

2ª JORNADA DE AVANCES EN DISEÑO Y TECNOLOGIA DEL HORMIGÓN

Hormigón reforzado con fibras: la experiencia brasileña



Prof. Antonio Figueiredo

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo



Introducción: historia

- El uso de hormigón reforzado con fibras en Brasil empezó en los años 70.
- Pero no empezó muy bien...

- Presa de Itaipu



Historia del HRF

- Desarrollo más importante: en los principios de los años 90.



www.parquedoibirapuera.com



Proyecto USP-IPT-CBPO

Historia del HRF

- Primeras aplicaciones importantes

Construcción de
la presa de Itá
(Rio Uruguay)



Proyecto USP-IPT-CBPO

Revestimiento de túneles y taludes con hormigón proyectado reforzado con fibras



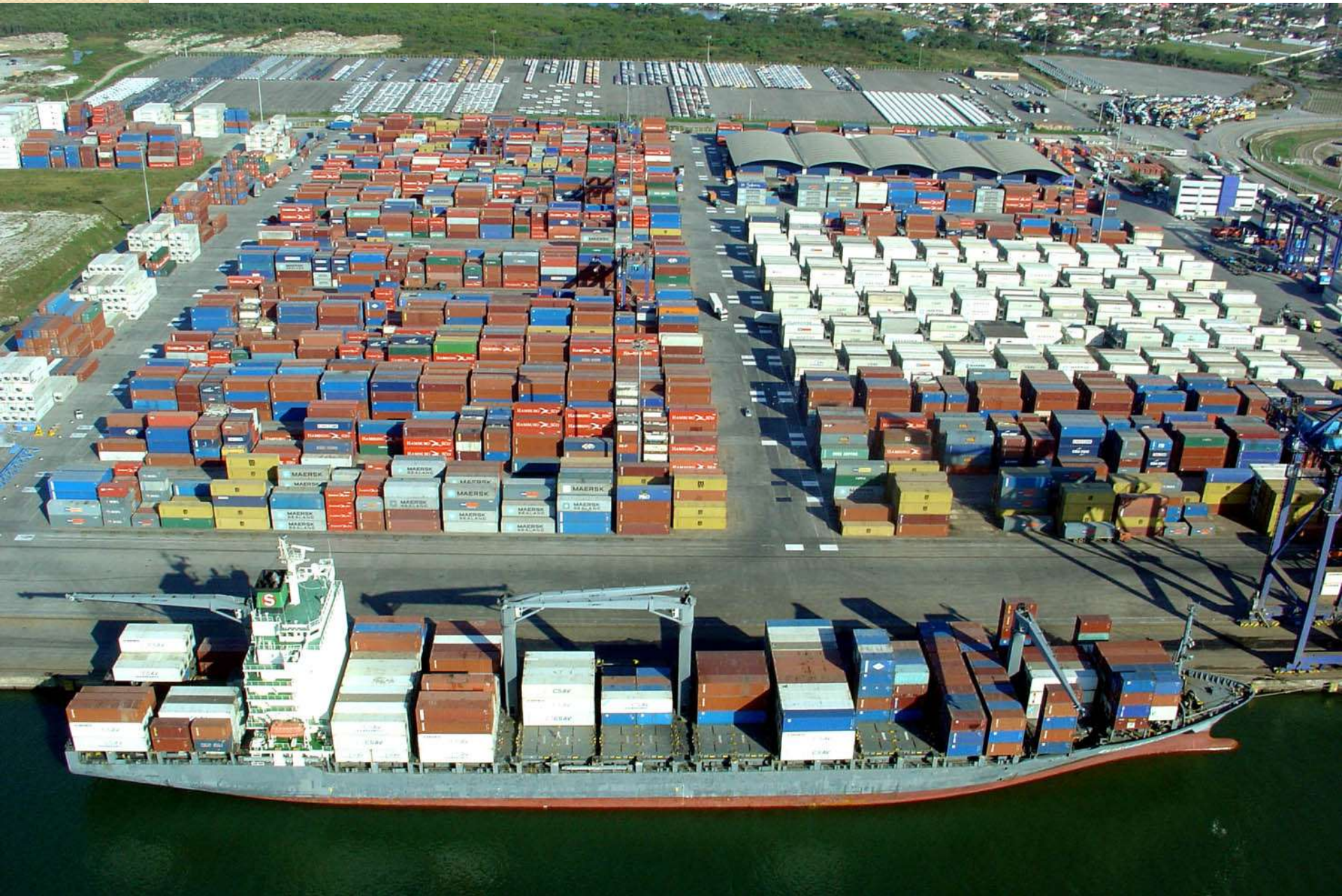
Construcción de
la presa de Irapé

Pavimentos



Proyecto USP-Maccaferrri

Porto de Paranaguá, PR.



Tubos de Hormigón



Proyecto USP-SABESP-Dramix

Dovelas para TBM

Projecto USP-Consórcio Linha 4
Projecto UNICAMP-Consórcio Linha 4



Soportes flotantes Puerto de Santos



Proyecto USP-EGT

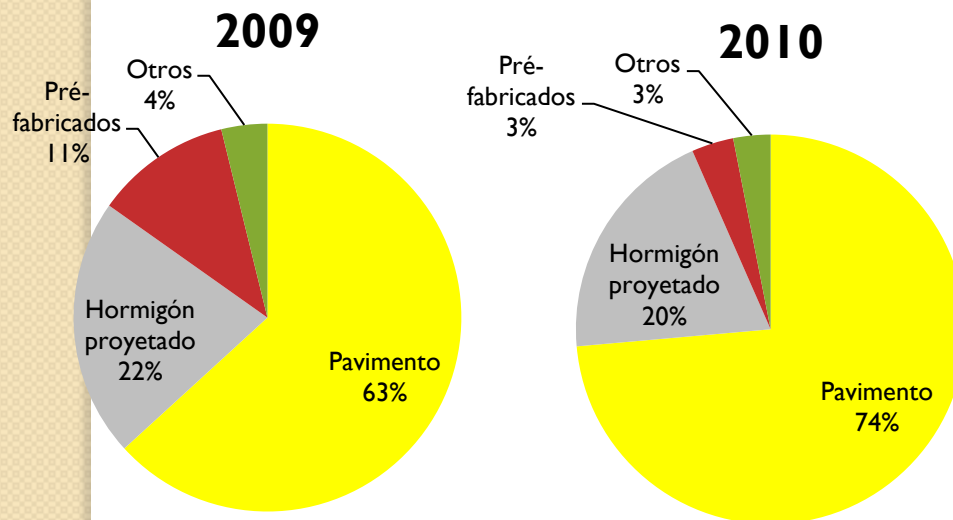
Contexto actual

- La tecnología de uso de las hormigón reforzado con fibras en Brasil aún tiene mucho que desarrollar.
- Actualmente procura sacar provecho de otras experiencias internacionales e ajustar en la normativa actual y futura:
- *Comitê Técnico CT303 IBRACON/ABECE: publicación futura de prácticas recomendadas*
- Importante: tener en cuenta las características y limitaciones locales.

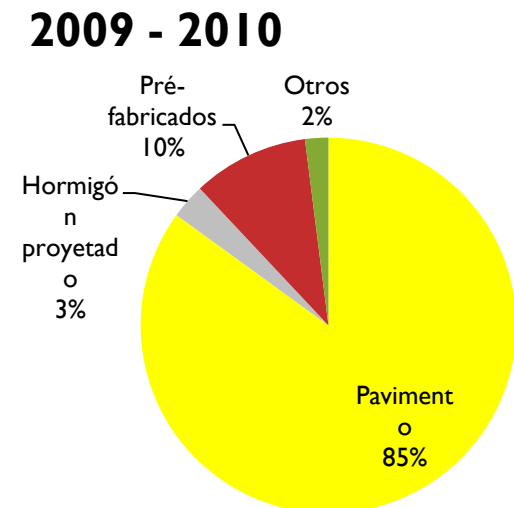
Contexto actual

- Aplicaciones más frecuentes:
 - ✓ Pavimentos
 - ✓ Túneles
 - ✓ Prefabricados

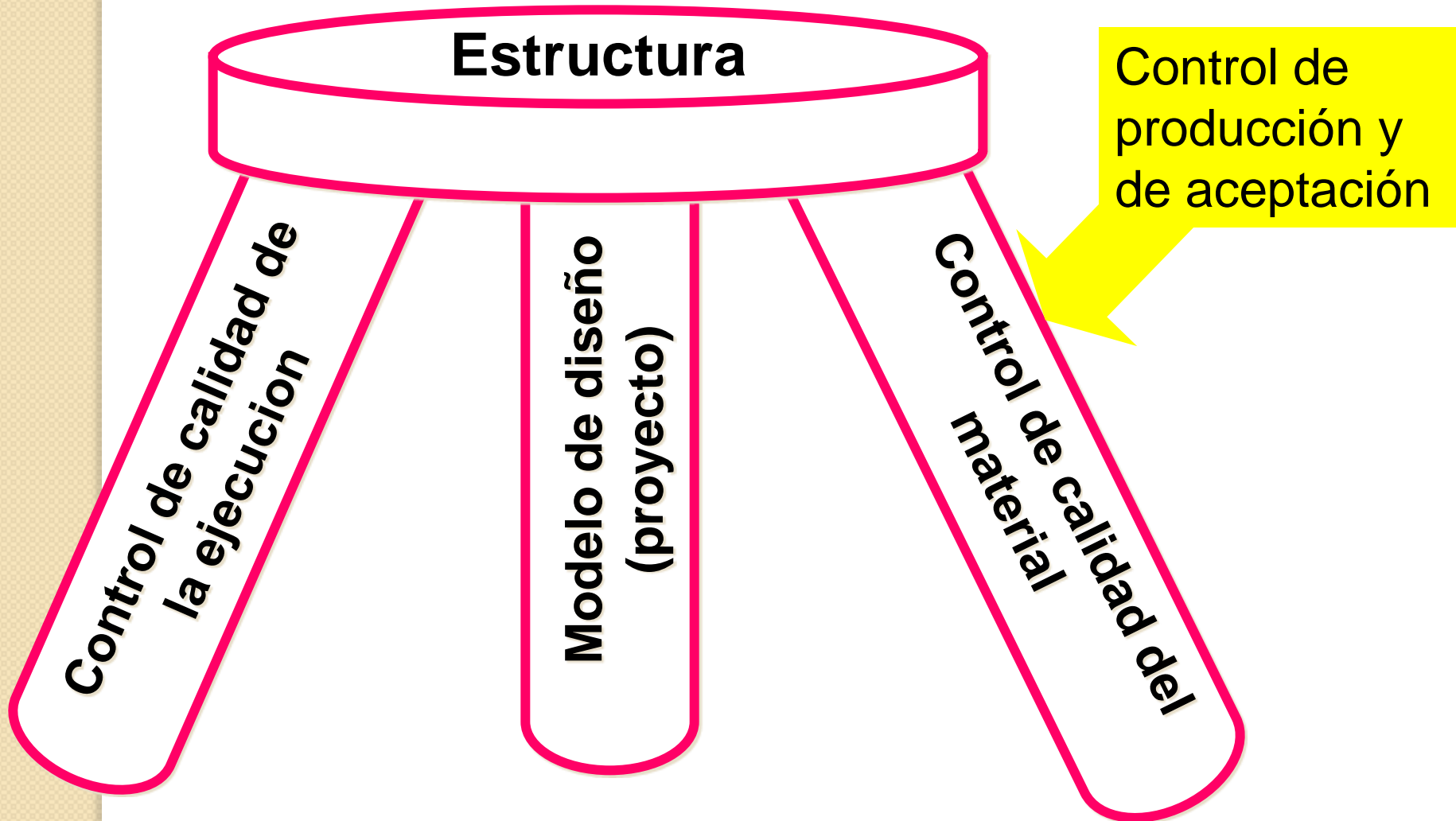
Fibras de acero



Macrofibras poliméricas



El “tripé de la ingeniería estructural”



Aspecto importante para la aplicación: **diseño**

- Hay proyectistas brasileños especializados en pavimentos (TR 34)
- Para las aplicaciones con hormigón proyectado hay mucho de empirismo.
- TBM: proyectistas europeos son normalmente contratados
- Otras aplicaciones: CT303 (IBRACON-ABECE) sigue las bases del fib Model Code (2010).

Túneles



Exemplo: Linha 4 – Amarela do Metrô de São Paulo

- Projetista: Halcrow Group Limited (utilizo modelos propios).
- Para garantir confiabilidade y retro-alimentación del proceso de diseño, fueron realizados ensayos en probetas de grandes dimensiones (homologación del material y dovela).
- Método similar a utilizada en UNICAMP (Fernandes, 2005).

Ensayos de grandes dimensiones



La fibra sola trabaja bien?

Ensayos de grandes dimensiones

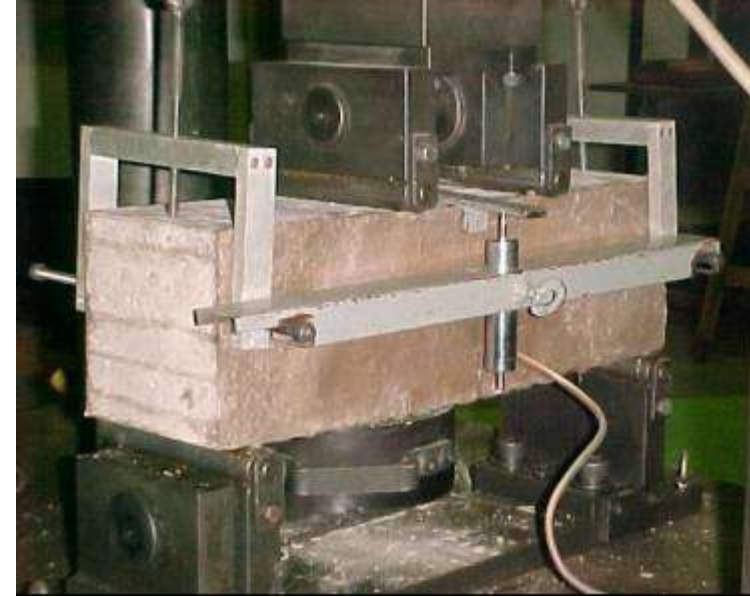


VERIFICACIÓN DE JUNTAS
(HOMOLOGACIÓN L4)

(King et al. 2003).

