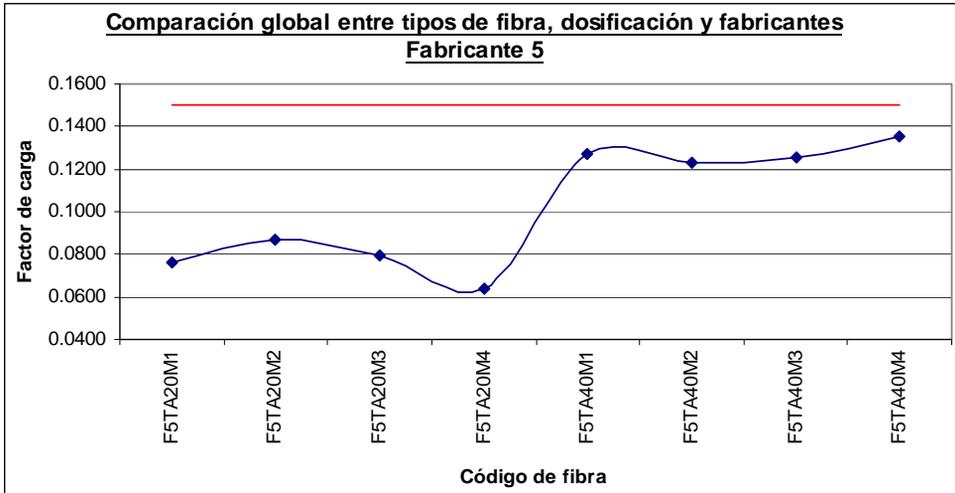


Fig. 68

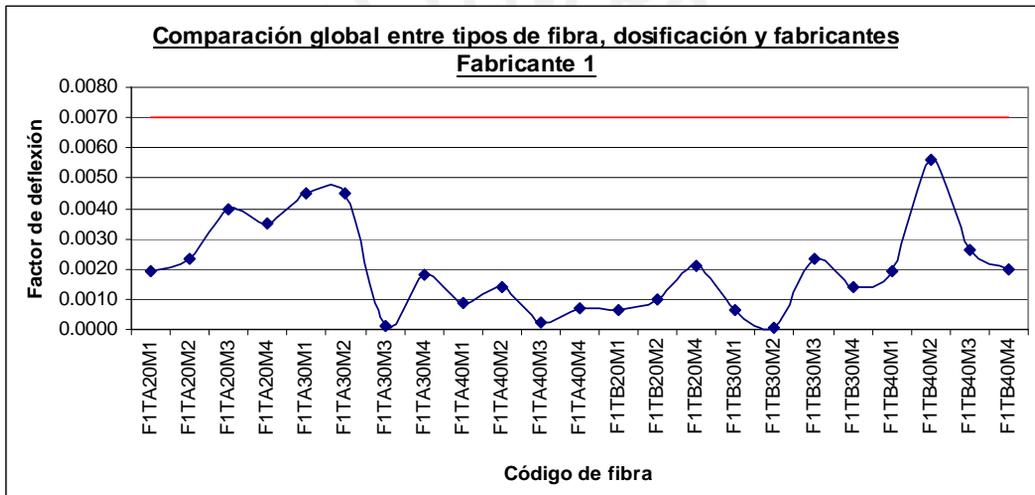


Fig. 69

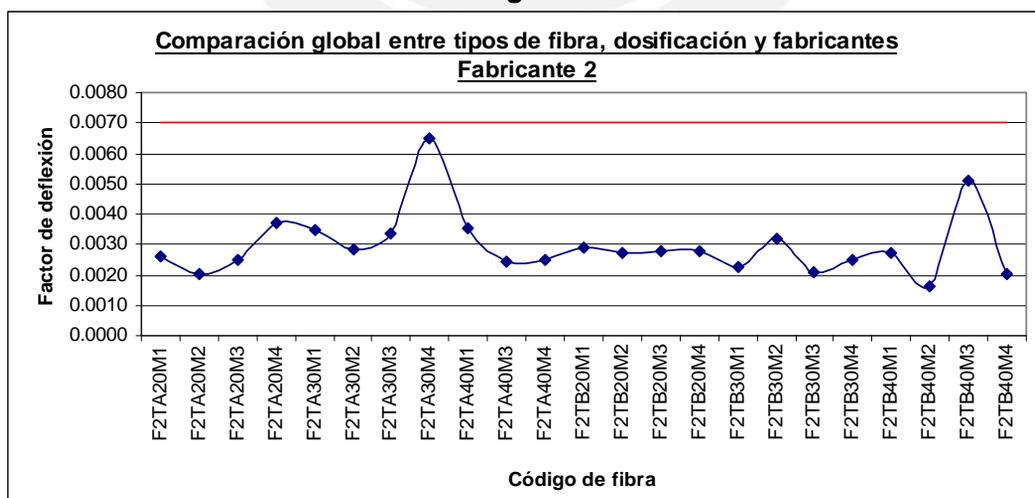


Fig. 70

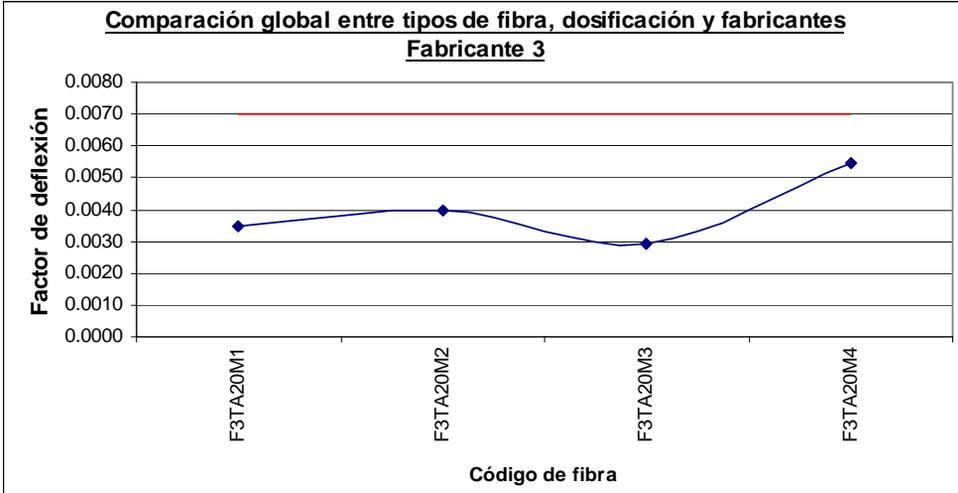


Fig. 71

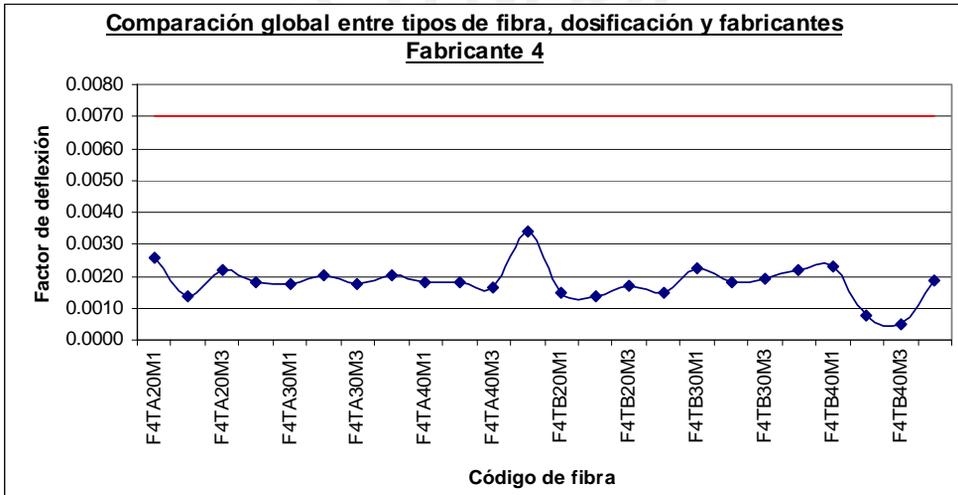


Fig. 72

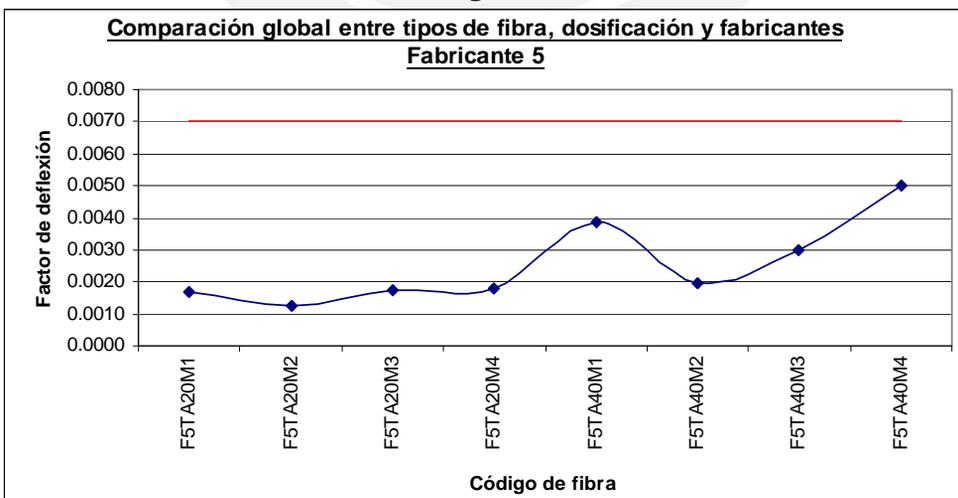


Fig. 73

Promediando los valores obtenidos para cada fabricante y tipo de fibra, se establecen los factores de carga y deflexión promedio, con los cuales se realizará la comparación característica de cada material (tabla 5.02 y Figs. 74 y 75).

TABLA 5.02

Fabricante y Tipo	Dosificación (kg/m ³)	Código	Factor Carga Promedio	Factor Deflexión Promedio
Fabricante 1 Tipo A	20	F1TA	0.1023	0.0029
	30		0.1021	0.0027
	40		0.0950	0.0008
Fabricante 1 Tipo B	20	F1TB	0.1068	0.0012
	30		0.0998	0.0011
	40		0.0902	0.0030
Fabricante 2 Tipo A	20	F2TA	0.1108	0.0027
	30		0.1146	0.0040
	40		0.0909	0.0028
Fabricante 2 Tipo B	20	F2TB	0.0881	0.0028
	30		0.0971	0.0025
	40		0.0934	0.0029
Fabricante 3 Tipo A	20	F3TA	0.1138	0.0040
Fabricante 4 Tipo A	20	F4TA	0.1147	0.0020
	30		0.0911	0.0019
	40		0.0960	0.0022
Fabricante 4 Tipo B	20	F4TB	0.0830	0.0015
	30		0.0698	0.0020
	40		0.0795	0.0014
Fabricante 5 Tipo A	20	F5TA	0.0766	0.0016
	40		0.1278	0.0035

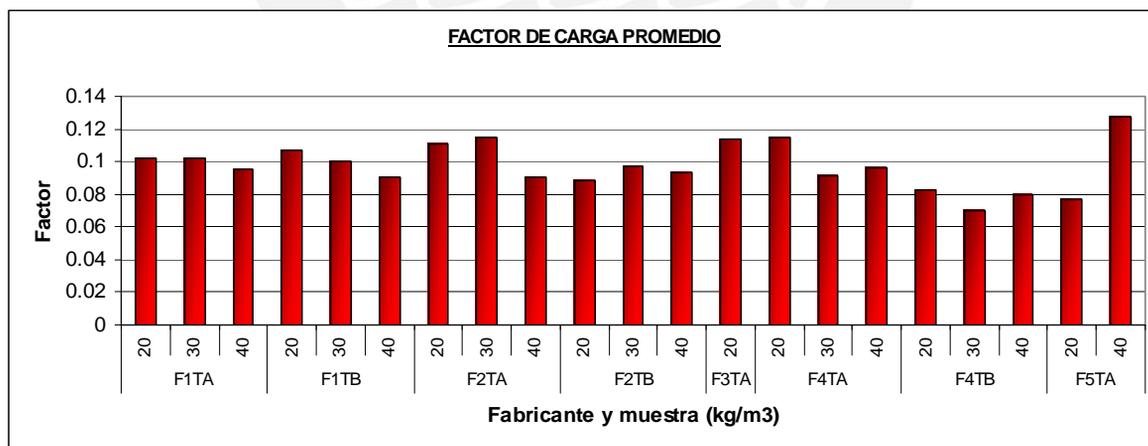


Fig. 74

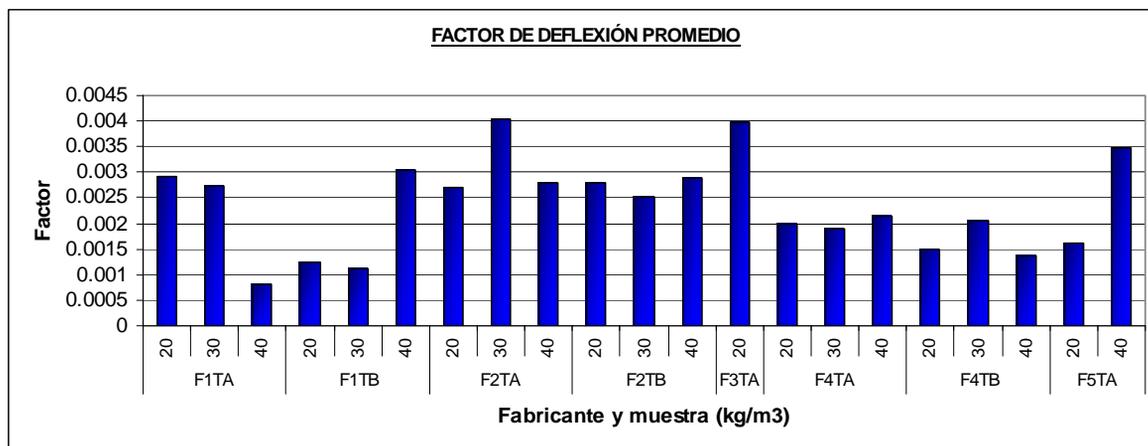


Fig. 75

Tal como se observa en los gráficos anteriores, cada material y dosificación presenta un factor característico diferente, el cual presenta variaciones incluso para el mismo tipo de fibra (entre diferentes dosis). Así mismo puede comprobarse que no existe un patrón común en estos factores que sea compartido para todos los fabricantes y tipos de fibra.

Este comportamiento aparentemente aleatorio de los factores de carga y deflexión, reafirma la hipótesis que declara que la capacidad de absorber energía del concreto reforzado con fibras metálicas no es directamente proporcional a la dosificación de fibra empleada.

5.3 Análisis de incremento de la resistencia residual vs. dosificación.

Para poder establecer un análisis del incremento del esfuerzo residual del concreto según la dosificación de fibra, debemos primero eliminar las variables propias de la elaboración de los testigos, en este caso de las vigas prismáticas. El principal factor de variación lo constituye la resistencia a compresión del concreto, la cual tiene una influencia directa en el resto de propiedades y es diferente entre testigos de una misma mezcla y con mayor razón entre mezclas de concreto diferentes.

De la misma forma que se procedió para el caso del análisis de energía absorbida, se compensa el factor resistencia ponderando el valor del esfuerzo residual promedio entre la resistencia a compresión de cada mezcla creando un “factor residual”. De esta forma es posible comparar esfuerzo residual (a través de este parámetro) de concretos con diferente resistencia.

Siguiendo este concepto, se presenta la tabla 5.03, donde se consignan los valores promedio de factor residual por dosificación, tipo de fibra y fabricante (Fig. 76).

