



Análisis de la confiabilidad de las vigas de hormigón reforzado con fibras de acero en relación con los esfuerzos cortantes

Eng. M.Sc. Eduardo Pagnussat Titello (PPGEC-UFRGS)

Prof. Dr. Américo Campos Filho (PPGEC-UFRGS)

Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real
(PPGEO-PPGMC-FURG y PPGEC-UFRGS)

Montevideo, Abril de 2024

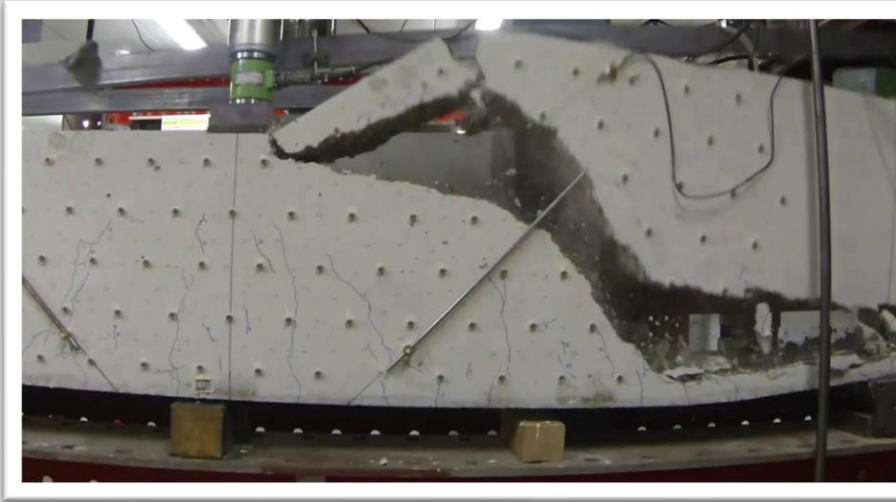
Estructura de la presentación

- Introducción;
- Hormigón reforzado con fibra de acero;
- Modelización computacional;
- Validación del modelo numérico;
- Confiabilidad estructural;
- Análisis de reemplazo de armaduras transversales;
- Consideraciones finales.

Introducción

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

- Esfuerzos cortantes:
- Falta de consenso sobre cómo funciona y cómo se dimensiona;
- ¡Debe evitarse la falla repentina!



(Fuente: Huber e Kollegger, 2013)



(Fuente: Parra-Montesinos *et al.*, 2010)

Introducción

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

Refuerzos transversales:

Estribos

- Refuerzo tradicional;
- Buen rendimiento;
- Vulnerable a la corrosión y a la fatiga.

Fibras de acero

- Fibras dispersas al azar;
- Material compuesto: CRFA;
- Ductilidad a la tracción;
- Control de grietas.

Ensayos experimentales: la sustitución es factible.

- Armaduras continuas;
- Envuelven la otra armadura;

- Transferencia de tensiones a través de las fibras;
- Interacción entre la matriz y las fibras.

¿El reemplazo es seguro?

Mecanismo de acción diferente: mayor dependencia del hormigón.

Confiabilidad estructural

Evaluación probabilística en la que se tienen en cuenta las incertidumbres.