Modelo de control

- Ensayos viables para el control de rutina: pequeñas dimensiones (JSCE SF4 y compresión).
- Análisis conjunta para f_c , f_{ct} y tenacidad. (Telles e Figueiredo, 2006)



“Filosofia”

- Homologación (grandes dimensiones)
- Parametrización simultánea (pequeñas dimensiones)
- Controle de la producción de las dovelas (verificación de los elementos y ensayos de pequeñas probetas).



“Filosofia”

- Nivel de seguridad: solo se envía al túnel los segmentos ya aprobados por el controle da **calidad.**



Situación del hormigón proyectado:

- Estaba muy mala!
- “Recepta” de contenido mínimo (máximo?) aún utilizada.
- Hoy hay proyectistas cambiando sus métodos.

Método similar a las dovelas

- Ensayos en paineles (homologación)
 - EFNARC (más frecuente)
 - ASTM C1550 (principian a utilizar)
- Ensayos de flexo-tracción en probetas prismáticas (control de calidad)
 - JSCE SF4
 - EFNARC



“Nueva visión”

- Proyecto “Rio Maravilha”
- Túneles reemplazarán viaductos
- Proyectista de São Paulo empieza a utilizar el nuevo modelo de *fib Model Code*.

Controle básico da la resistencia residual

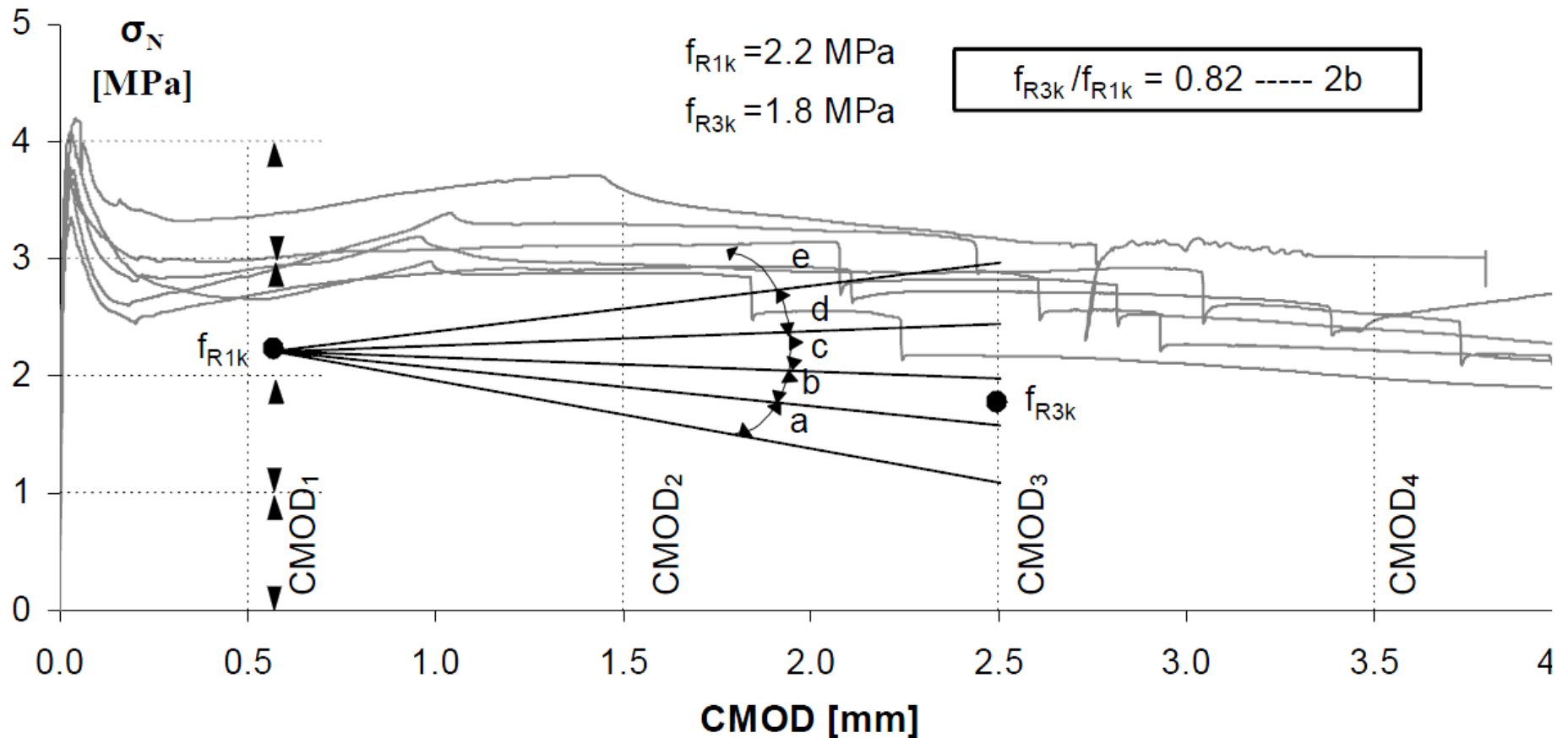
- EN 14651 (2004): ensayo de flexo-tracción en tres puntos en probeta con entalla y controle de la deformación por CMOD ou δ .



fib Model Code

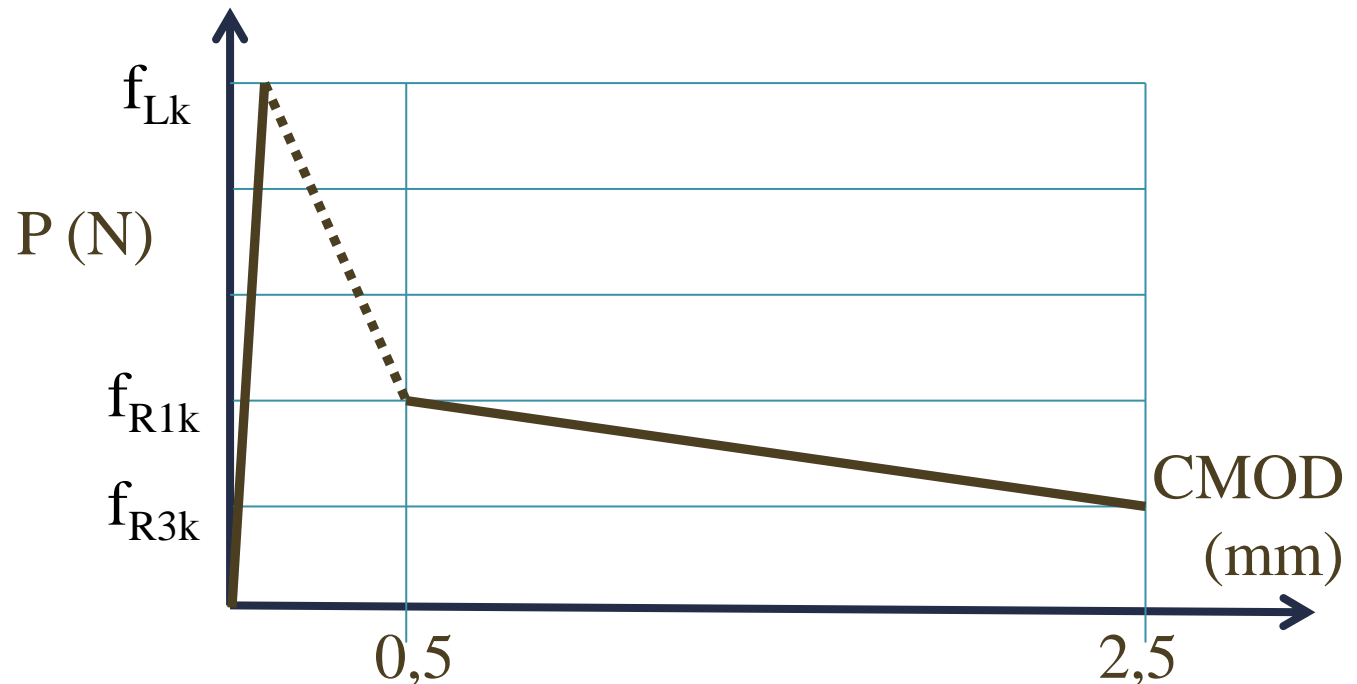
Controle básico da la resistencia residual

- Clasificación del comportamiento de HRF:



Condiciones básicas

- El comportamiento do CRF en el ELS (f_{R1k}) y en el ELU (f_{R3k}) deben ser relacionados y tener como relaciones mínimas:
 - $f_{R1k}/f_{Lk} \geq 0,4$
 - $f_{R3k}/f_{R1k} \geq 0,5$



Grande problema:

- Pocas universidades en Brasil tienen la condición de realizar el ensayo ENI465 I.
- Como hacer viable el control de rutina en las aplicaciones?
- Como garantizar la verificación del comportamiento de las fibras?