TABLA 5.03

Fabricante y tipo de Fibra	Dosificación (kg/m ³)	Código	Resistencia residual promedio (MPa)	Factor residual
Fabricante 1 Tipo A	20	F1TA	1.34	0.0061
	30		2.81	0.0107
	40		3.26	0.0122
Fabricante 1 Tipo B	20	F1TB	1.20	0.0050
	30		1.31	0.0057
	40		1.40	0.0068
Fabricante 2 Tipo A	20	F2TA	1.17	0.0070
	30		2.41	0.0128
	40		3.18	0.0118
Fabricante 2 Tipo B	20	F2TB	2.04	0.0082
	30		2.26	0.0086
	40		3.21	0.0125
Fabricante 3 Tipo A	20	F3TA	0.91	0.0042
Fabricante 4 Tipo A	20	F4TA	0.76	0.0037
	30		1.25	0.0054
	40		0.83	0.0032
Fabricante 4 Tipo B	20	F4TB	1.14	0.0040
	30		1.98	0.0058
	40		3.03	0.0094
Fabricante 5 Tipo A	20	F5TA	1.49	0.0052
	40		2.32	0.0137

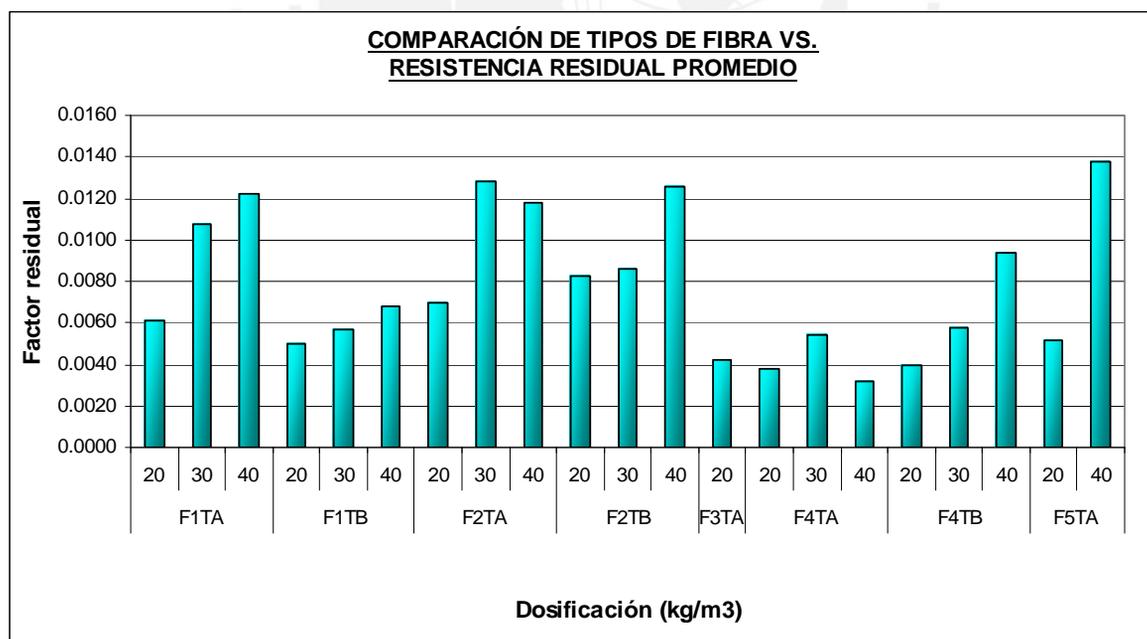


Fig. 76

Tal como se aprecia en el gráfico, el factor residual, no es proporcional a la dosificación de fibra colocada ya que en algunos casos dicho factor se incrementa conforme va incrementando la dosis de fibra, mientras que en otros se observa que el factor se

incrementa para luego disminuir. De esta manera se observa que no existe una relación directa entre el incremento de la dosis de fibra y la ganancia de esfuerzo residual, siendo esta relación proporcional solamente en algunos casos particulares.

5.4 Correlación entre la tenacidad y la resistencia residual para cada dosificación y fabricante.

De acuerdo a lo observado en el análisis de tenacidad y de la resistencia residual, capítulo 4 del presente estudio, existe una relación entre los valores de estas propiedades, obtenidas para cada tipo de dosificación y de fibra. El patrón de variación de la cantidad de energía absorbida que se aprecia entre los distintos tipos de fibra y dosificaciones es el mismo que el patrón de variación que exhibe el valor de resistencia residual para dichas fibras y dosis.

Similar a los casos anteriores, se requiere comparar los diferentes parámetros de energía absorbida y resistencia residual sin la influencia de la resistencia promedio de cada muestra. A fin de establecer una misma base, se compara en la tabla 5.04, el “factor de energía” (El cociente de la energía total absorbida entre la resistencia a compresión) con el factor residual (El cociente de la energía residual entre la resistencia en compresión).

TABLA 5.04

Fabricante y tipo de Fibra	Dosificación (kg/m ³)	Código	Factor de Energía	Factor Residual
Fabricante 1 Tipo A	20	F1TA	1.1415	0.0061
	30		1.5956	0.0107
	40		2.0031	0.0122
Fabricante 1 Tipo B	20	F1TB	1.0174	0.0050
	30		1.1237	0.0057
	40		1.2192	0.0068
Fabricante 2 Tipo A	20	F2TA	1.1850	0.0070
	30		1.7233	0.0128
	40		1.5454	0.0118
Fabricante 2 Tipo B	20	F2TB	1.2796	0.0082
	30		1.8640	0.0086
	40		1.9189	0.0125
Fabricante 3 Tipo A	20	F3TA	1.0522	0.0042
Fabricante 4 Tipo A	20	F4TA	0.6452	0.0037
	30		0.7895	0.0054
	40		0.7090	0.0032
Fabricante 4 Tipo B	20	F4TB	0.8966	0.0040
	30		0.9154	0.0058
	40		1.3516	0.0094
Fabricante 5 Tipo A	20	F5TA	1.0117	0.0052
	40		2.4737	0.0137

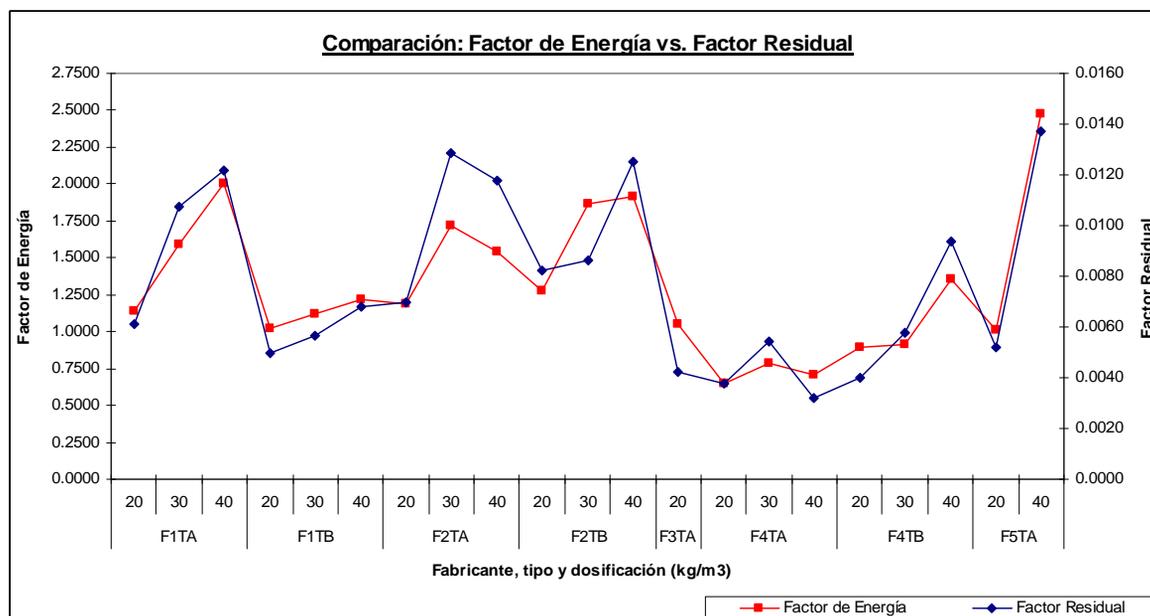


Fig. 77

La Fig. 77, muestra la correspondencia entre ambos factores, lo cual permite afirmar una proporcionalidad entre la energía total absorbida y la resistencia residual. Esta proporcionalidad es independiente de variaciones externas (como la resistencia del concreto, los parámetros de ensayo) y depende del tipo de material, es decir de la dosificación y propiedades que aporta cada tipo de fibra.

5.5 Evaluación de la eficiencia de la fibra de cada fabricante.

A pesar de que cada tipo de fibra posee características diferentes, dada su morfología y composición, se han encontrado parámetros comparables comunes a todos los tipos evaluados. Estos factores posibilitan la comparación entre las propiedades otorgando un común denominador a cada una de estas.