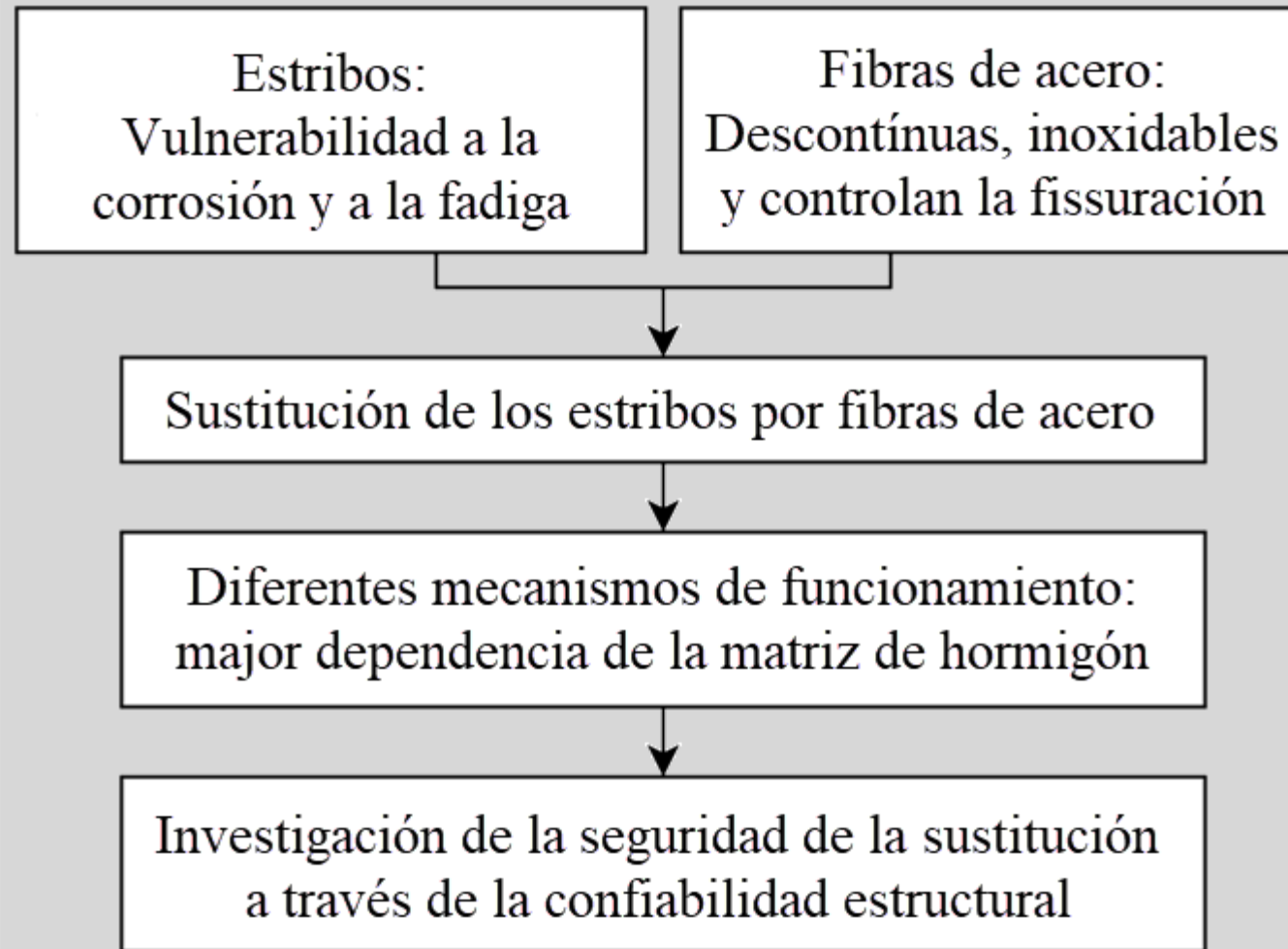
Introducción: Objetivos

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

- Verificar la posibilidad de sustitución total de la armadura transversal (estribos) de vigas de hormigón armado, por fibras de acero dispersas en la masa de hormigón, manteniendo la confiabilidad estructural;
- Desarrollo de una herramienta para realizar análisis de confiabilidad integrada con el software ANSYS;
- Construcción de un modelo elastoplástico para el CRFA.

Introducción: Justificación

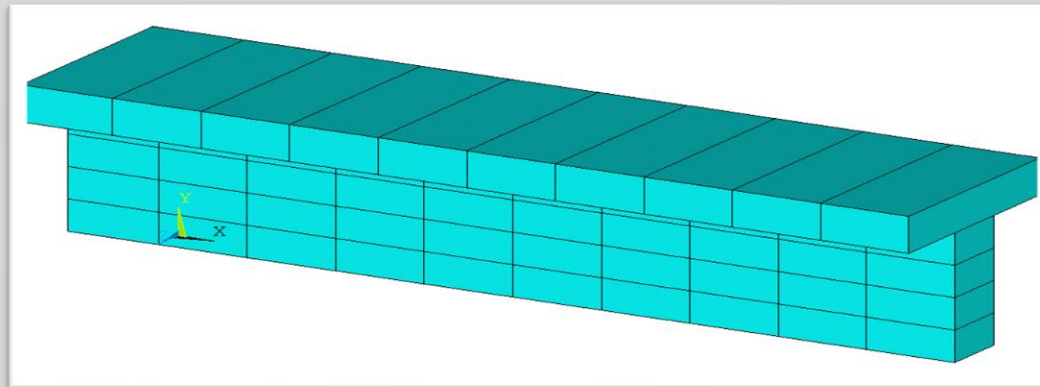
- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales



Introducción: Metodología

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

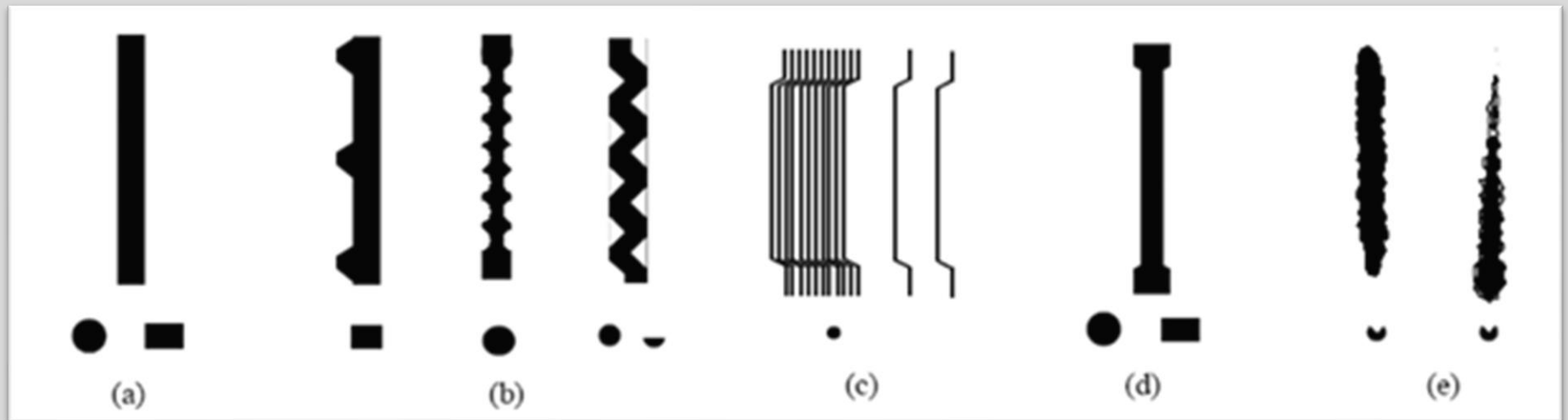
- Modelización numérica por FEM utilizando el software ANSYS:
 - Implementación de modelos constitutivos a través de usermat;
 - Validación a través de ensayos experimentales de la literatura;
- Construcción y validación de la herramienta de análisis de confiabilidad;
- Determinación de 9 vigas base:
 - Combinación de 3 hormigones y 3 relaciones de armadura a tracción;
 - Evaluación de las vigas base adoptando 5 armaduras transversales diferentes;
 - Análisis paramétrico para evaluar la posibilidad de sustitución.



Hormigón reforzado con fibra de acero

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

- Material compuesto: formado por **fibras** dispersas en una **matriz**;
- Propiedades de las fibras:
 - Mecánicas: módulo de elasticidad y resistencia;
 - Geométricas: forma, sección y longitud.