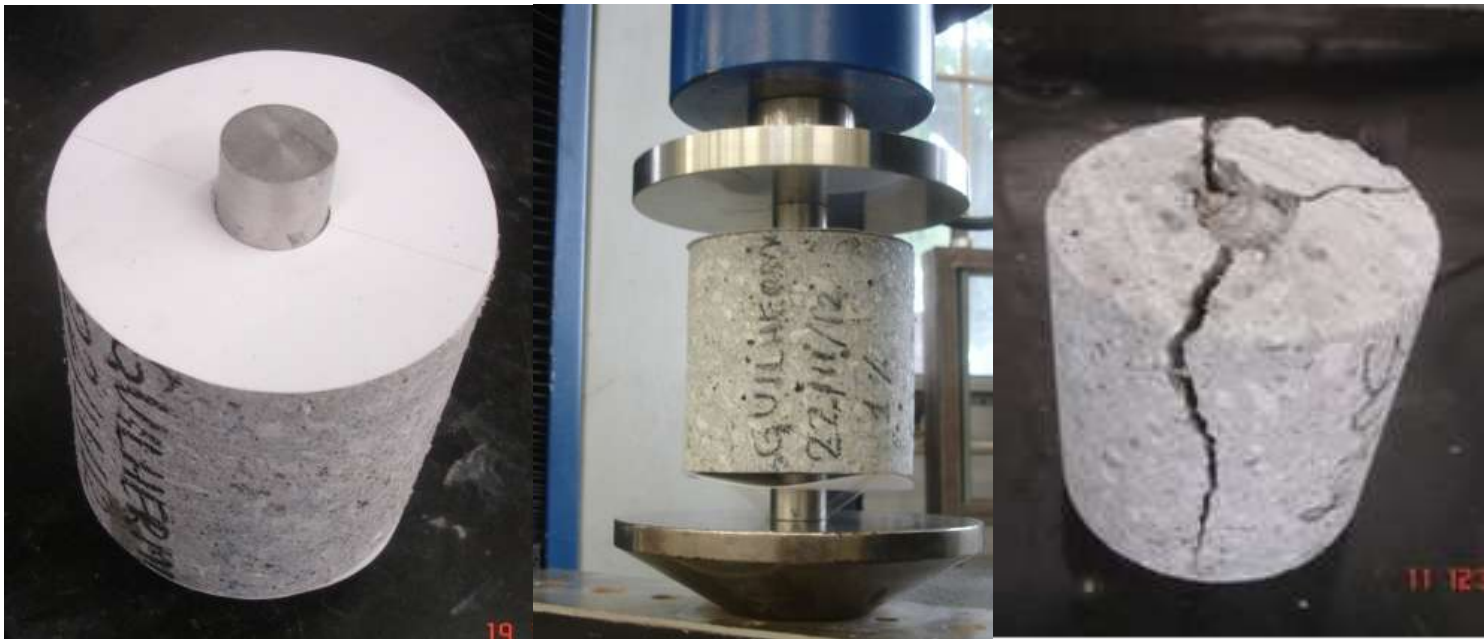
Ensayos alternativos

- Ensayo Montevideo



Ensayos alternativos

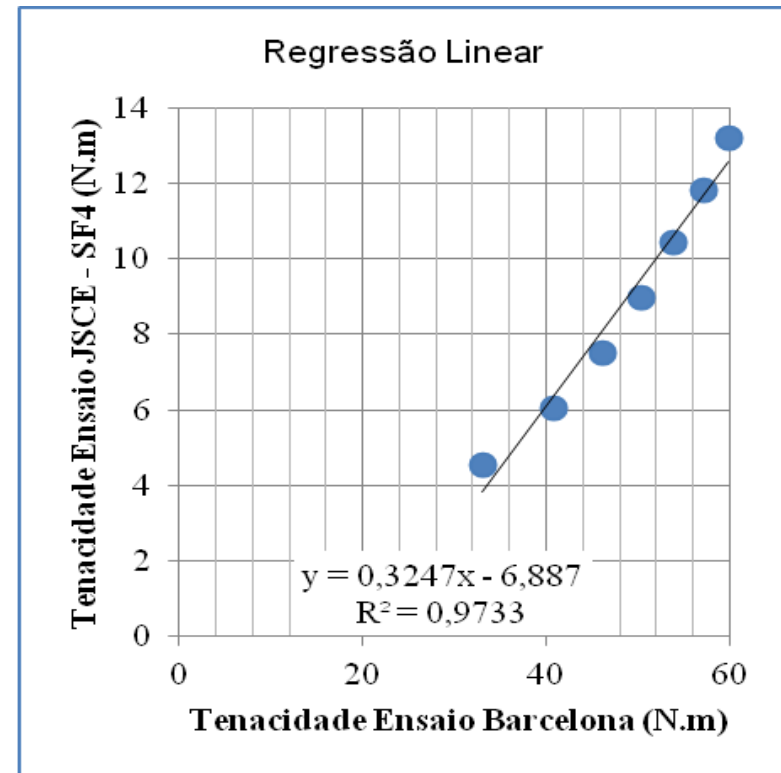
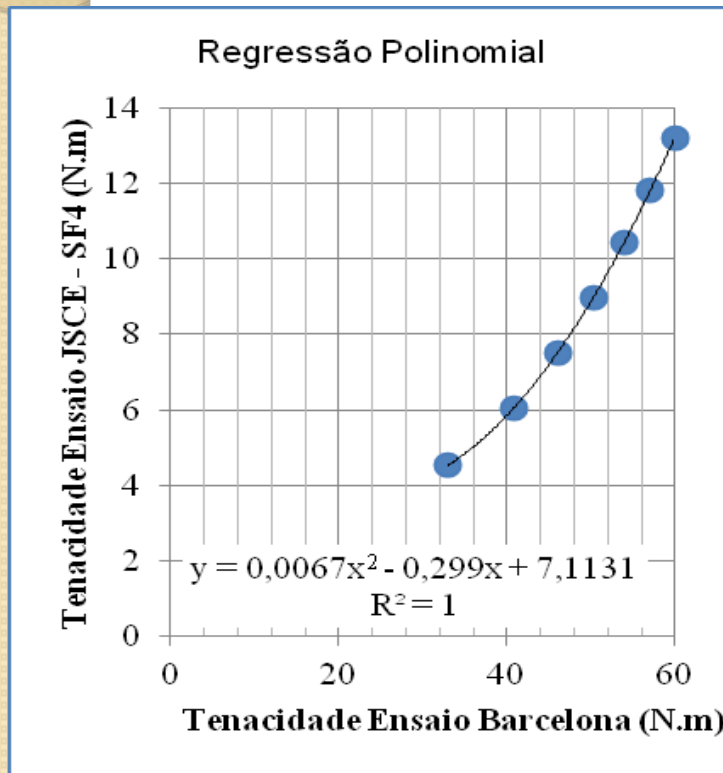
- Ensayo Barcelona



Normativa: UNE 83515 (2010)

Alternativa

- Ensaio Barcelona :



- Toaldo et al., 2013



Norma brasileña de fibras de acero

ABNT NBR 15530:07 – Fibras de aço para concreto - Especificação

- Publicada en 2007
- Establece parámetros de clasificación para las fibras de acero con bajo contenido de carbono
- Aborda requisitos mínimos de:
 - forma geométrica,
 - tolerancias dimensionais,
 - defectos de fabricación y
 - resistencia à tracción e doblamiento.

Clasificación de las fibras

TIPOS:

- Tipo A: fibra de acero con anclajes en las extremidades
- Tipo C: fibra de acero corrugada
- Tipo R: fibra de acero recta



CLASSES:

- Clase I: fibra oriunda de alambre trefilado
- Clase II: fibra oriunda de chapa laminada cortada
- Clase III: fibra oriunda de alambre escarificado

Designaciones

Tipo (geometría)	Clase	Factor de forma mínimo λ	Limite de resistencia a tracción MPa (*) f_u
A	I	40	1000
	II	30	500
C	I	40	800
	II	30	500
	III	30	800
R	I	40	1000
	II	30	500

(*)Esta determinación debe ser hecha en el alambre.

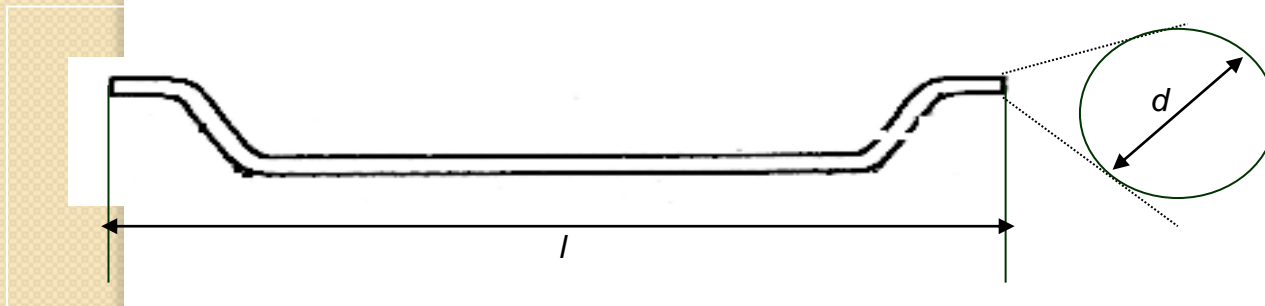
Tolerancias dimensionales

Longitud

- Tolerancia para la longitud l : $\pm 5\%$.
- Para fibras con $l \leq 35$ mm la tolerancia es $\pm 10\%$.

Diámetro

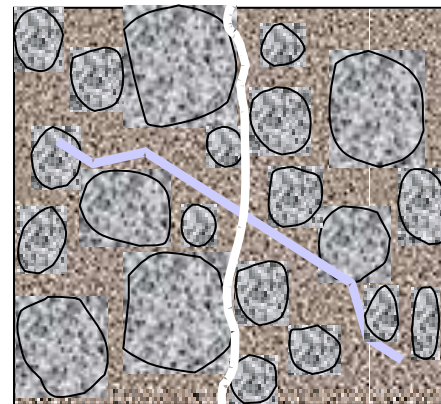
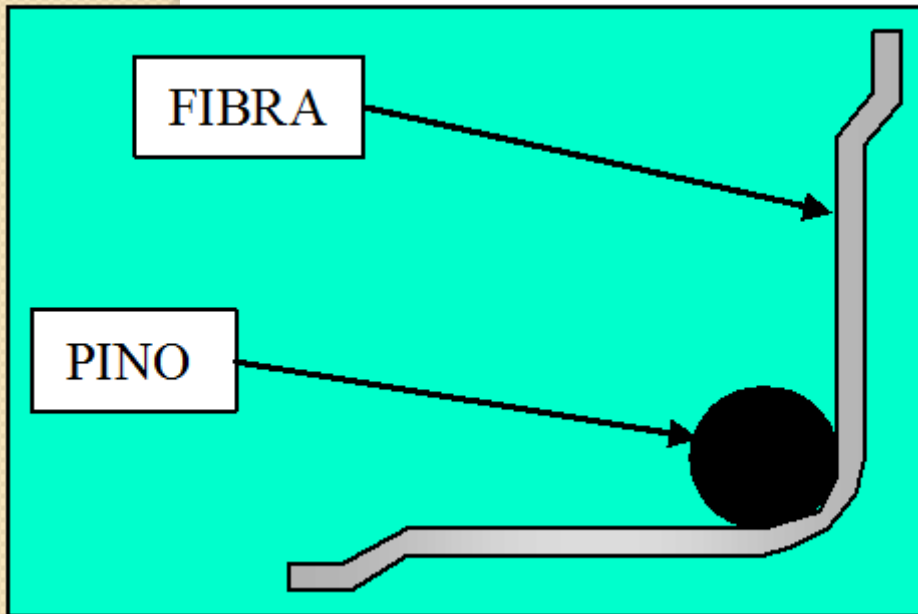
- Tolerancia para el diámetro d_e es $\pm 5\%$.
- La variación máxima permitida para la diferencia entre las medidas d_1 e d_2 é de 4%.



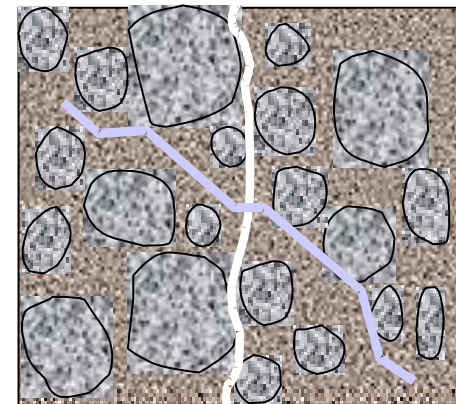
$$d_e = (d_1 + d_2) \div 2$$

Otros requisitos:

- Resistencia al doblado (no pode haber roturas y verificase la ductilidad).



Fibra frágil

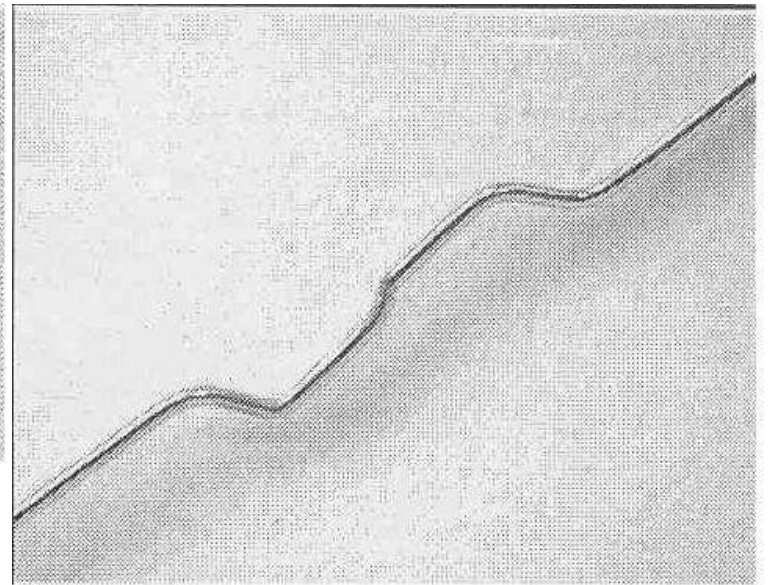
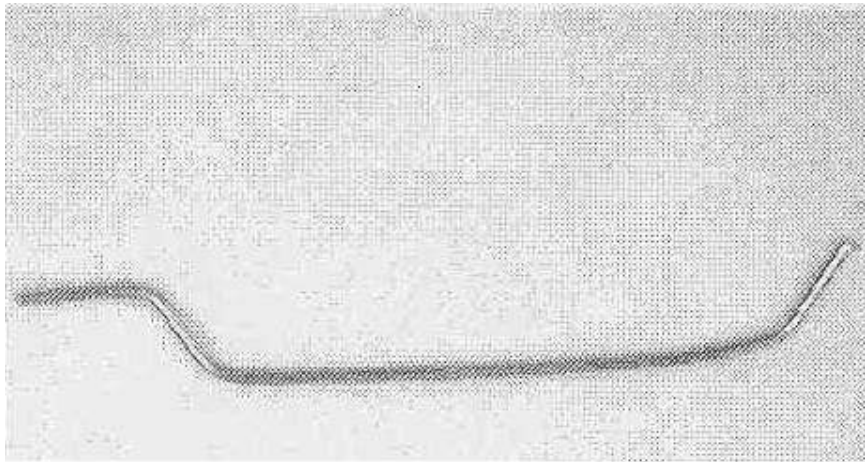


Fibra dúctil

Otros requisitos:

Verificación de defectos:

- Muestra de 200 gramas.



Aceptación o rechazo

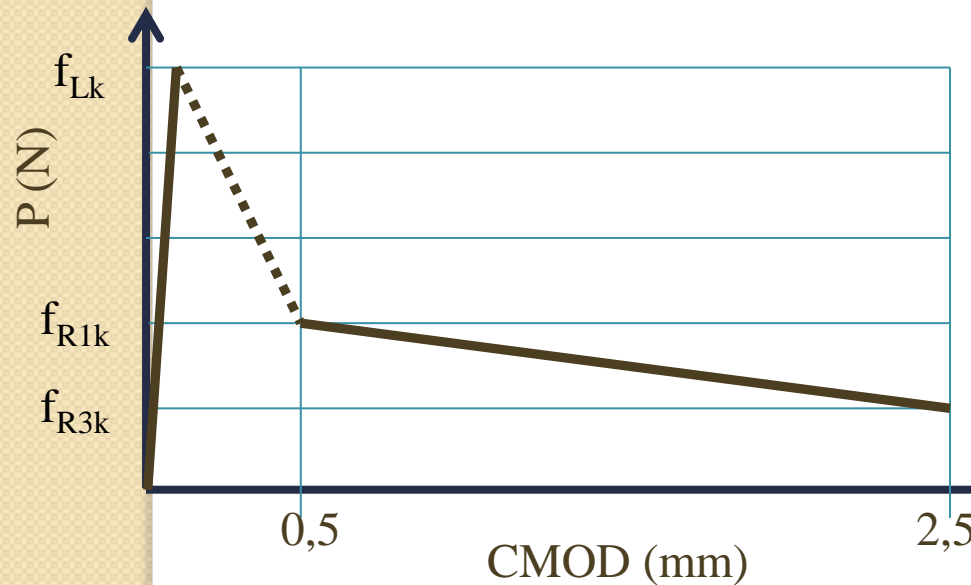
Evaluación	Muestra mínima	% mínima de fibras conformes
Dobramento	10 fibras	90
Verificación de dimensiones	60 fibras	90
Verificación de defectos	200 g	95

Comentarios

- La especificación de la fibra es considerada esencial para el control de calidad del HRF
- Normativa exigente.
- Hoy esta en discusión en ABNT la revisión de esta norma para quedar más cerca de la normativa ISO.
- La idea es seguir en la misma dirección para otras fibras: PP y vidrio (CT303).