De acuerdo a las pruebas realizadas los factores hallados son los siguientes:

- Factor de carga
- Factor de deflexión
- Factor residual
- Factor de energía

Hallados los factores comunes a todas las fibras, se establece la de mayor valor respecto de las restantes para una determinada propiedad, o categoría. Así mismo puede darse el caso que una fibra sea la de mayor calificación en una propiedad determinada y la de menor valor en otra.

Por tanto pueden establecerse diferentes calificaciones dependiendo de las propiedades que sean consideradas como más relevantes para una función específica. Cabe señalar que el factor económico (costo de cada fibra) puede incluirse dentro de esta evaluación.

De acuerdo a lo expuesto se han seleccionado 4 categorías en función a los usos del concreto reforzado con fibras, mismos que distinguen uno o más factores sobre los demás.

Estas categorías se presentan en la tabla 5.05:

TABLA 5.05

Categoría	Principal propiedad requerida en el concreto	Factor predominante
Concreto para sostenimiento de túneles y/o taludes	Capacidad para absorber deformación	Factor de deflexión
Estructuras sometidas a impactos	Capacidad para absorber energía	Factor de energía
Concretos sometidos a abrasión superficial y desgaste (pavimentos, estructuras hidrodinámicas)	Rigidez	Factor residual
Elementos prefabricados	Incremento de resistencia	Factor de carga

Tomando las 21 combinaciones de fabricantes, tipo de fibra y dosificación, se construye la tabla de puntajes 5.06, asignando un valor a cada combinación dependiendo de su ubicación relativa en cada factor, obteniendo 21 puntos la combinación con mayor valor (y por consecuencia con mayor desarrollo en la propiedad representada), y 1 punto la de menor valor.

Para efectos de comparación se toman los siguientes códigos, establecidos en gráficos anteriores:

- Fabricante 1 Tipo A, dosis de 20 kg/m³: F1TA20
- Fabricante 1 Tipo A, dosis de 30 kg/m³: F1TA30
- Fabricante 1 Tipo A, dosis de 40 kg/m³: F1TA40
- Fabricante 1 Tipo B, dosis de 20 kg/m³: F1TB20
- Fabricante 1 Tipo B, dosis de 30 kg/m³: F1TB30
- Fabricante 1 Tipo B, dosis de 40 kg/m³: F1TB40
- Fabricante 2 Tipo A, dosis de 20 kg/m³: F2TA20
- Fabricante 2 Tipo A, dosis de 30 kg/m³: F2TA30
- Fabricante 2 Tipo A, dosis de 40 kg/m³: F2TA40
- Fabricante 2 Tipo B, dosis de 20 kg/m³: F2TB20
- Fabricante 2 Tipo B, dosis de 30 kg/m³: F2TB30

Fabricante 2 Tipo B, dosis de 40 kg/m³: F2TB40
 Fabricante 3 Tipo A, dosis de 20 kg/m³: F3TA20
 Fabricante 4 Tipo A, dosis de 20 kg/m³: F4TA20
 Fabricante 4 Tipo A, dosis de 30 kg/m³: F4TA30
 Fabricante 4 Tipo A, dosis de 40 kg/m³: F4TA40
 Fabricante 4 Tipo B, dosis de 20 kg/m³: F4TB20
 Fabricante 4 Tipo B, dosis de 30 kg/m³: F4TB30
 Fabricante 4 Tipo B, dosis de 40 kg/m³: F4TB40
 Fabricante 5 Tipo A, dosis de 20 kg/m³: F5TA20
 Fabricante 5 Tipo A, dosis de 40 kg/m³: F5TA40

TABLA 5.06

Puntaje alcanzado en base al desempeño.	Factores Experimentales			
	Factor de Energía	Factor Residual	Factor Carga Max./Resistencia Promedio	Factor Deflexión/Resistencia Promedio
21	F5TA40	F5TA40	F5TA40	F2TA30
20	F1TA40	F2TA30	F4TA20	F3TA20
19	F2TB40	F2TB40	F2TA30	F5TA40
18	F2TB30	F1TA40	F3TA20	F1TB40
17	F2TA30	F2TA40	F2TA20	F1TA20
16	F1TA30	F1TA30	F1TB20	F2TB40
15	F2TA40	F4TB40	F1TA20	F2TB20
14	F4TB40	F2TB30	F1TA30	F2TA40
13	F2TB20	F2TB20	F1TB30	F1TA30
12	F1TB40	F2TA20	F2TB30	F2TA20
11	F2TA20	F1TB40	F4TA40	F2TB30
10	F1TA20	F1TA20	F1TA40	F4TA40
9	F1TB30	F4TB30	F2TB40	F4TB30
8	F3TA20	F1TB30	F4TA30	F4TA20
7	F1TB20	F4TA30	F2TA40	F4TA30
6	F5TA20	F5TA20	F1TB40	F5TA20
5	F4TB30	F1TB20	F2TB20	F4TB20
4	F4TB20	F3TA20	F4TB20	F4TB40
3	F4TA30	F4TB20	F4TB40	F1TB20
2	F4TA40	F4TA20	F5TA20	F1TB30
1	F4TA20	F4TA40	F4TB30	F1TA40

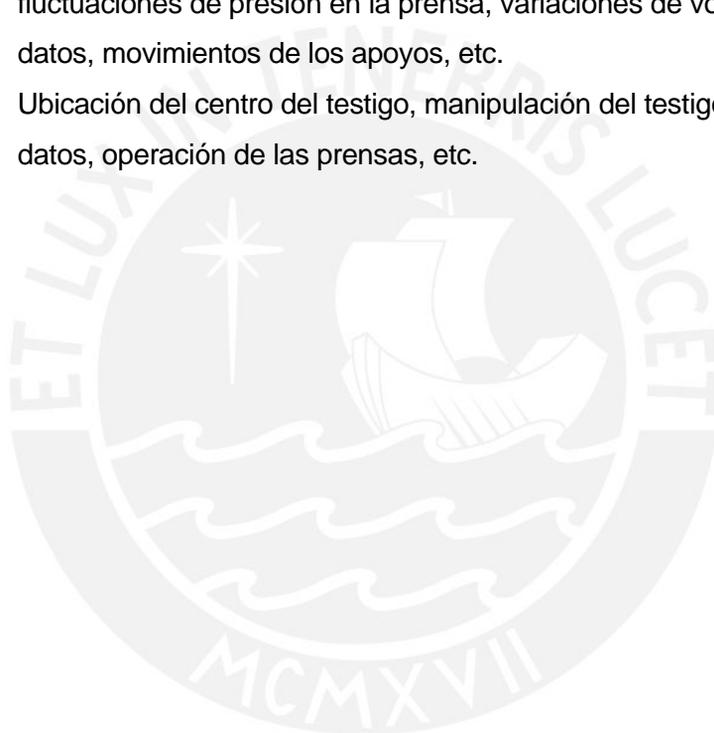
5.6 Variación entre datos registrados para cada fabricante. Precisión de los datos experimentales y confiabilidad.

Los datos experimentales están sujetos a las variables inherentes a los ensayos. Estas fuentes de dispersión principalmente son:

Fuente material: Homogeneidad del concreto, distribución de la fibra al interior del testigo, variaciones en los agregados, variaciones de la morfología de la fibra, dosificación de la mezcla de concreto, etc.

Fuente equipo: Deflexiones del dispositivo de ensayo, imprecisión del LVDT, fluctuaciones de presión en la prensa, variaciones de voltaje, registro de datos, movimientos de los apoyos, etc.

Fuente operador: Ubicación del centro del testigo, manipulación del testigo, registro de datos, operación de las prensas, etc.



CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE COSTO – BENEFICIO

6.1 Valorización de las propiedades aportadas por las fibras de cada fabricante.

Los parámetros técnicos a considerarse dentro de una evaluación de desempeño para la elección de un determinado material, según la propiedad requerida, deben incluir un análisis del costo de este, ya que constituye un condicionante tanto para la factibilidad de su elaboración como para la elección sobre otros materiales.

Conforme a este nuevo criterio se evalúa el desempeño económico de las fibras analizadas combinando el desempeño técnico hallado en el capítulo anterior, con los costos por dosis de cada fibra.