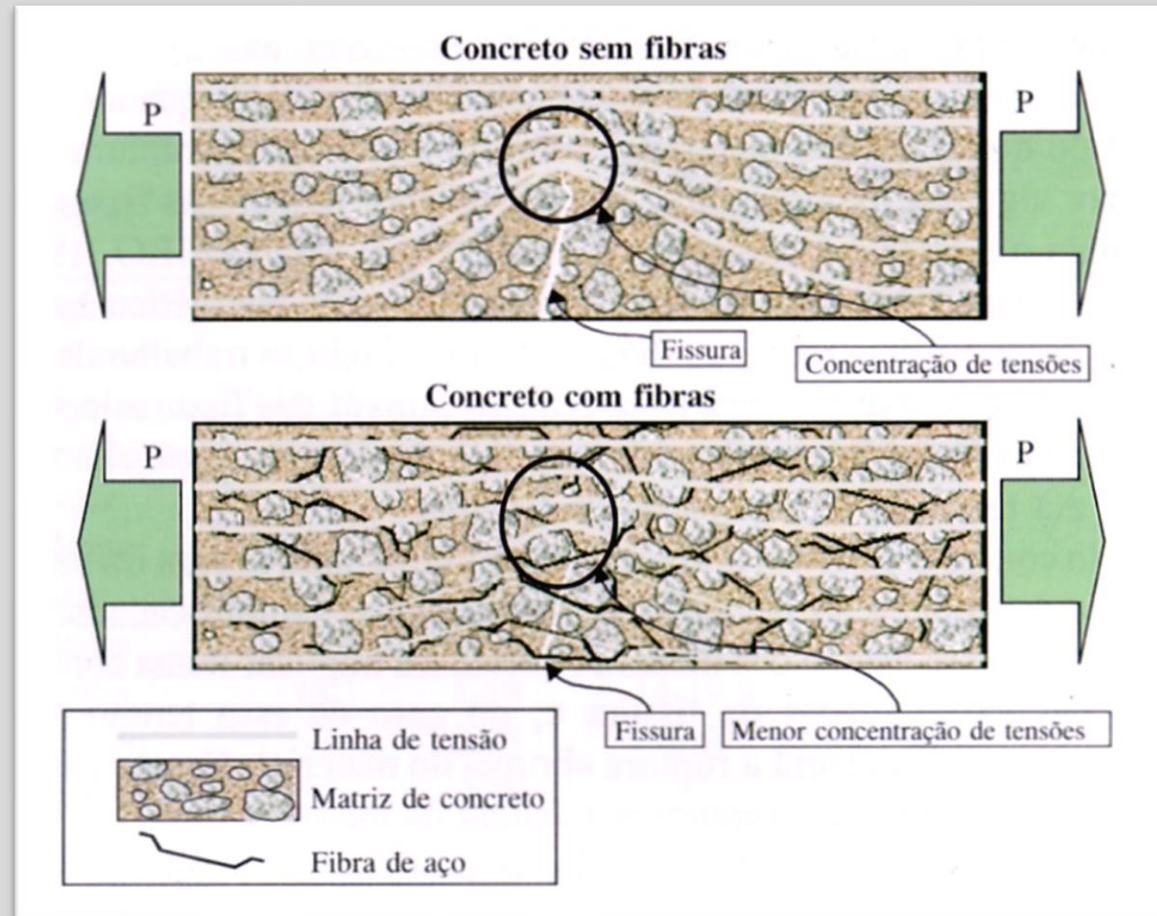


Tipos de fibras metálicas: a) rectas; (b) deformado/ondulado; c) anclados con ganchos; d) extremidades agrandadas; e) irregulares (Fuente: ACI 544.1R-96, 1996).

Hormigón reforzado con fibra de acero

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Fiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

- Mecanismos de acción de las fibras:
- No evitan que la matriz se agriete, sino que cosen las grietas;



(Fuente: Pasa, 2007)

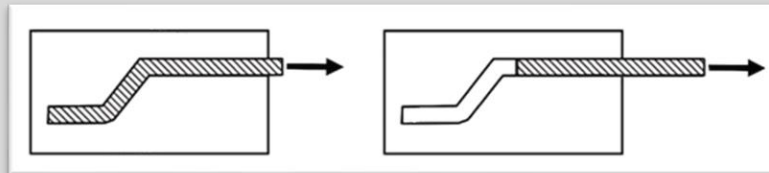
Hormigón reforzado con fibra de acero

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

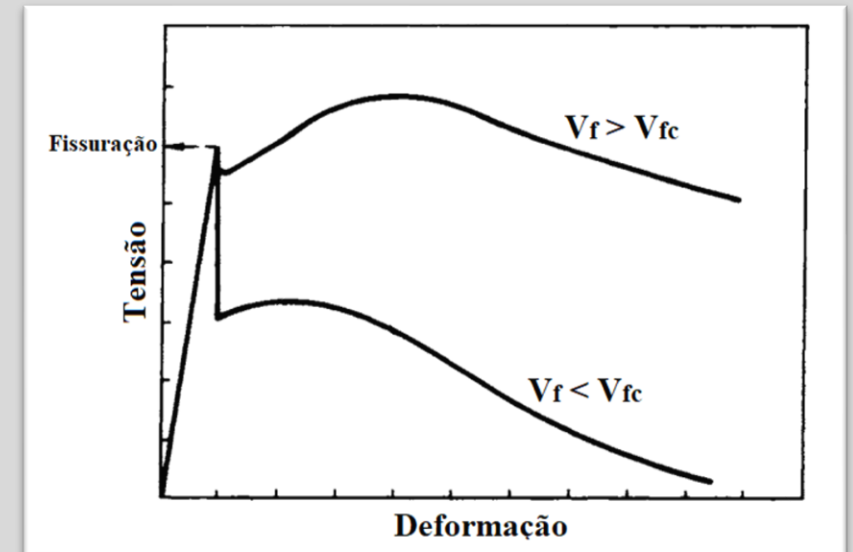
- Mecanismos de acción de las fibras:

- Interacción matriz-fibra:

- Responsable de la transferencia de tensiones;
 - Inicialmente elástico;
 - Desprendimiento progresivo de fibras: transferencia por fricción y anclaje.



- Volumen crítico de fibras;
 - Longitud crítica.



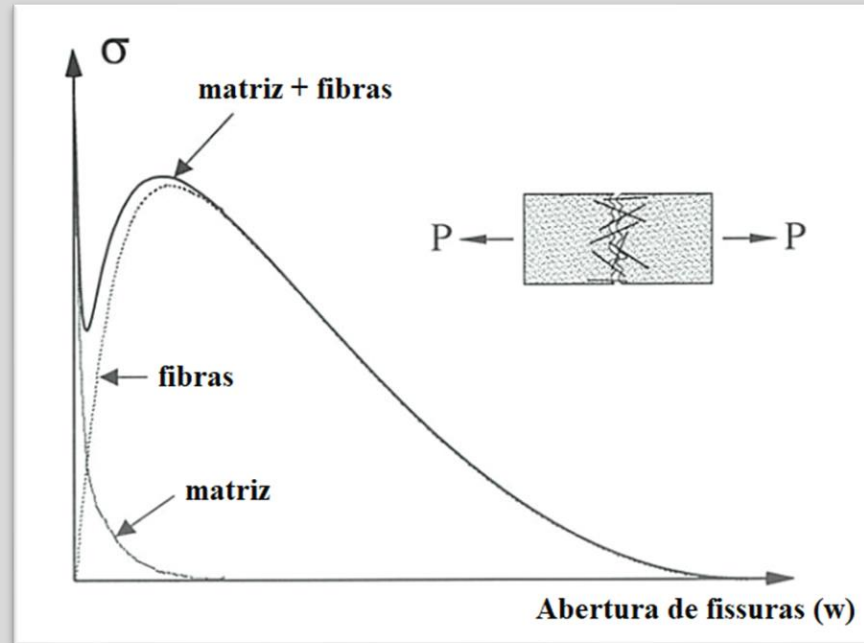
(Fonte: Lim, Paramasivam e Lee, 1987)