Nuevo enfoque de la norma

- Verificación del contenido mínimo de fibras para garantizar los requisitos mínimos del fib Model Code por medio de ENI465 I



NORMA DE TUBOS



ABNT NBR 8890:2007 - Tubo de concreto, de seção circular, para águas pluviais e esgotos sanitários

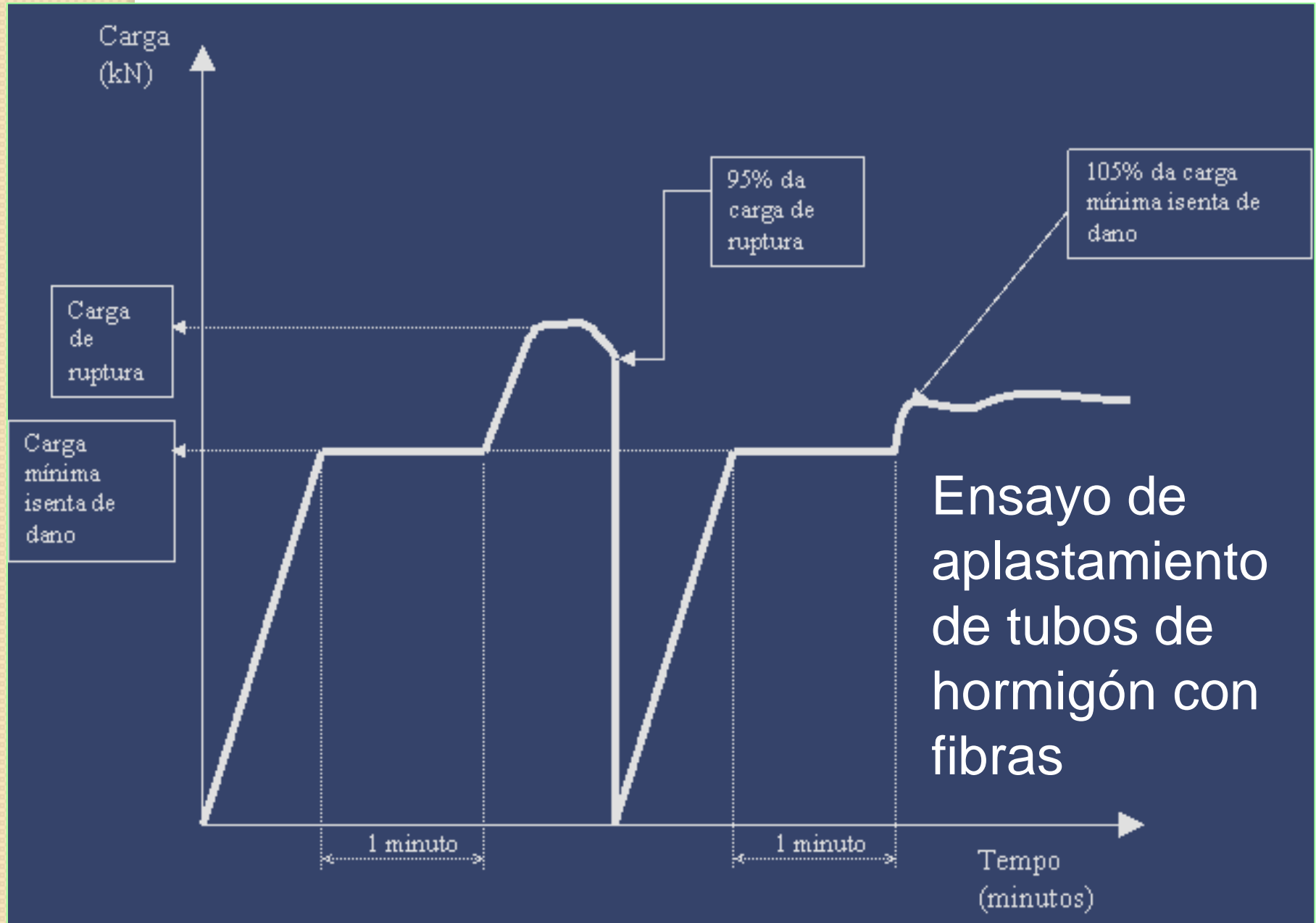
- Trabajos de investigación anteriores:
 - USP
 - UNICAMP
 - UNESP Ilha Solteira
- Viabilidad del uso de las fibras de acero.

ABNT NBR 8890 - *Tubos de hormigón*

- Muy similar a la normativa europea NBN EN1916 *Concrete pipes and fittings, unreinforced, steel fibre and reinforced*, **con algunas modificaciones en la evaluación del componente.**
- Es la primera norma de Brasil a abordar el uso do HRFA.

Ensayo de aplastamiento

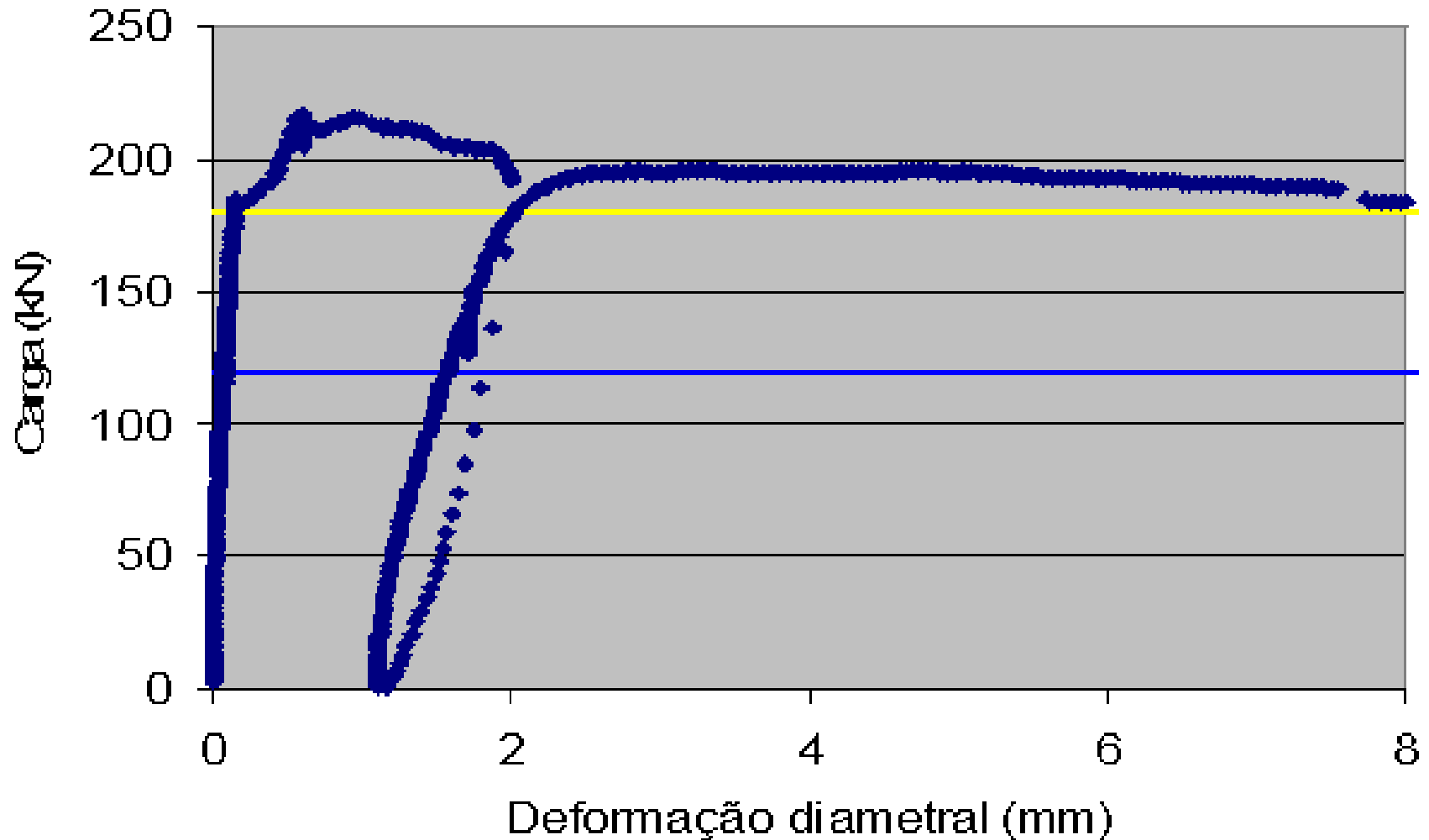




Ensayo con control de desplazamiento



Ensaio monitorado de tubo de CRFA em conformidade com a norma



Comentarios

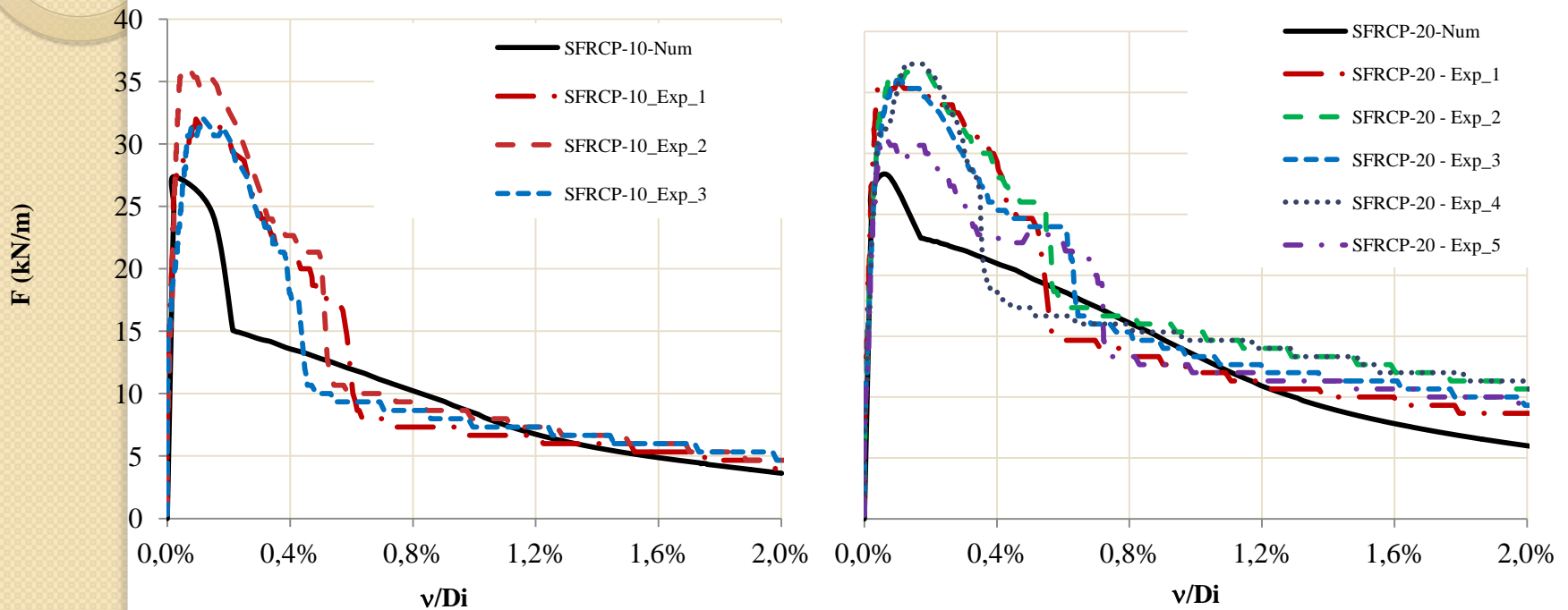
- La norma presenta una postura conservadora:
- Φ do tubo \leq 1 m.
- Exigencias más fuertes para los tubos con fibras (**carga de fisura – carga mínima sin fissura**)
 - Mejor comportamiento mecánico
 - Mejoras en la durabilidad
- Hace posible evaluar nuevas tecnologías

Comentarios

- Perspectivas futuras
 - ✓ Igualar los requisitos para tubos con barras y fibras
 - ✓ Refuerzo mixto: fibras y barras de acero.
 - ✓ Aplicación de macrofibras plásticas.
 - ✓ Evaluar el HRF por medio del ensayo Barcelona

Alternativa

- Ensayo Barcelona:



- Buenos resultados en tubos (Monte et al., 2014)

Estudos comparativos de fibras de aço e macrofibras poliméricas

- FIGUEIREDO, A. D., de la FUENTE, A., AGUADO, A., SALVADOR, R. P., ESCARIZ, R. C. Fibras plásticas como reforço de tubos de concreto. Parte I: Caracterização tecnológica In: 54º. Congresso Brasileiro do Concreto, 2012, Maceió. **Fortalecendo o concreto no Brasil.** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2012.