La tabla 6.01 muestra los precios de las fibras disponibles en el mercado y sus costos por dosificación:

TABLA 6.01

Origen	P.U. (\$/kg)
Fabricante 1 (Tipo A)	1.40
Fabricante 1 (Tipo B)	1.45
Fabricante 2 (Tipo A)	1.41
Fabricante 2 (Tipo B)	1.38
Fabricante 3 (Tipo A)	1.52
Fabricante 4 (Tipo A)	1.72
Fabricante 4 (Tipo B)	1.63
Fabricante 5 (Tipo A)	1.97

Considerando los costos mostrados en la tabla anterior, se elabora para cada propiedad base (con su respectivo factor) una curva de costo, considerando el desempeño y el costo. De esta forma se podrá seleccionar la fibra y dosificación más eficiente desde el punto de vista técnico y económico.

Con el objetivo de establecer una misma base de calificación, se asigna un puntaje en base a los precios de cada combinación de fibra (tipo y dosificación) obteniendo 21 puntos la combinación más barata y 1 punto la más cara.

6.1.1 Capacidad para absorber deformación (factor de deflexión):

TABLA 6.02

Tipo de fibra y dosis	Puntaje por criterio técnico	Puntaje por criterio económico
F1TA20	17	20
F1TA30	13	12
F1TA40	1	6
F1TB20	3	18
F1TB30	2	10
F1TB40	18	4
F2TA20	12	19
F2TA30	21	11
F2TA40	14	5
F2TB20	15	21
F2TB30	11	13
F2TB40	16	7
F3TA20	20	17
F4TA20	8	15
F4TA30	7	8
F4TA40	10	2
F4TB20	5	16
F4TB30	9	9
F4TB40	4	3
F5TA20	6	14
F5TA40	19	1

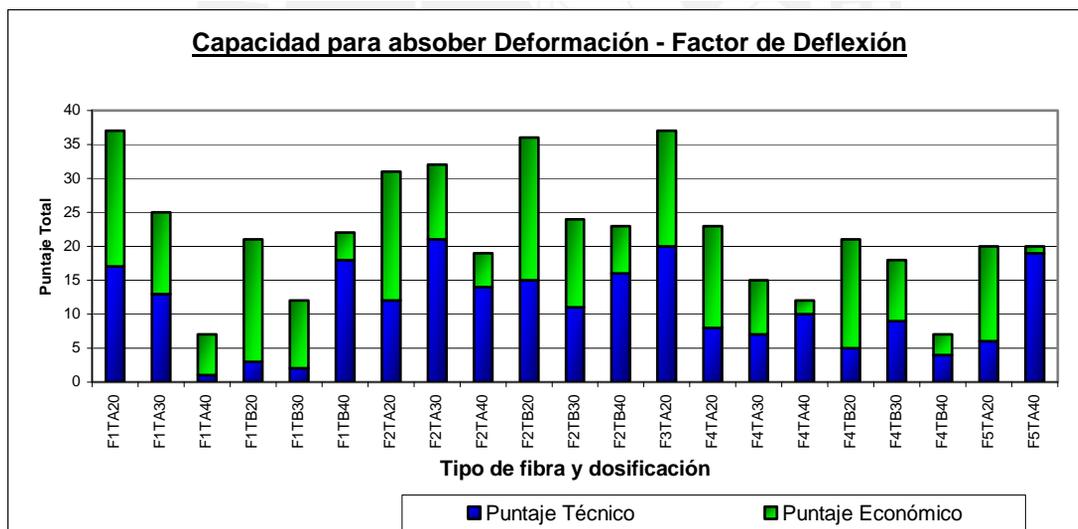


Fig. 78

Tal como se observa en la gráfica las combinaciones F1TA20 (Fabricante 1 tipo A dosis de 20 kg/m³) y F3TA20 (Fabricante 3 tipo A dosis de 20 kg/m³) son las más eficientes considerando los puntajes establecidos para los criterios técnico y económico del desempeño de cada fibra y dosificación según su respectiva capacidad para absorber deformaciones.

Así mismo la gráfica (Fig. 78) permite seleccionar las combinaciones con los puntajes técnico y/o económico según sean requeridos.

6.1.2 Capacidad para absorber energía (factor de energía):

TABLA 6.03

Tipo de fibra y dosis	Puntaje por criterio técnico	Puntaje por criterio económico
F1TA20	10	20
F1TA30	16	12
F1TA40	20	6
F1TB20	7	18
F1TB30	9	10
F1TB40	12	4
F2TA20	11	19
F2TA30	17	11
F2TA40	15	5
F2TB20	13	21
F2TB30	18	13
F2TB40	19	7
F3TA20	8	17
F4TA20	1	15
F4TA30	3	8
F4TA40	2	2
F4TB20	4	16
F4TB30	5	9
F4TB40	14	3
F5TA20	6	14
F5TA40	21	1

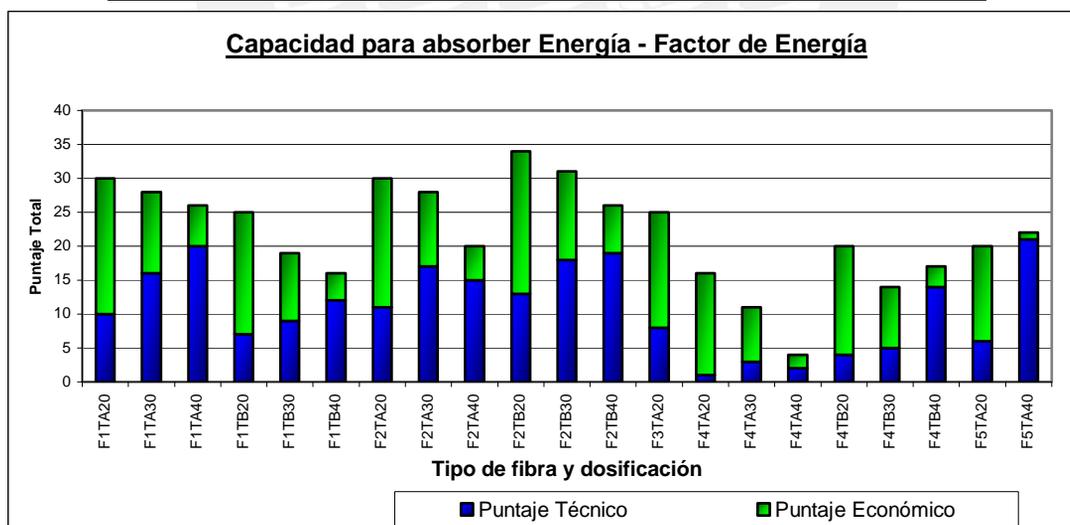


Fig. 79

Tal como se observa en la gráfica (Fig. 79) la combinación F2TB20 (Fabricante 2 tipo B dosis de 20 kg/m³) es la más eficiente considerando los puntajes establecidos para los criterios técnico y económico del desempeño de cada fibra y dosificación según su respectiva capacidad para absorber energía.

Así mismo la gráfica permite seleccionar las combinaciones con los puntajes técnico y/o económico según sean requeridos.

6.1.3 Rigidez (factor residual):

TABLA 6.04

Tipo de fibra y dosis	Puntaje por criterio técnico	Puntaje por criterio económico
F1TA20	10	20
F1TA30	16	12
F1TA40	18	6
F1TB20	5	18
F1TB30	8	10
F1TB40	11	4
F2TA20	12	19
F2TA30	20	11
F2TA40	17	5
F2TB20	13	21
F2TB30	14	13
F2TB40	19	7
F3TA20	4	17
F4TA20	2	15
F4TA30	7	8
F4TA40	1	2
F4TB20	3	16
F4TB30	9	9
F4TB40	15	3
F5TA20	6	14
F5TA40	21	1