Hormigón reforzado con fibra de acero

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

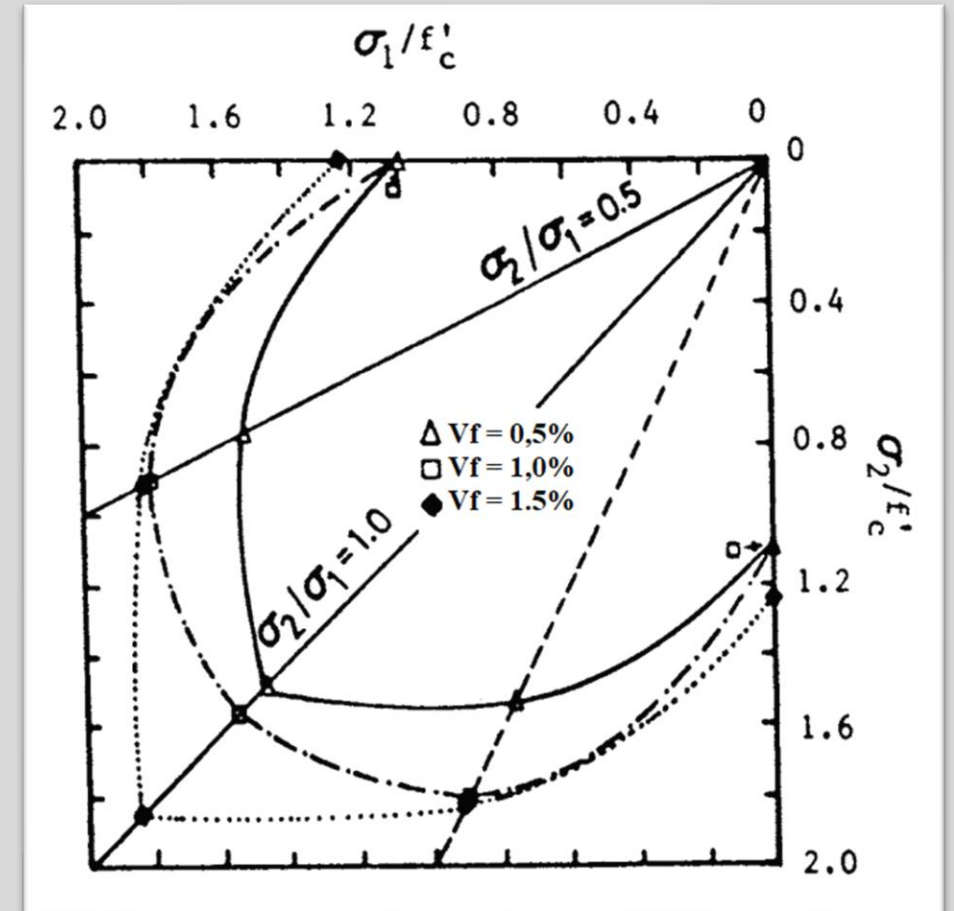
- Comportamiento mecánico del CRFA:

Tracción:



(baseado en: Voo y Foster, 2003)

Comprimido:

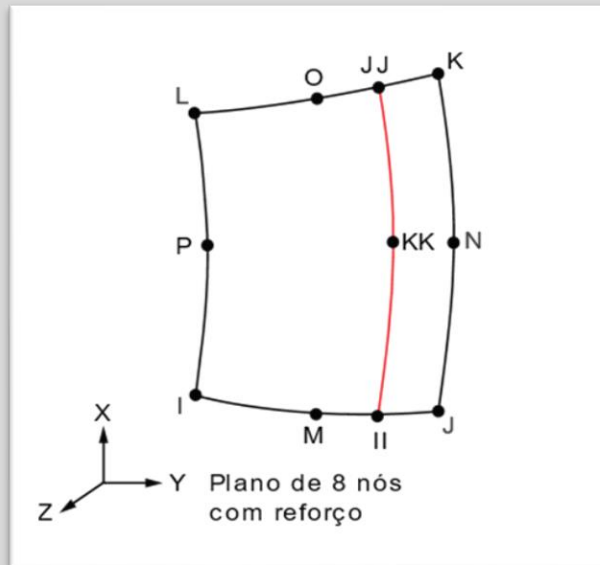


(Fuente: Traina y Mansour, 1991)