Objetivos

- Objetivo : realizar una evaluación comparativa de desempeño de fibras de acero y poliméricas en los ensayos básicos y en los tubos

Ensayo básico

- EN 14651:2007



Comportamiento básico

- Una matriz de hormigón
- Dos fibras:



Fibra	PP	AÇO
Material	copolímero de polipropileno virgem	aço
Forma	monofilamento / fibrilado	Tipo A1
Número de filamentos por quilograma	221000	4600
Número de filamentos por litro	201100	36100
Comprimento / mm	54	60
Diâmetro equivalente / mm	0,32	0,75
Densidade / g/cm ³	0,91	7,85
Módulo de elasticidade / GPa	5	210
Resistência à tração / MPa	570 - 660	1100

Comportamiento básico

- Contenidos de fibra de acero:

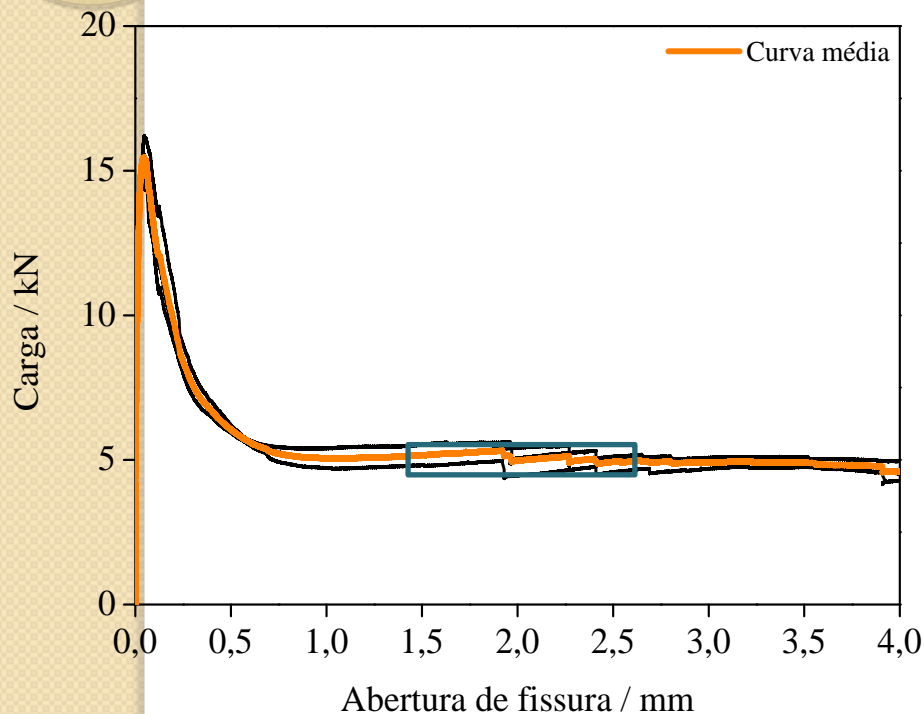
En peso (kg/m³)	15	25	35
En volumen (%)	0,19	0,32	0,45

- Contenidos de fibra de PP

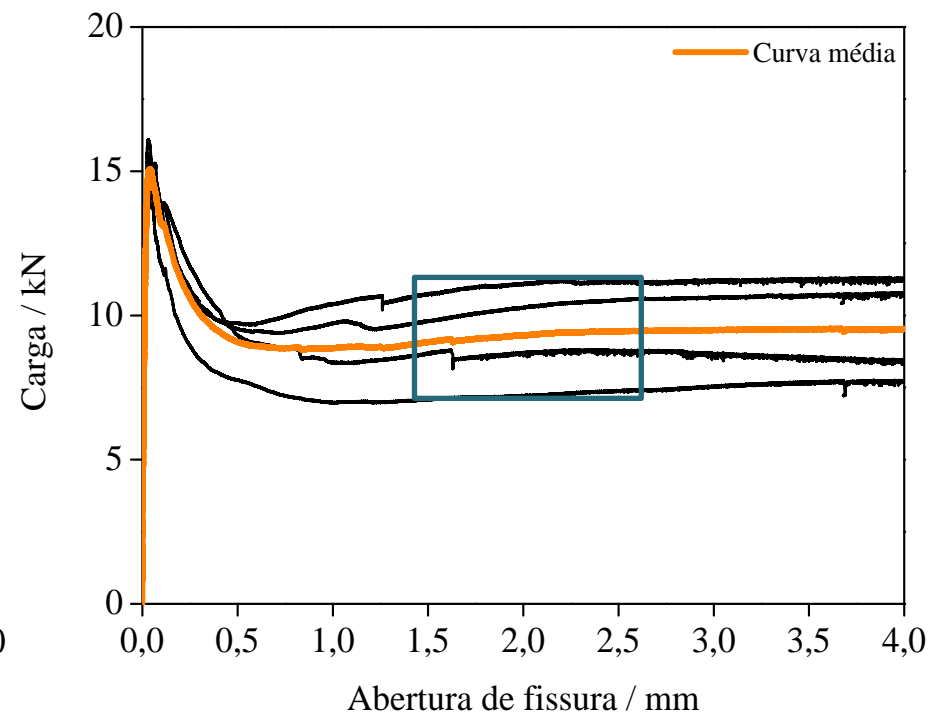
En peso (kg/m³)	3	4,5	6
En volumen (%)	0,33	0,5	0,66

Comportamiento básico

- Resultados:



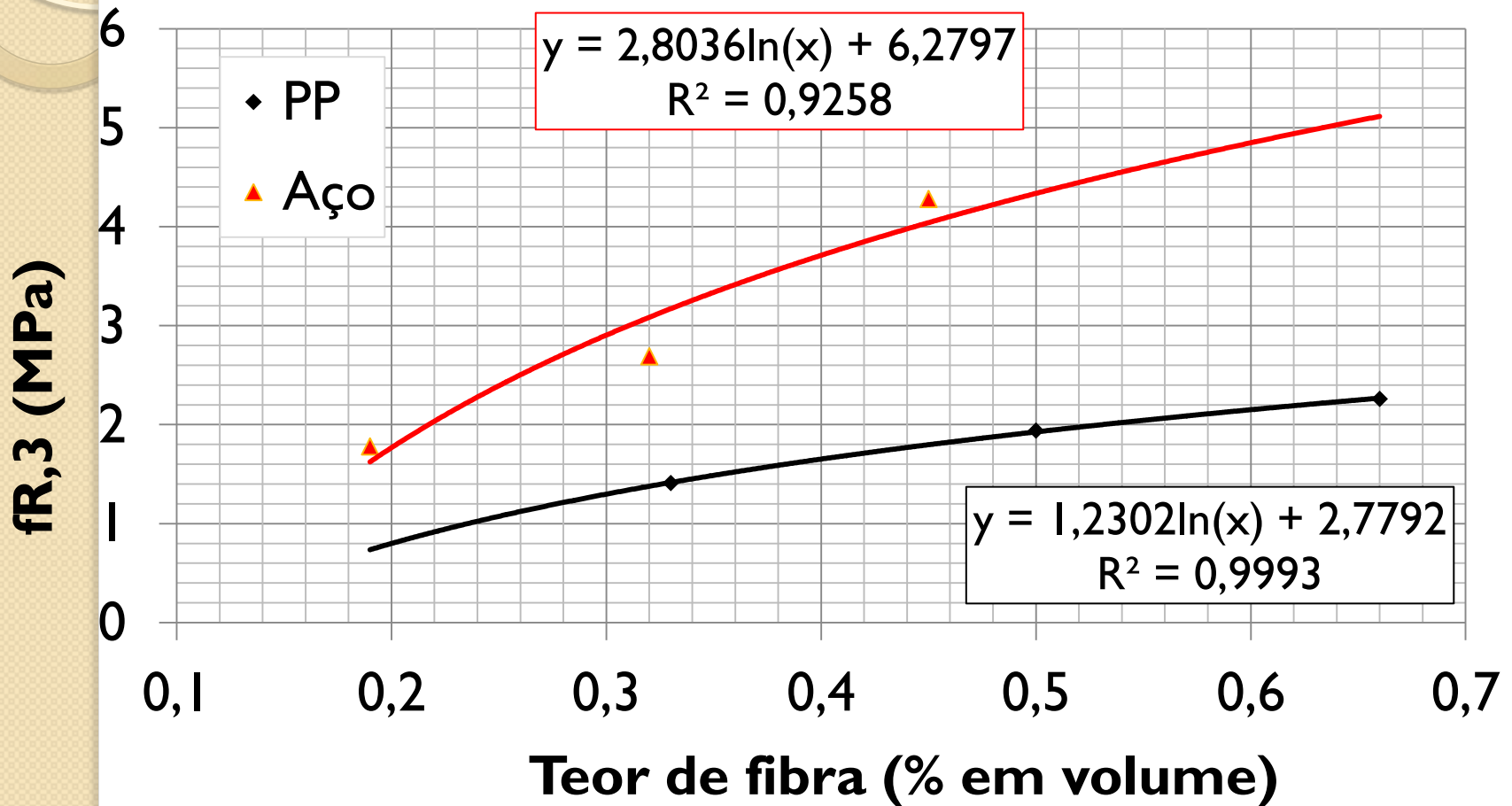
(a)



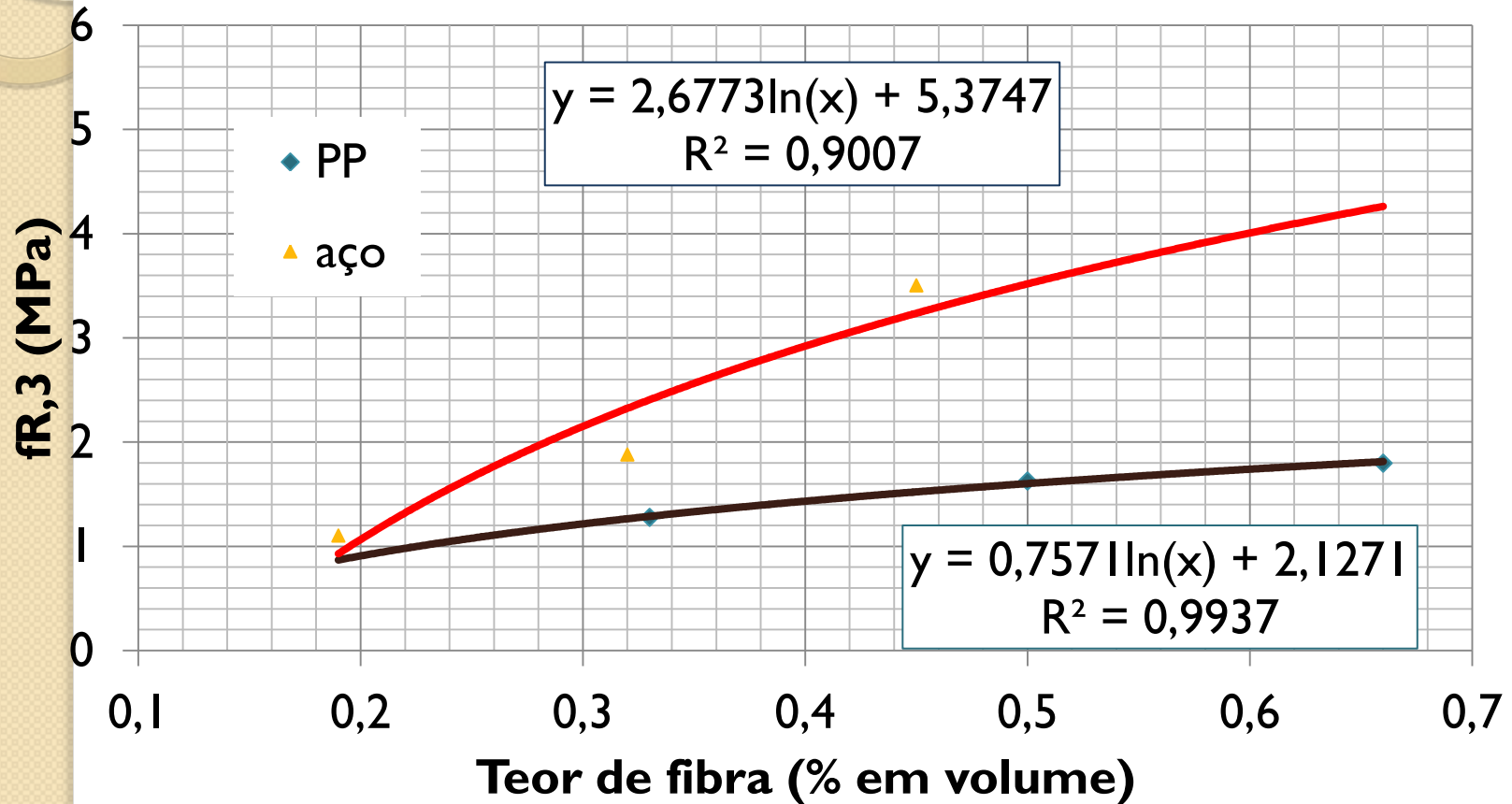
(b)

Curvas unitárias e médias obtidas com o concreto reforçado com a macrofibra PP na dosagem de $3,0\text{kg/m}^3$ (a) e com a fibra de aço na dosagem de 25kg/m^3 (b).