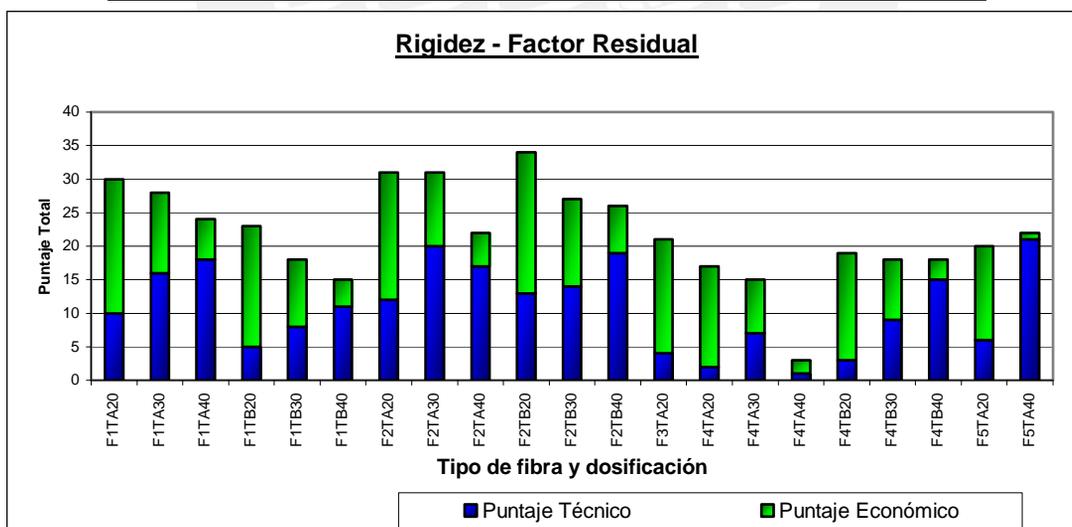


Fig. 80

Tal como se observa en la gráfica (Fig. 80) la combinación F2TB20 (Fabricante 2 tipo B dosis de 20 kg/m³) es la más eficiente considerando los puntajes establecidos para los criterios técnico y económico del desempeño de cada fibra y dosificación según su respectiva capacidad de rigidez.

Así mismo la gráfica permite seleccionar las combinaciones con los puntajes técnico y/o económico según sean requeridos.

6.1.4 Incremento de resistencia (factor de carga):

TABLA 6.05

Tipo de fibra y dosis	Puntaje por criterio técnico	Puntaje por criterio económico
F1TA20	15	20
F1TA30	14	12
F1TA40	10	6
F1TB20	16	18
F1TB30	13	10
F1TB40	6	4
F2TA20	17	19
F2TA30	19	11
F2TA40	7	5
F2TB20	5	21
F2TB30	12	13
F2TB40	9	7
F3TA20	18	17
F4TA20	20	15
F4TA30	8	8
F4TA40	11	2
F4TB20	4	16
F4TB30	1	9
F4TB40	3	3
F5TA20	2	14
F5TA40	21	1

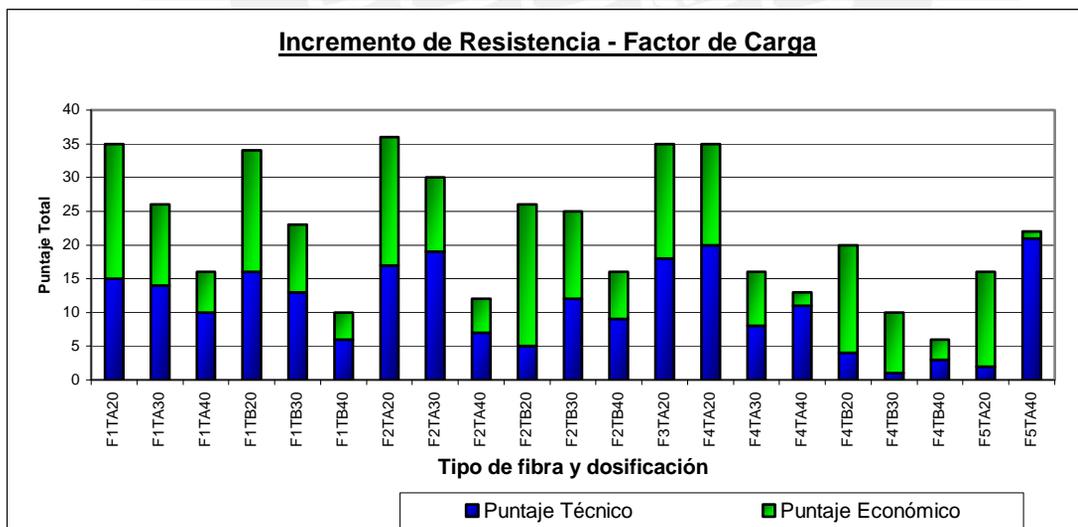


Fig. 81

Tal como se observa en la gráfica (Fig. 81) la combinación F2TA20 (Fabricante 2 tipo A dosis de 20 kg/m³) es la más eficiente considerando los puntajes establecidos para los criterios técnico y económico del desempeño de cada fibra y dosificación según su respectiva capacidad para incrementar la resistencia del concreto.

Así mismo la gráfica permite seleccionar las combinaciones con los puntajes técnico y/o económico según sean requeridos.

Los gráficos mostrados establecen la escala de clasificación en base a la combinación de los criterios técnico y económico para cada propiedad analizada. Estas escalas permiten seleccionar combinaciones de fibra, dando mayor importancia a uno u otro criterio, sea que prevalezca el criterio técnico o económico sobre su respectiva contraparte.

6.2 Comparación económica entre fabricantes en base a la eficiencia de cada fibra.

En los acápites anteriores se han establecido escalas comparativas para las combinaciones de fibra teniendo como punto de referencia las cuatro propiedades basadas en las aplicaciones del material en estudio.

Cada tipo de fibra tiene un costo en el mercado dependiendo de su origen (fabricante), por lo tanto las comparaciones a realizar deben considerar el desempeño técnico y al mismo tiempo su costo.

Para hacer posible esta comparación se crea el parámetro “Costo por unidad factorial” el cual consiste en dividir el factor que representa a cada propiedad (factor de deflexión, factor de energía, factor residual y factor de carga) entre el costo asociado a cada combinación. De esta forma se valorizan los factores obtenidos por combinación transformando la comparación en lineal.

Las siguientes gráficas (Figs. 82 a 85) comparan los tipos de fibra analizados desde el punto de vista económico empleando el parámetro anteriormente descrito.