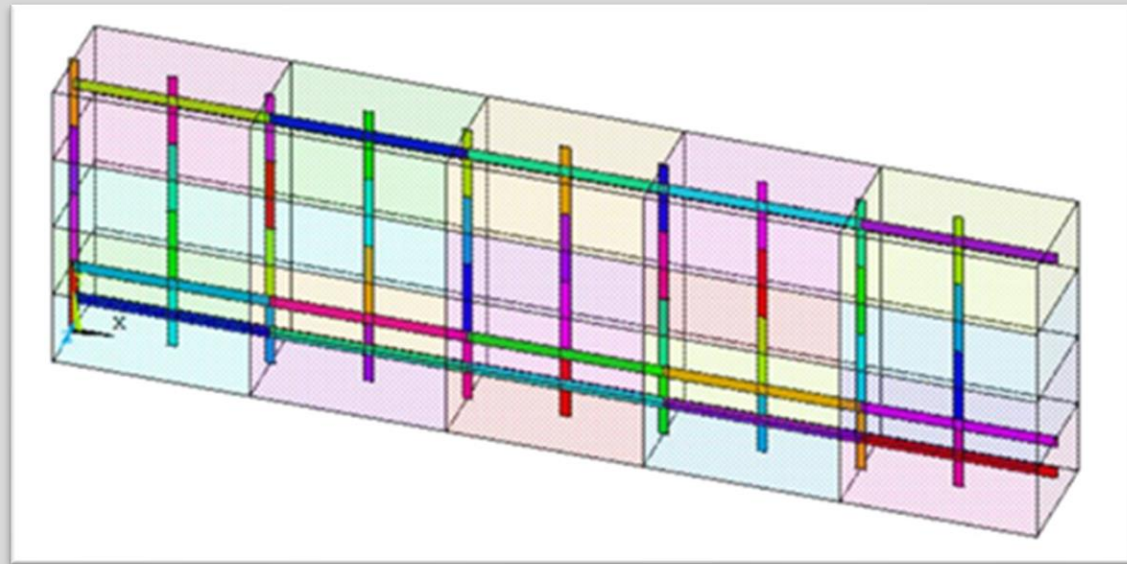
Modelado computacional

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

- Realizado por MEF a través del software ANSYS;
 - Discretización del continuo en una malla de elementos;
 - Aplicación de las leyes constitutivas y de las condiciones de contorno;
 - Representación matemática aproximada del medio continuo original;
- Elementos finitos utilizados: PLANE183 y REINF263.



(Fuente: ANSYS, 2019)

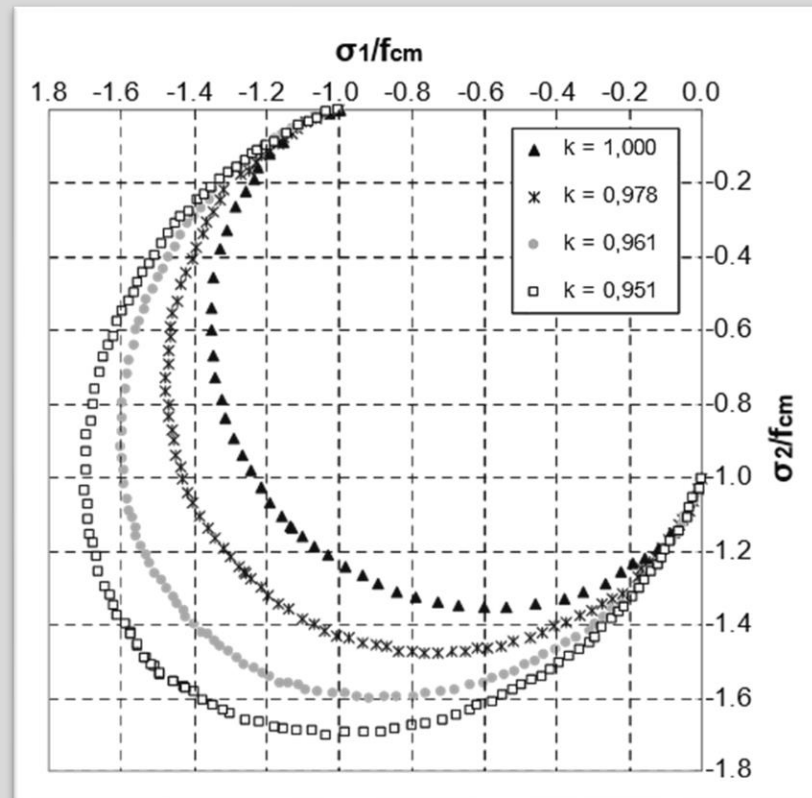


(Fuente: Lazzari, 2015)