Comportamiento básico (promedio)



Comportamiento básico (característico)



Comportamiento básico conclusiones

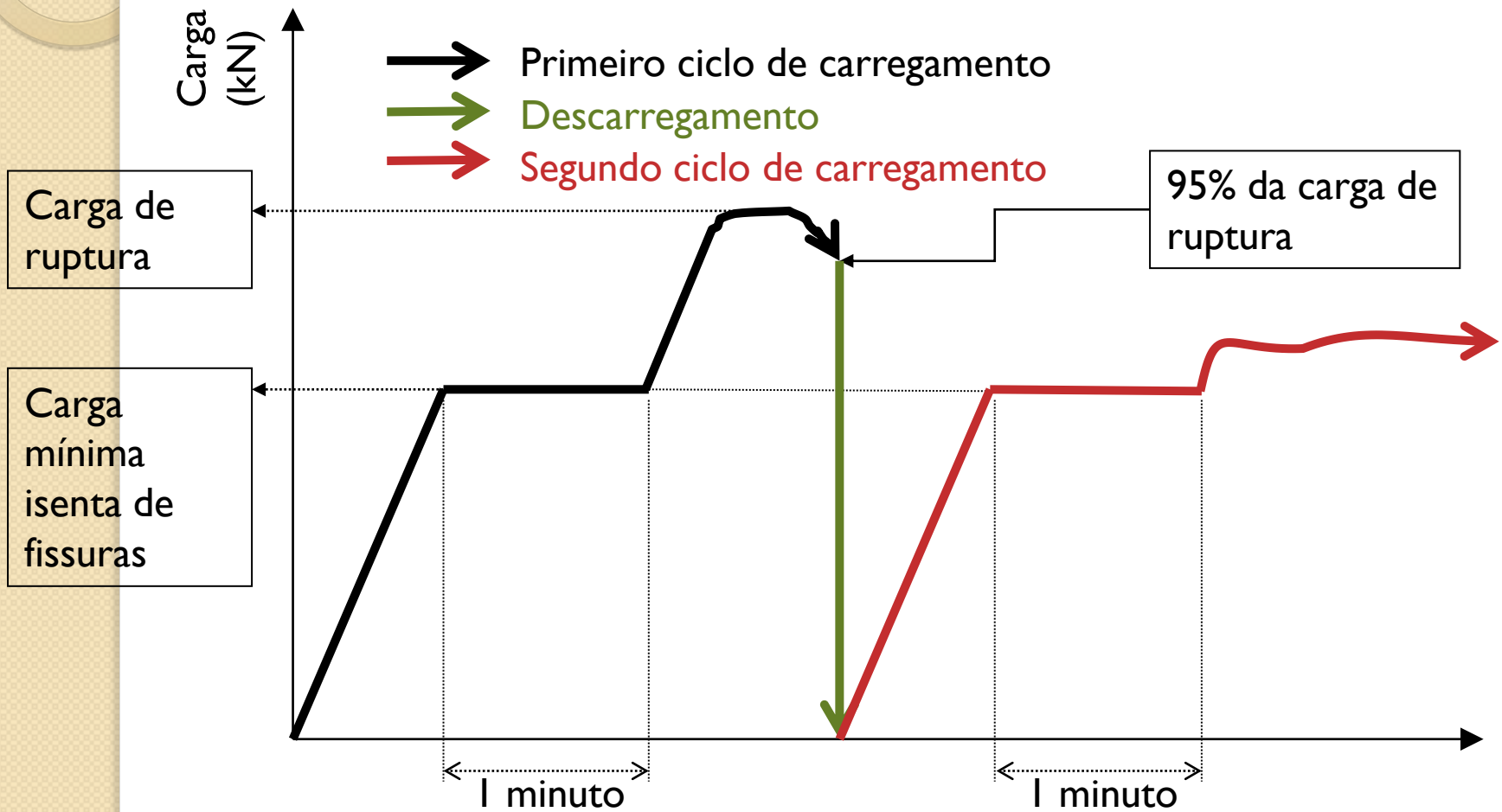
- Para obtener un nivel promedio de $f_{R,3}$ de 2 MPa necesitaríamos:
 - Fibra de acero: 0,22% (17,3 kg/m³)
 - Macrofibra de PP: 0,52% (4,7 kg/m³)
- Para obtener un nivel característico de $f_{R,3}$ de 1 MPa necesitaríamos:
 - Fibra de acero: 0,19% (14,9 kg/m³)
 - Macrofibra de PP: 0,22% (2,0 kg/m³)

Evaluación en los tubos

Ensayo con desplazamiento controlado (NB 8890:07)



Evaluación en los tubos



Evaluación en los tubos

- Las mismas dos fibras:
- Contenido de fibras de acero:

En peso (kg/m ³)	20	25	35	45
En volumen (%)	0,25	0,32	0,45	0,57

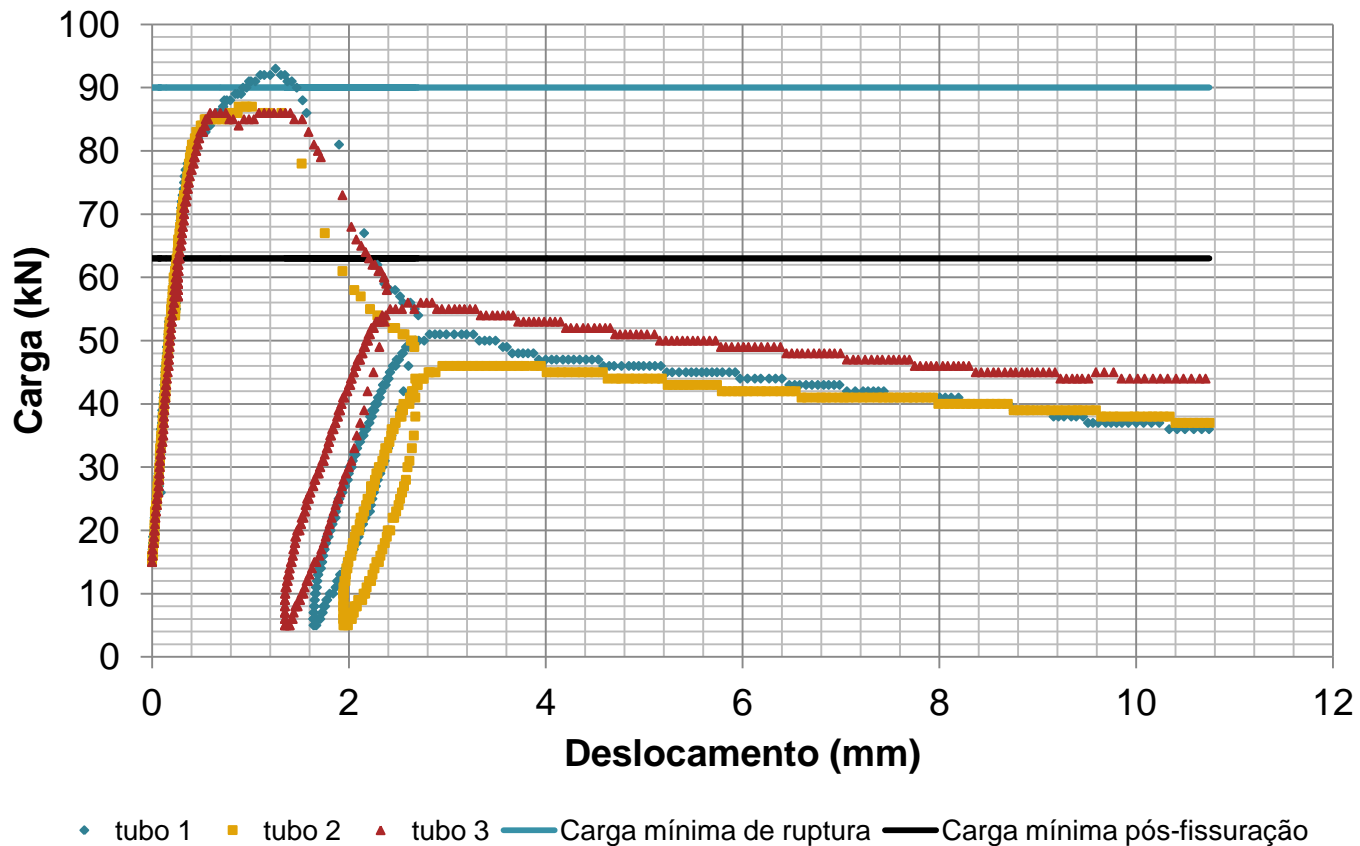
- Contenido de macrofibras sintéticas:

En peso (kg/m ³)	3	4	5,5
En volumen (%)	0,33	0,44	0,6

- **Tubos EA2 con $\Phi = 1000$ mm**

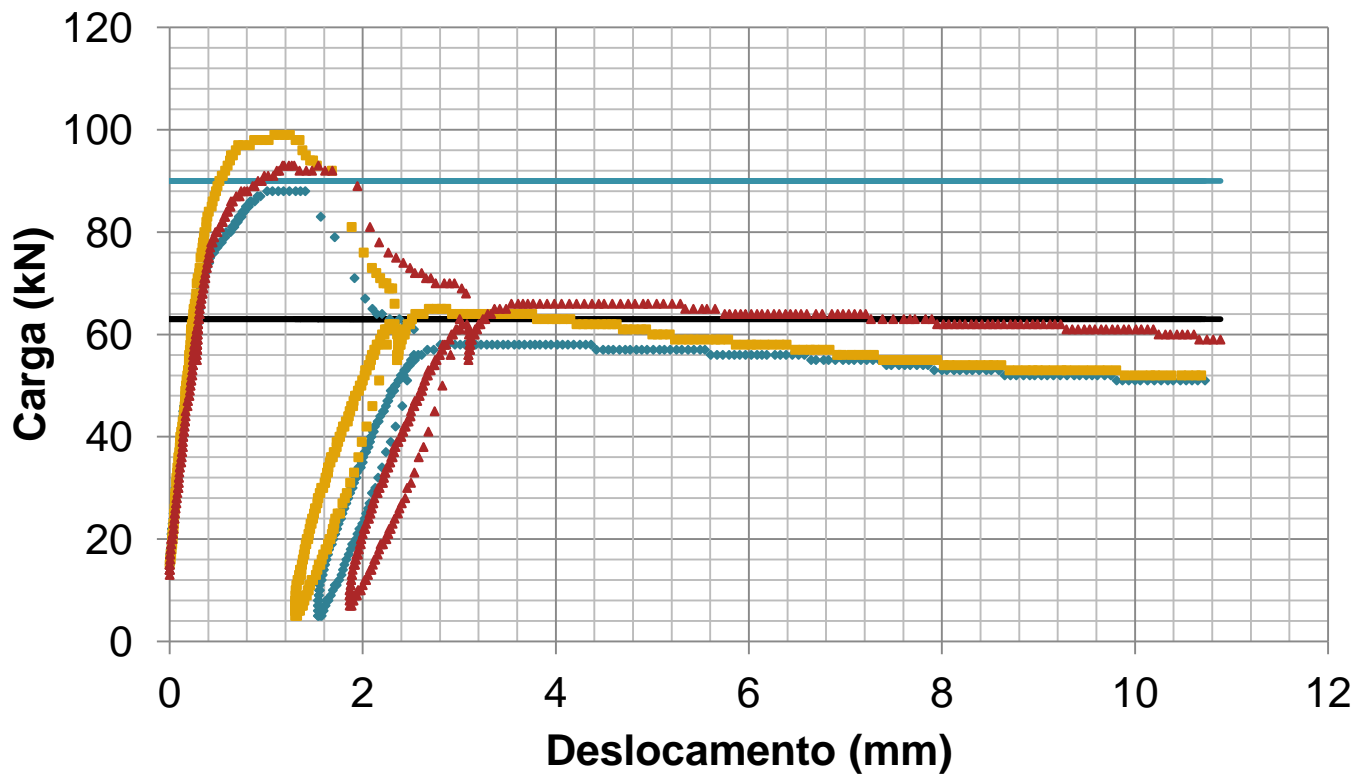
Evaluación en los tubos

- Resultados con fibras de acero 20 kg/m³



Evaluación en los tubos

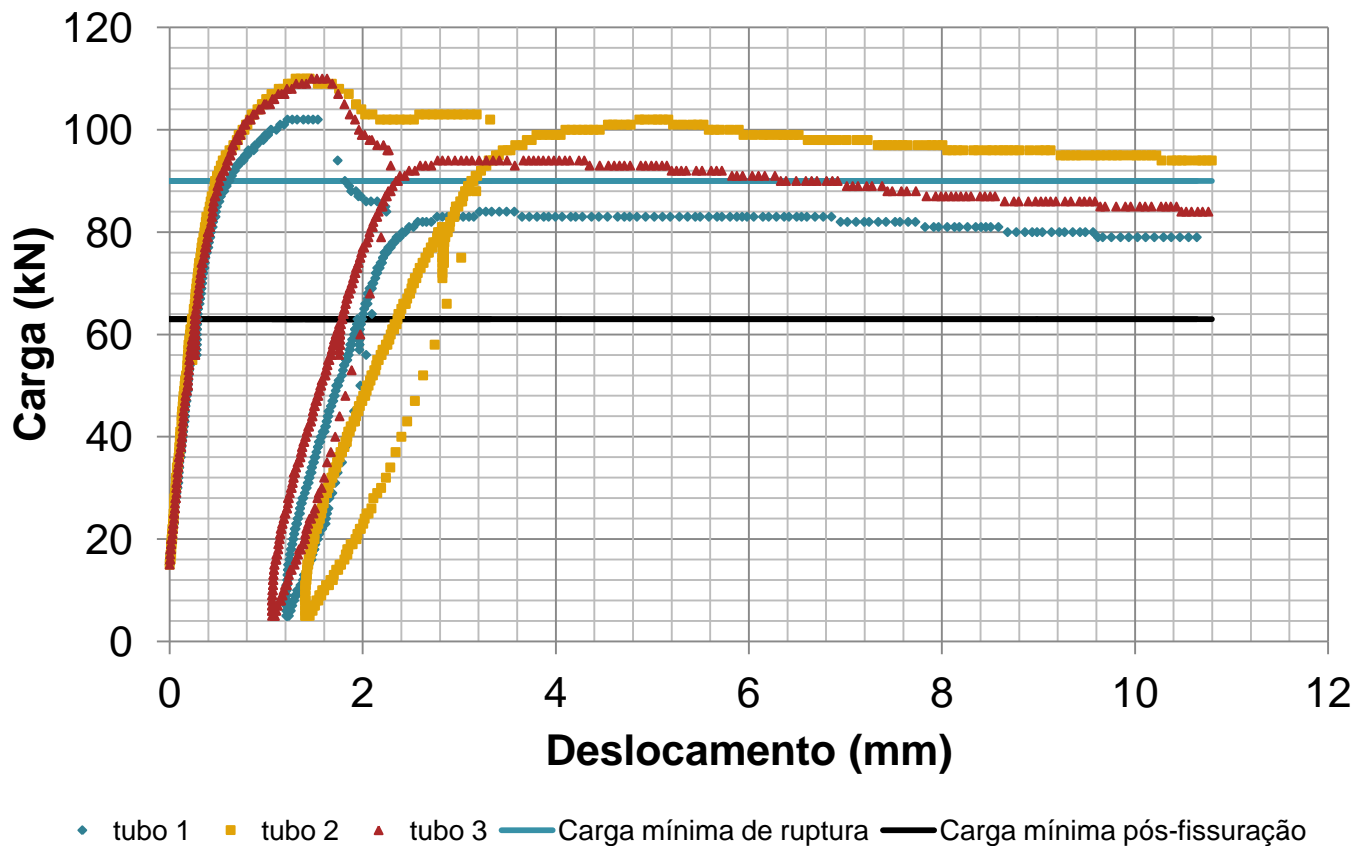
- Resultados com fibras de aço 25 kg/m³



◆ tubo 1 ■ tubo 2 ▲ tubo 3 — Carga mínima de ruptura — Carga mínima pós-fissuração