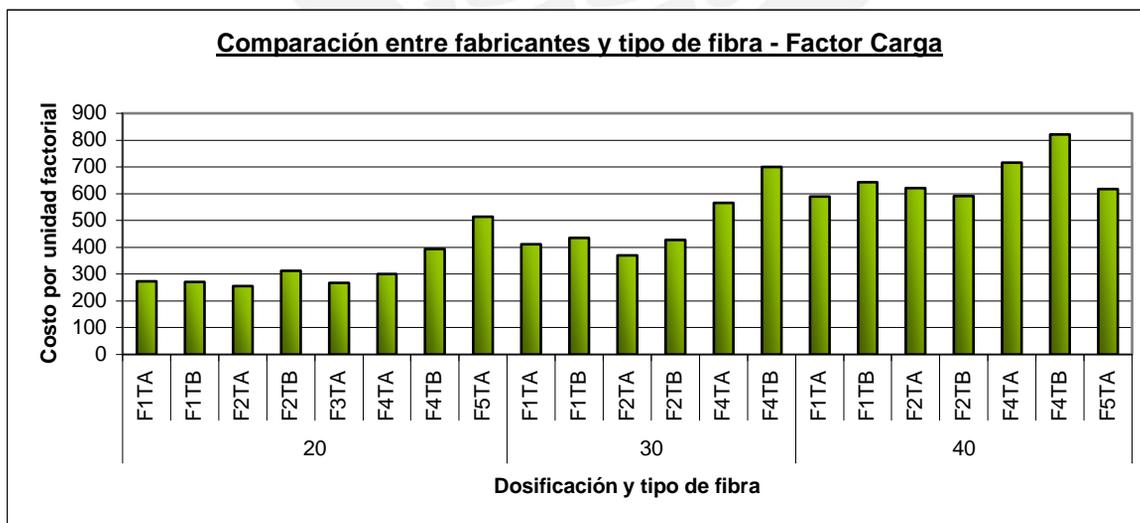


Fig. 82

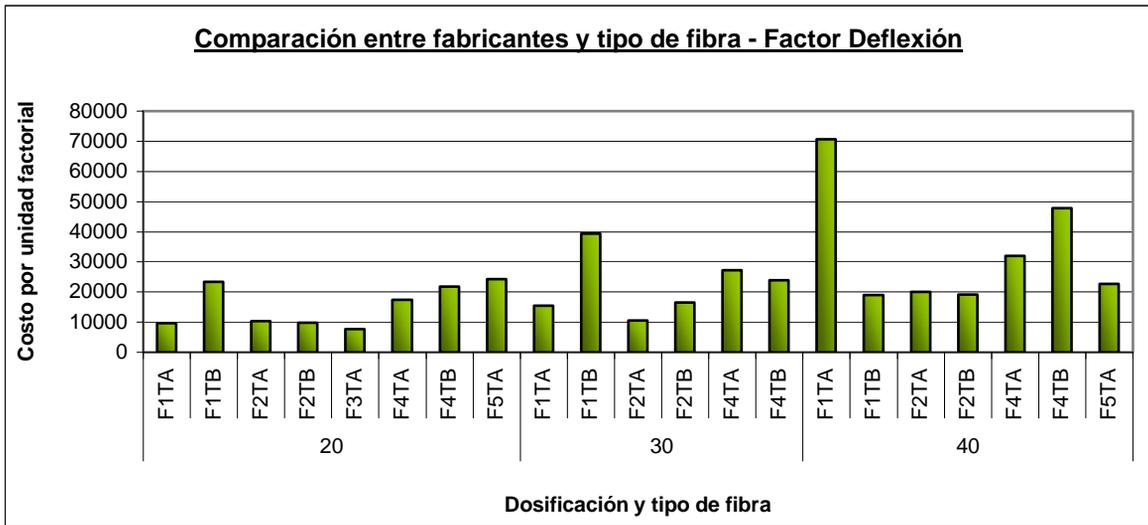


Fig. 83

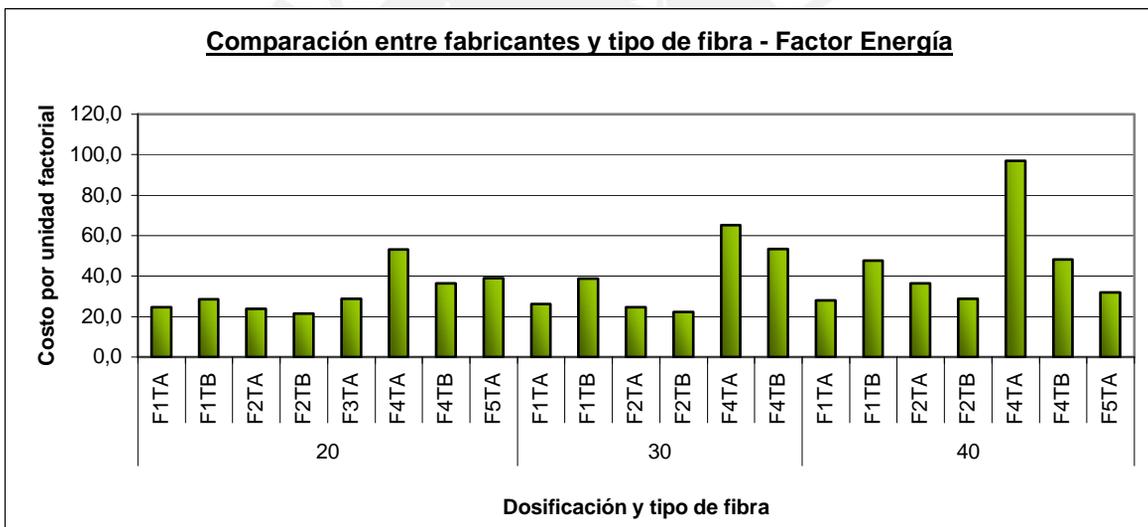


Fig. 84

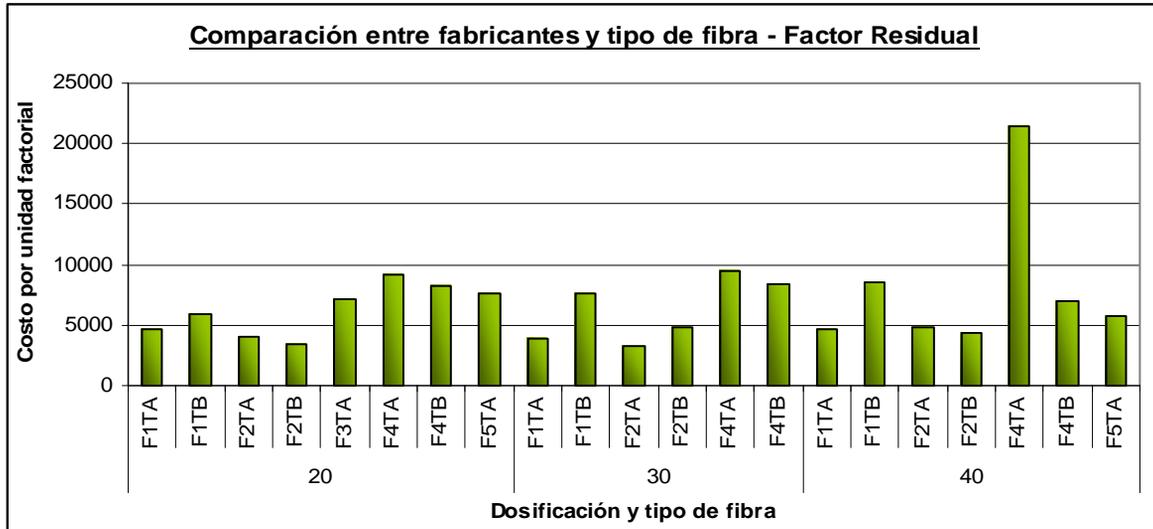


Fig. 85

Tal como se aprecia en las gráficas, la fibra tipo A del fabricante 4 en dosis de 40 kg/m³, es la que presenta el mejor rendimiento desde el punto de vista económico para las propiedades de incremento de carga, capacidad para absorber energía y rigidez. Para el caso de la capacidad para absorber deflexiones, el mejor rendimiento lo presenta la fibra tipo A del fabricante 1 en dosis de 40 kg/m³.

Esta comparación de rendimiento económico compara el rendimiento de cada fabricante y tipo de fibra, paralelamente al desempeño técnico de cada material, es decir, cuantifica el incremento en la energía por unidad monetaria que presenta cada combinación, por mencionar uno de los cuatro parámetros. Si bien es cierto esta comparación es puramente académica, dado que el material con el mejor rendimiento económico no necesariamente será el que observe la mayor eficiencia (según los puntajes técnico y económico descritos anteriormente), permite comparar la potencialidad del desempeño de las combinaciones, para lo cual pueden investigarse otras aplicaciones.

6.3 Consideraciones adicionales en base a disponibilidad para usos en el Perú.

Actualmente se encuentran disponibles en el mercado las fibras tipo A y B de los fabricantes 1 y 2, en tanto que las restantes corresponden a prototipos de prueba elaborados por cada fabricante como alternativas a los productos del mercado y son producidas bajo pedido.

En el Perú se fabrican las fibras A y B de los fabricantes 1 y 2 mientras que los demás tipos de fibra son importados y se encuentran sujetos a pedidos grandes (por lotes).

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones

De acuerdo a lo desarrollado en los capítulos anteriores y en base a los objetivos planteados al inicio del estudio se presentan las siguientes conclusiones.

- El diseño, construcción y calibración del dispositivo de ensayo elaborado para el presente estudio se realizó empleando materiales de fácil acceso (encofrados metálicos) y equipos electrónicos relativamente simples y de bajo costo, lo cual pone al alcance de cualquier laboratorio la fabricación de estos dispositivos.

Si bien es cierto que estos dispositivos no tendrán exactamente las medidas y dimensiones que se especifican la mencionada norma, si permiten evaluar los especímenes de concreto bajo los conceptos y con la coherencia de resultados que esta exige. Tal como se ha demostrado en los capítulos anteriores, los resultados reflejan con precisión lo esperado por la norma ASTM C 1550 y son similares a los resultados obtenidos con dispositivos diseñados por otros laboratorios (laboratorio de estructuras de la Pontificia Universidad Católica y laboratorio de estructuras de la Universidad Nacional de Ingeniería).

El cumplimiento de las condiciones anteriores (repetitividad y factibilidad para la comparación), sirve de sustento para validar los resultados obtenidos, cumpliendo el objetivo del dispositivo (DEPC) y completando la sustentación para su diseño y construcción.

- Los datos obtenidos por el dispositivo (DEPC) permiten graficar el esfuerzo vs. la deformación simultáneamente en cada uno de los ensayos realizados, caracterizando las muestras analizadas. Así mismo se describe la historia de absorción de energía del shotcrete a medida que progresa la deformación, permitiendo calificar cada muestra según su desempeño.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de vigas prismáticas, se concluye que no existe un patrón lineal común a todos los fabricantes y tipos de fibras. En lugar de esto se observa una variación aleatoria en el comportamiento de las fibras dependiente del tipo y fabricante de las mismas.