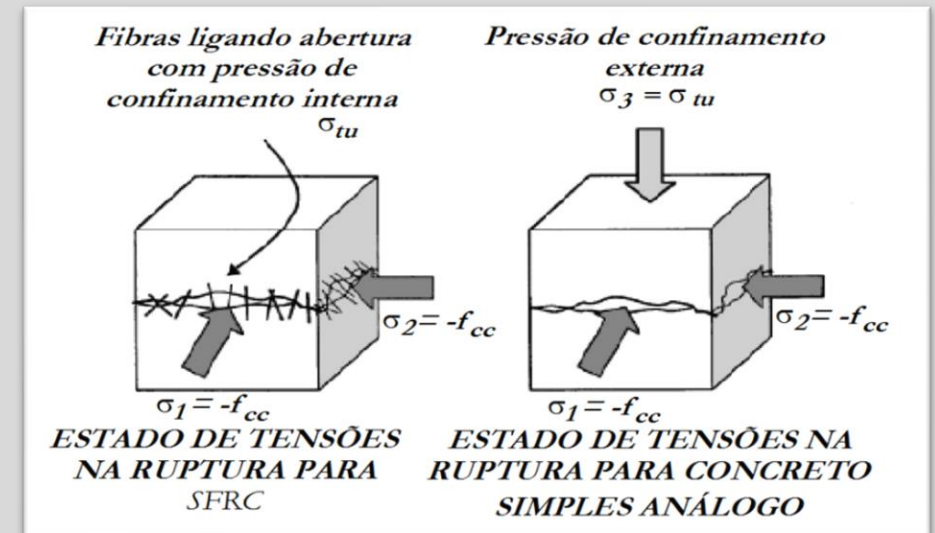
Modelado computacional

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Reflexiones finales

- Modelos constitutivos para hormigones comprimidos:
 - Criterios de ruptura:
 - Ottosen: para hormigón sin fibras;
 - Seow e Swaddiwudhipong: para el CRFA.



(Fuente: Pasa, 2007)

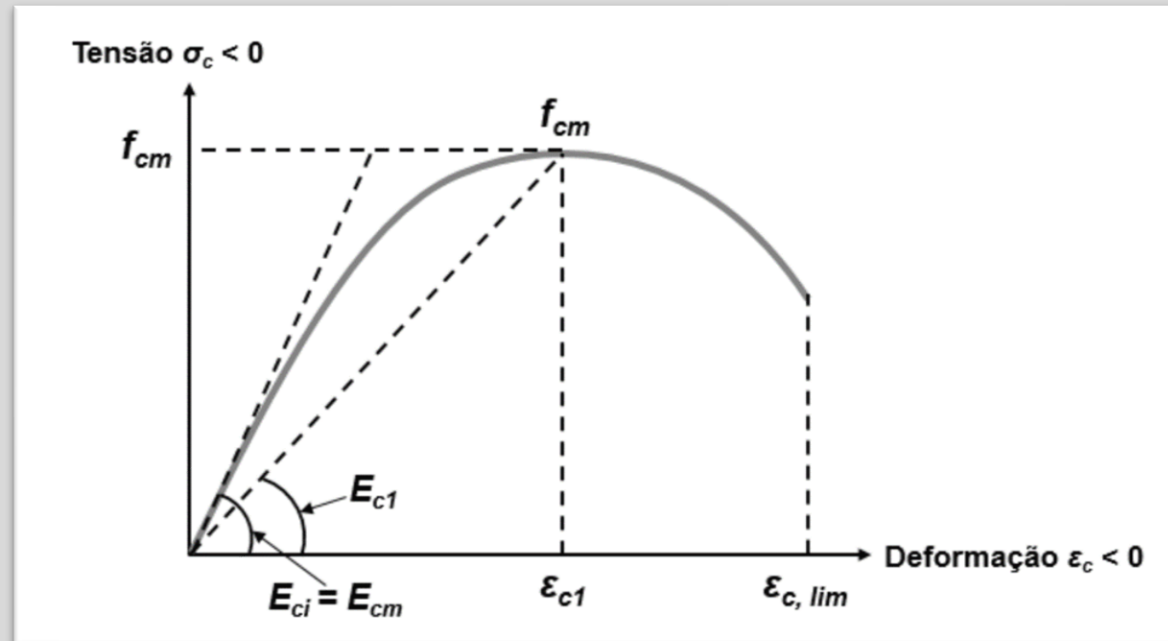


(Fuente: Pasa, 2007)

Modelado Computacional

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

- Modelos constitutivos para hormigones comprimidos:
 - Criterios de plastificación:
 - Endurecimiento isotrópico;
 - Plasticidad asociada;
 - Leyes de endurecimiento: propuestas en el MC2010.