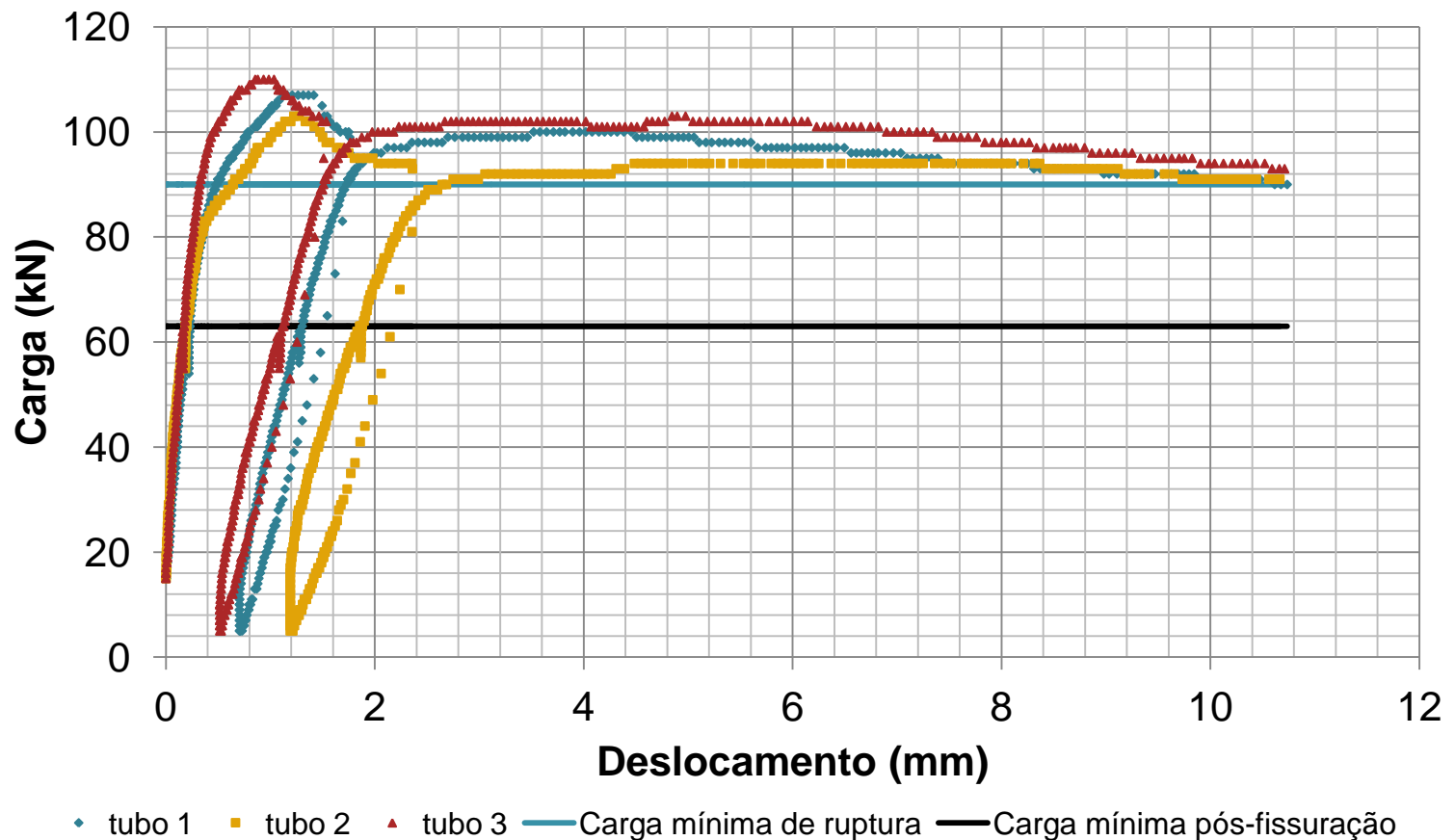
Evaluación en los tubos

- Resultados com fibras de aço 35 kg/m³



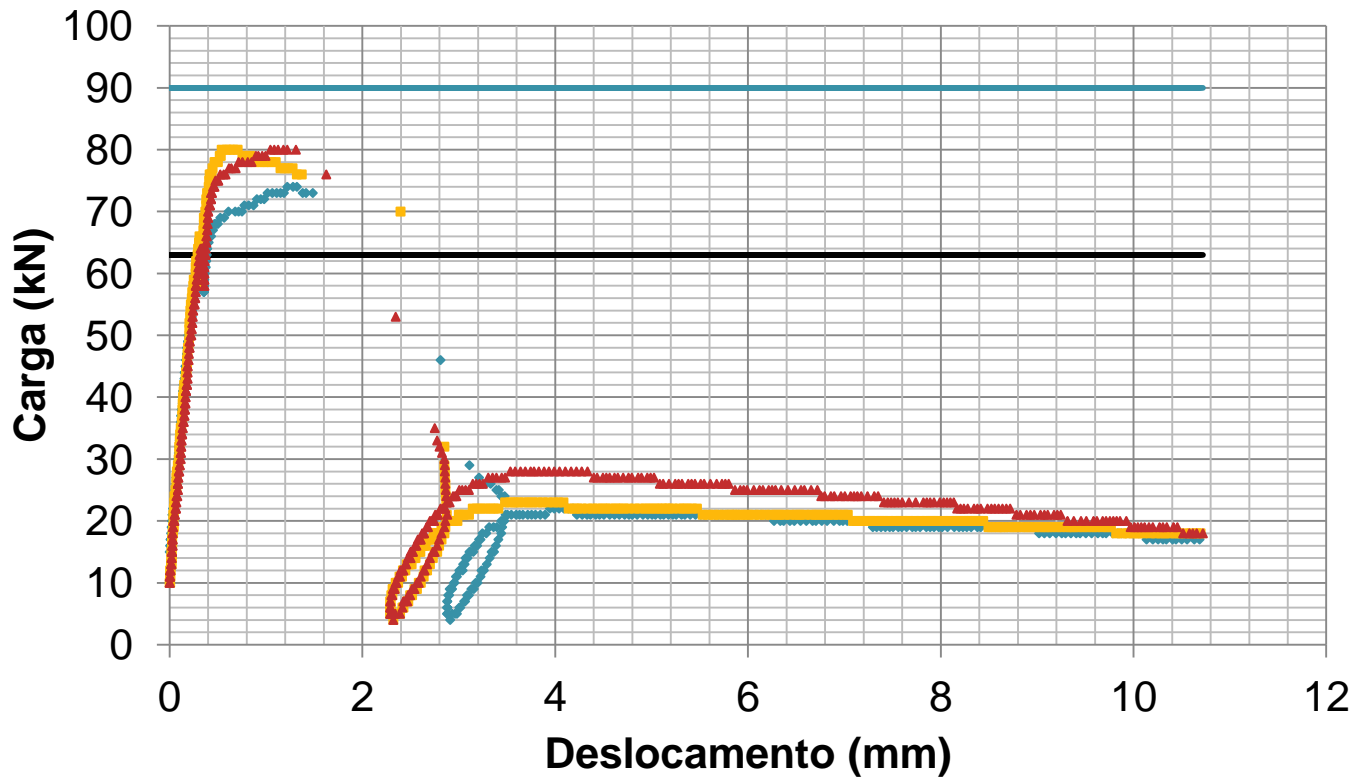
Evaluación en los tubos

- Resultados com fibras de aço 45 kg/m³



Evaluación en los tubos

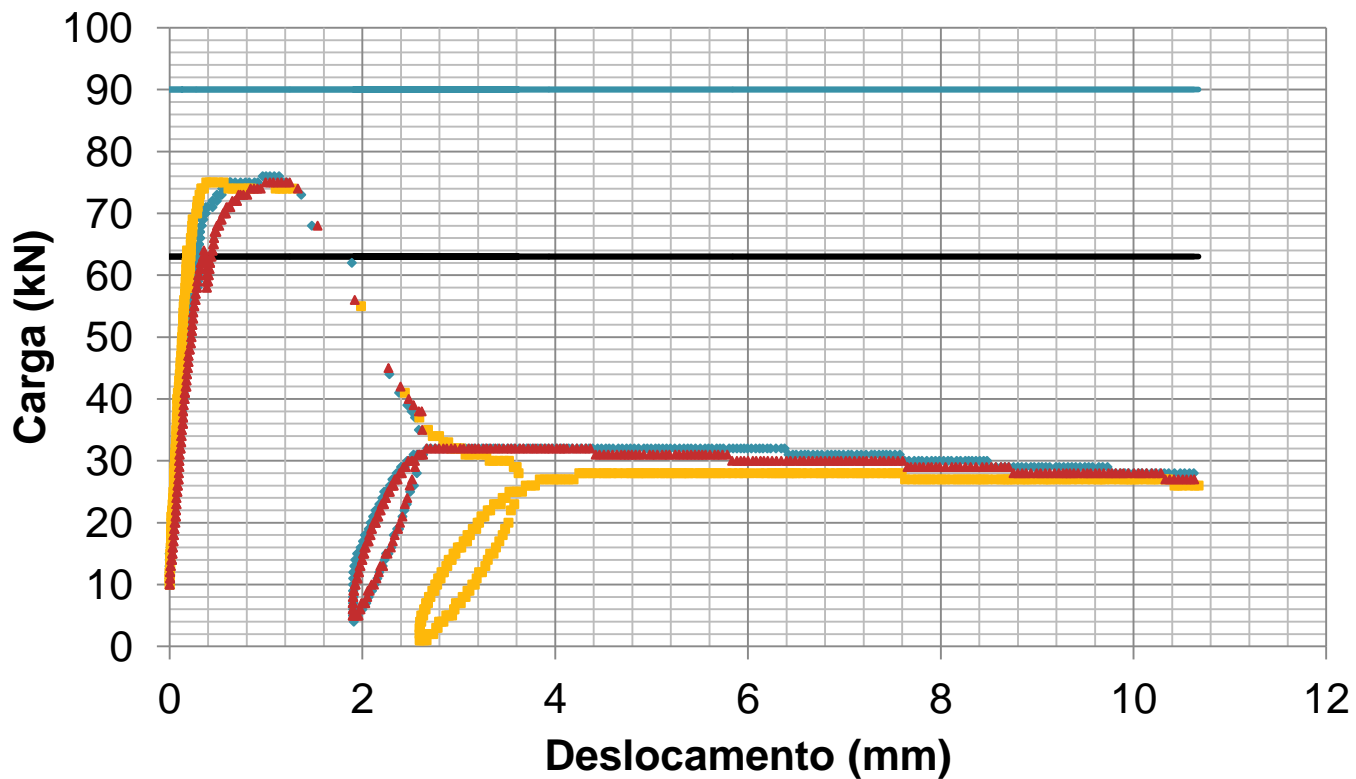
- Resultados com macrofibras de PP 3 kg/m³



◆ tubo 2 ■ tubo 3 ▲ tubo 4 — Carga mínima de ruptura — Carga mínima pós-fissuração

Evaluación en los tubos

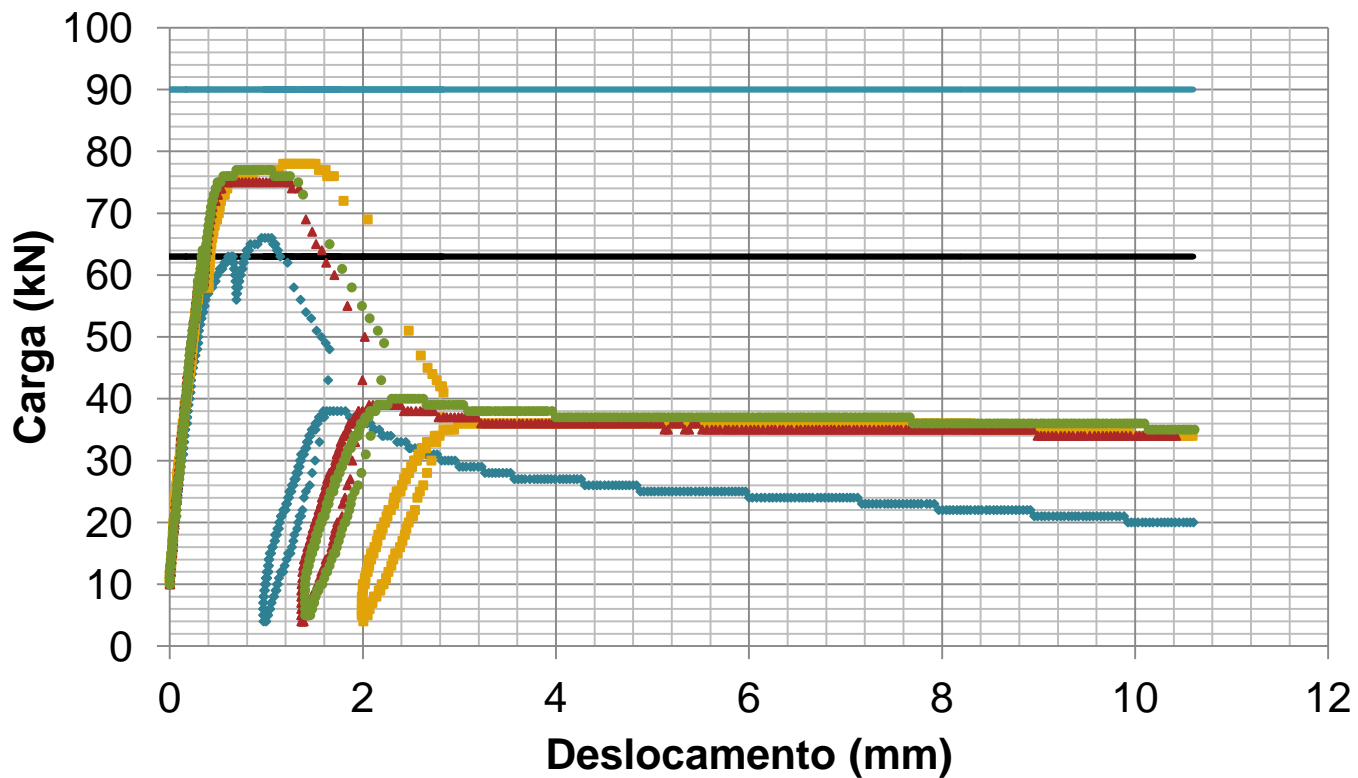
- Resultados com macrofibras de PP 4 kg/m³