- Conforme a los datos experimentales en algunos casos a medida que se incrementa la cantidad de fibra en el shotcrete, la resistencia residual alcanza un valor máximo y al continuar el incremento de fibra esta disminuye, mientras que en los restantes el incremento de la resistencia residual máxima aumenta linealmente con el incremento de la dosis de fibra. Este comportamiento se presenta de la misma forma en los resultados de energía absorbida por las muestras de shotcrete ensayadas con los paneles circulares.

Estas observaciones permiten concluir que no existe un comportamiento lineal aplicable a todos los tipos de fibras metálicas incluidas en este estudio, sino por el contrario que cada tipo define un comportamiento característico en función de la dosis de fibra, en algunos casos se tendrán tendencias lineales en tanto que en otros dichas tendencias serán incluso parabólicas.

- Existe una proporcionalidad directa entre la capacidad de absorción de energía aportada por un tipo y dosis de fibra en el shotcrete y la cantidad de resistencia residual que podrá esperarse de dicho material. Esta correspondencia se encuentra demostrada en la correlación experimental ilustrada en el acápite 5.4 del capítulo 5 del presente estudio.
- A fin de poder comparar las distintas propiedades inherentes a cada mezcla (dosis y tipo de fibra) analizada, es necesario descartar las variables que establecen diferencias ajenas a dichas propiedades, siendo la principal de ellas la resistencia a la compresión de cada mezcla de concreto. Tal como se ha demostrado en el presente estudio, tal descarte es posible trabajando los valores obtenidos por cada propiedad como factor ponderado entre la resistencia en compresión obtenida para cada muestra, siendo este procedimiento corroborado por los resultados de este análisis. Por tanto se concluye que los factores de carga, deflexión, energía y residual obtenidos para cada combinación constituyen criterios válidos para la comparación, bajo iguales condiciones, de todas las muestras analizadas.
- Obtenidos los parámetros comparativos, es posible evaluar el desempeño de las fibras asignando un puntaje a cada combinación según el lugar que esta ocupe respecto de las restantes en función al valor logrado en cada parámetro.

- Tal como se describe en el capítulo 5, acápite 5.5, se caracterizó 4 aplicaciones prácticas del shotcrete con un parámetro característico predominante para dicha aplicación en función a lo cual se concluyó, desde el punto de vista técnico, que las mejores combinaciones son las siguientes:
 - Concreto para sostenimiento de túneles y/o taludes = Fibra tipo A, en dosis de 30 kg/m³ del fabricante 2.
 - Estructuras sometidas a impactos = Fibra tipo A, en dosis de 40 kg/m³ del fabricante 5.
 - Concretos sometidos a abrasión superficial y desgaste (pavimentos, estructuras hidrodinámicas) = Fibra tipo A, en dosis de 40 kg/m³ del fabricante 5.
 - Elementos prefabricados = Fibra tipo A, en dosis de 40 kg/m³ del fabricante 5.
- Dado que el trabajo en construcción con cualquier tipo de material implica no solo una evaluación técnica sino también económica se estableció, al igual que la conclusión anterior, parámetros comparativos en función al precio de cada combinación analizada.

Esto nos permite concluir que la combinación de mayor costo corresponde a la fibra tipo A, en dosis de 40 kg/m³ del fabricante 5, en tanto que la más barata corresponderá a la fibra tipo B, en dosis de 20 kg/m³ del fabricante 2.
- En base al análisis realizado en el capítulo 6, se concluye que el parámetro global que evalúa el desempeño de cada combinación analizada corresponde a la suma de los puntajes técnicos y económicos establecidos en el acápite 6.1 del capítulo 6. Las gráficas elaboradas con estos valores permiten no solo encontrar la combinación más eficiente según estos dos criterios sino también seleccionar la alternativa que satisfaga diferentes necesidades establecidas por el evaluador de acuerdo al peso que otorgue a cada criterio (mayor importancia al criterio técnico o económico).
- Tomando como igual la importancia de ambos criterios las combinaciones más eficientes son las siguientes:
 - Concreto para sostenimiento de túneles y/o taludes = Fibra tipo A, en dosis de 20 kg/m³ del fabricante 1 y la fibra tipo A, en dosis de 20 kg/m³ del fabricante 3.
 - Estructuras sometidas a impactos = Fibra tipo B, en dosis de 20 kg/m³ del fabricante 2.

- Concretos sometidos a abrasión superficial y desgaste (pavimentos, estructuras hidrodinámicas) = Fibra tipo B, en dosis de 20 kg/m^3 del fabricante 2.
- Elementos prefabricados = Fibra tipo A, en dosis de 20 kg/m^3 del fabricante 2.

7.2 Recomendaciones.

En conformidad a lo concluido por el presente estudio se plantean las siguientes recomendaciones para los profesionales que trabajen con este tipo de materiales con el fin de que puedan realizar la mejor elección en base las necesidades de cada proyecto.

- Al inicio de cada proyecto en los que se considera el uso de concreto lanzado (shotcrete) se recomienda definir los requisitos de servicio de la estructura a construir. Estos requisitos permitirán al constructor evaluar diferentes alternativas de shotcrete con fibras metálicas y seleccionar la mejor opción.
- Antes de seleccionar un determinado tipo de fibra y fabricante, se recomienda analizar el desempeño de varias alternativas con las tablas y coeficientes analizados, a fin de escoger la mejor opción. Esto permitirá al constructor contar con sustento técnico que fundamente su decisión frente a su supervisión y/o propietario del proyecto. Así mismo los parámetros hallados permiten que el constructor seleccione la alternativa que satisfaga las necesidades del proyecto en función de su propia definición de “óptimo” de acuerdo al peso que tengan los criterios técnico y económico en su ecuación de evaluación.
- Antes de aceptar como válidos los resultados de los ensayos tanto de paneles circulares como de vigas prismáticas, se recomienda verificar su correspondencia con lo esperado como resultados por las normas marco de estos ensayos así como la similitud de estos datos experimentales con lo obtenido por otros laboratorios sobre muestras similares. Si los resultados obtenidos no cumplen con lo anterior, deben replantearse los ensayos ya que el análisis posterior descansa sobre los valores experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

Sándor Popovics, 1997. "Strength and Related Propieties of Concrete a Quantitative Approach" – Ed: John Wiley & Sons, Inc.

Gianfranco Ottazzi Pasino, 2006. "Diseño en Concreto Armado" – Ed: ACI Perú.

Wikipedia, the free encyclopedia, 2008. "Shotcrete" – publicación electrónica:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Shotcrete>.

Enrique Pasquel Carbajal, 1997. "Tópicos de Tecnología del Concreto" – Ed: ACI Perú.

"Guide to Shotcrete ACI 506R-05" – Comité del ACI 506, ACI internacional.

"Committee Report on Fiber Reinforced Shotcrete ACI 506.1R-98" – Comité del ACI 506.1R, ACI internacional.

"Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading C 78 - 08" - ASTM Internacional.

"Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel C 1550 - 05" - ASTM Internacional.

Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strenght of Fiber-Reinforced Concrete C 1399 - 07" - ASTM Internacional.

"Shotcrete Reforzado con fibras" – Campos Martinez Fernando, Aldave Villaorduña Alan, Universidad Nacional de Ingenieria del Peru (UNI) – Publicación técnica ACI Perú.

"Shotcrete, Características y Consideraciones de su uso en la mina Cobriza – Doe Run Perú S.R.L." – Chirinos Bueno Fausto Jusselino, Gomez Salinas, Jesús Roland – Publicación técnica ACI Perú.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Kg/cm ² :	Kilogramos por centímetro cuadrado.
MPa:	Mega pascal.
mm:	Milímetros.
N:	Newtons
KN:	Kilo newtons
Kg:	Kilogramo.
f'c:	Resistencia característica.
6"x12":	Seis pulgadas por doce pulgadas.
Bar (bares):	Medida de presión. Equivalencia: 1 bar = 1.0198 kg/cm ² .
Voltios:	Unidad de flujo eléctrico.
Hertz:	Unidad de frecuencia eléctrica.
Joules:	Unidad de energía
P.U.:	Peso unitario (peso entre volumen)
\$:	Dólares norteamericanos