◆ tubo 1 ■ tubo 2 ▲ tubo 4 — Carga mínima de ruptura — Carga mínima pós-fissuração

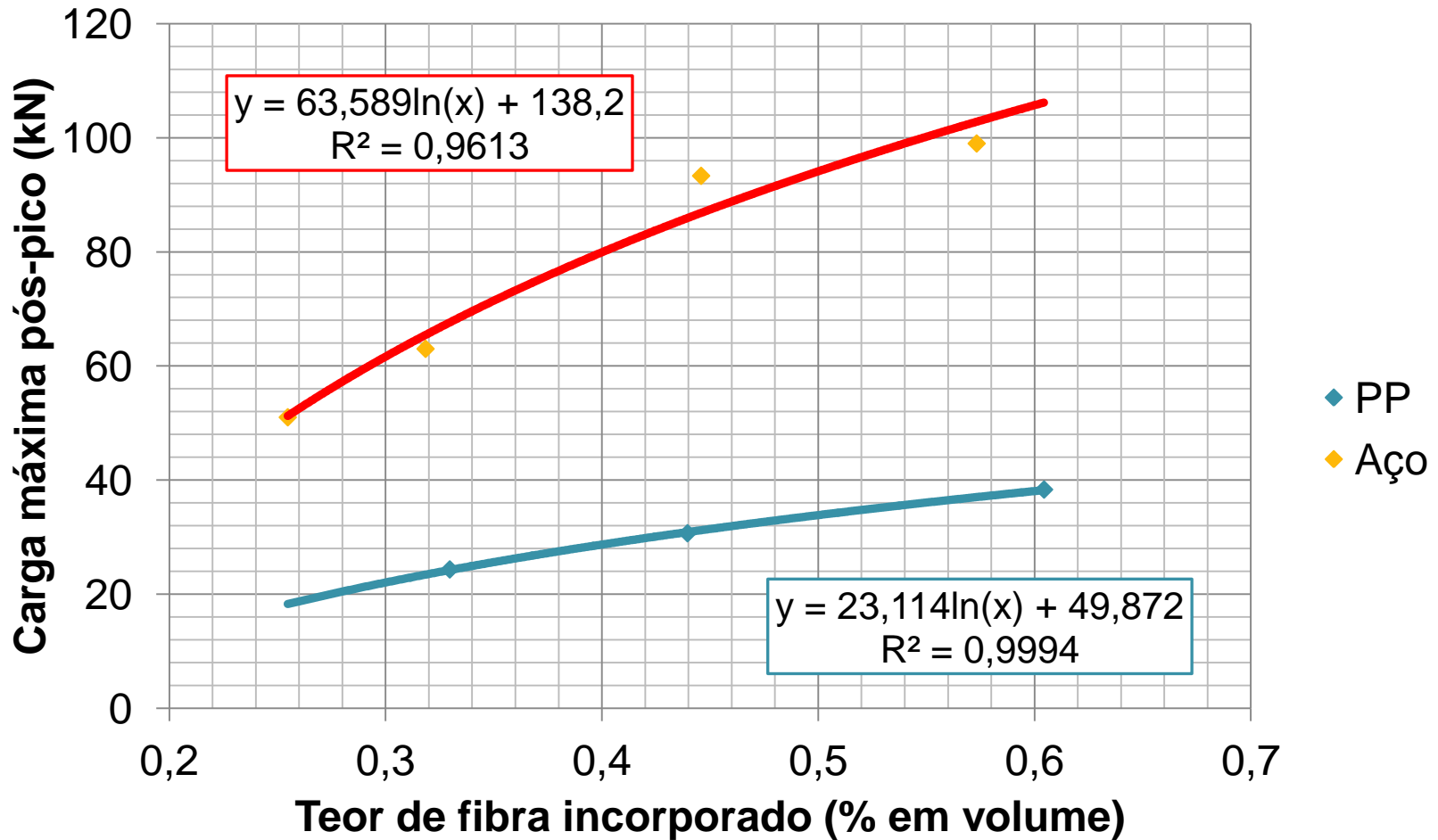
Evaluación en los tubos

- Resultados com macrofibras de PP 5,5 kg/m³



◆ tubo 1 ■ tubo 2 ▲ tubo 3 ● tubo 4 — Carga mínima de ruptura — Carga mínima pós-fissuração

Evaluación en los tubos



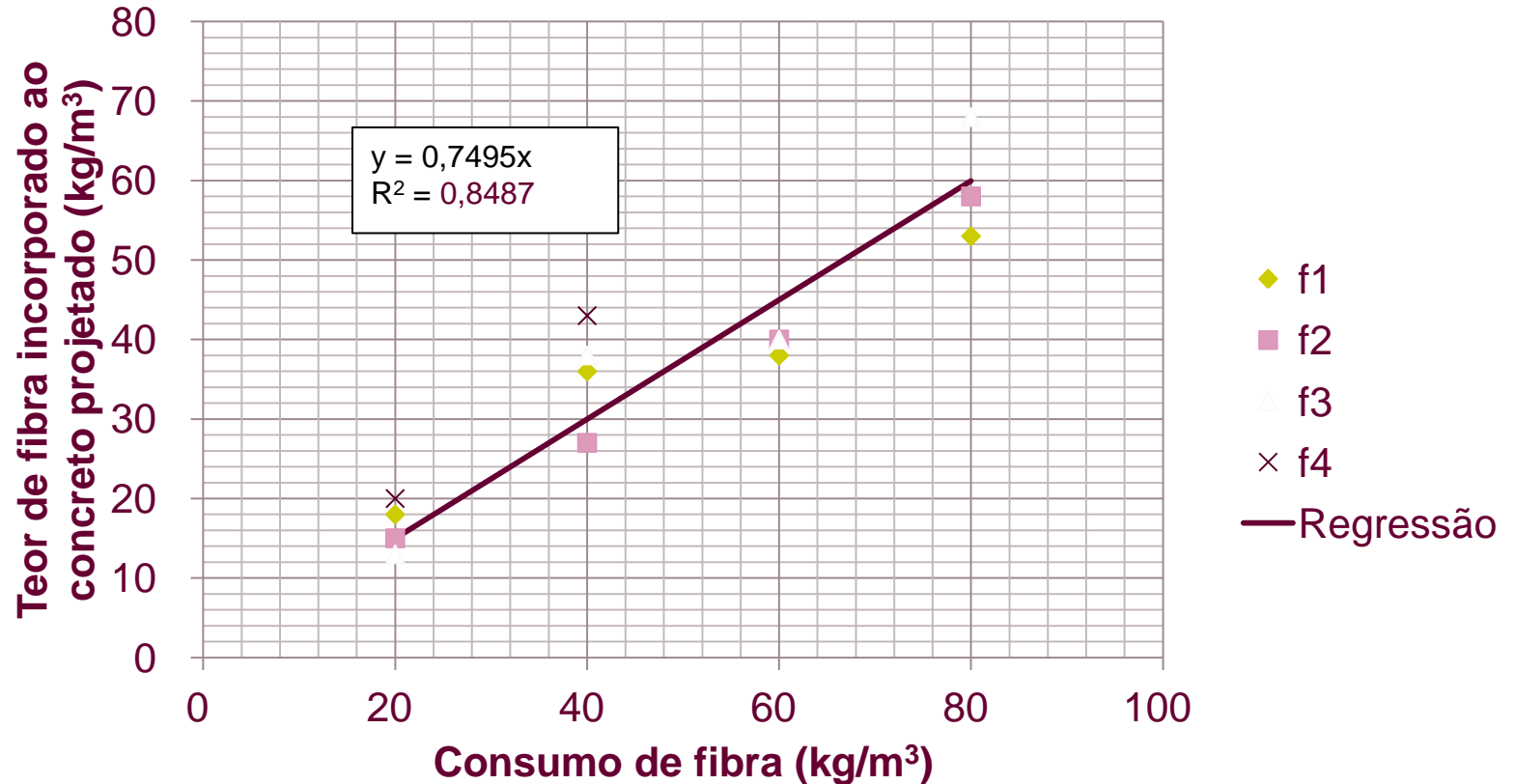
Evaluación en los tubos

Conclusiones:

- La diferencia de desempeño quedo más larga a favor de la fibra de acero (~triplo de la capacidad resistente pós-fissuración)
- Contenido para la resistencia residual de 40 kN?
 - Macrofibras de PP: 0,64% o 5,8 kg/m³
 - Fibras de acero: 0,22% o 17,3 kg/m³

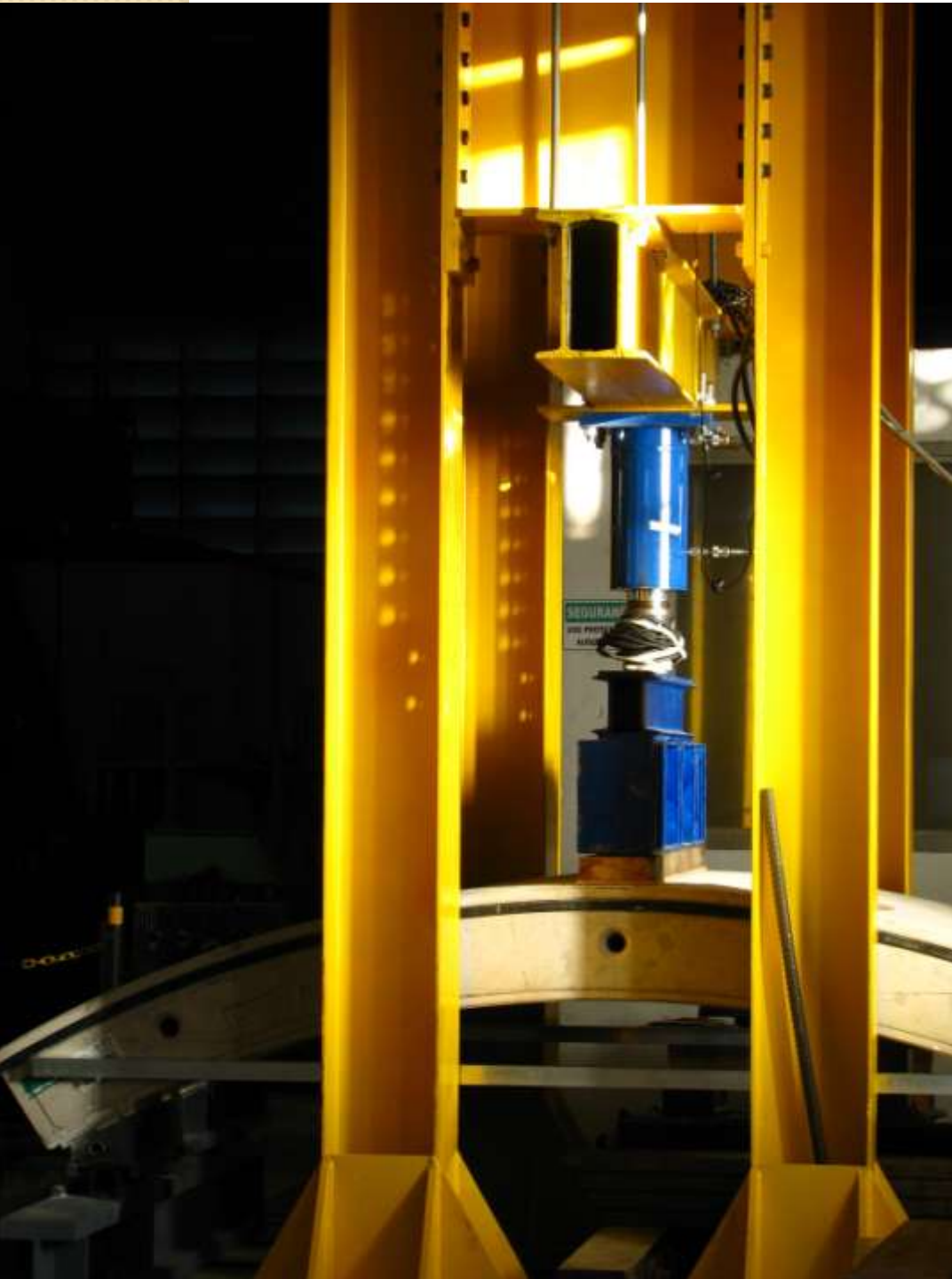
Otros ensayos: determinación del contenido de fibras

Figueiredo (1997)



Conclusiones

- Hay mucho que hacer:
- Hay una tendencia de aproximación con el “modelo europeo” en CT303, pero no absoluta:
 - Documentación general para materiales y ensayos.
 - Diseño específico: pavimentos, dovelas, hormigón proyectado, etc.
- Aumento de la confianza del público técnico en el HRF depende de profundizar conocimiento.



Gracias por la
atención

antonio.figueiredo@usp.br