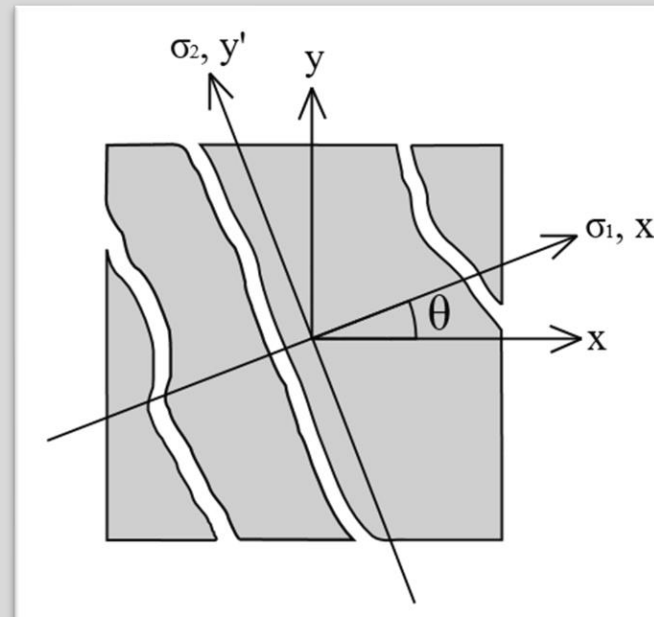


(baseado en el MC2010)

Modelado computacional

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Fiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

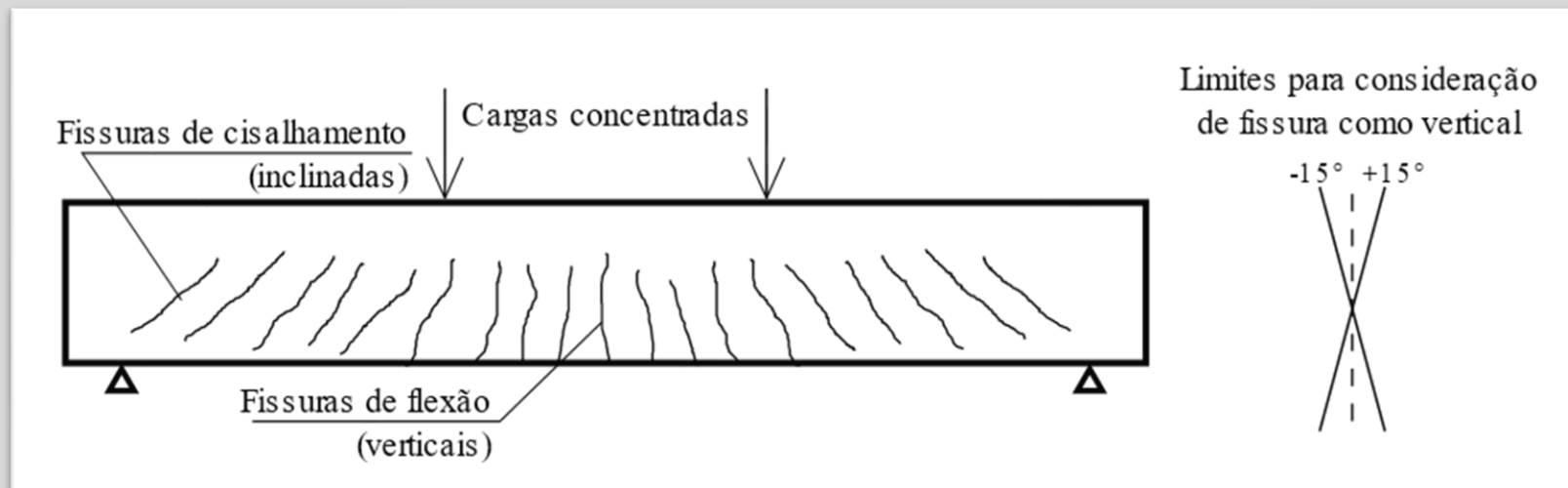
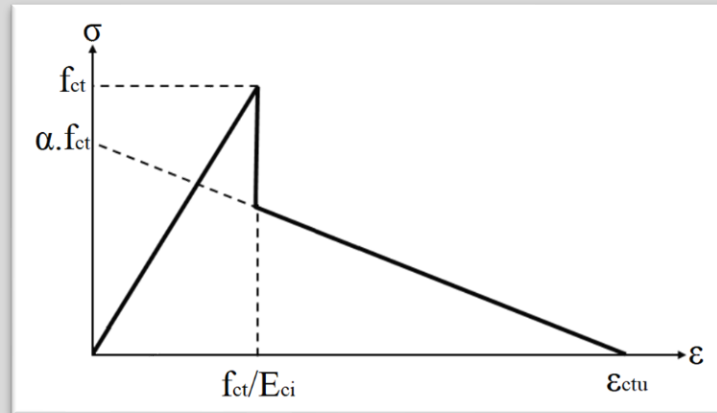
- Modelos constitutivos para hormigones traccionados:
 - Comportamiento elástico-lineal hasta el agrietamiento;
 - Modelo de grietas distribuidas:
 - No requiere cambios en la malla;
 - El daño se introduce en las propiedades mecánicas del hormigón;
 - La rigidez transversal se controla mediante la apertura de las grietas.



Modelado computacional

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Fiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

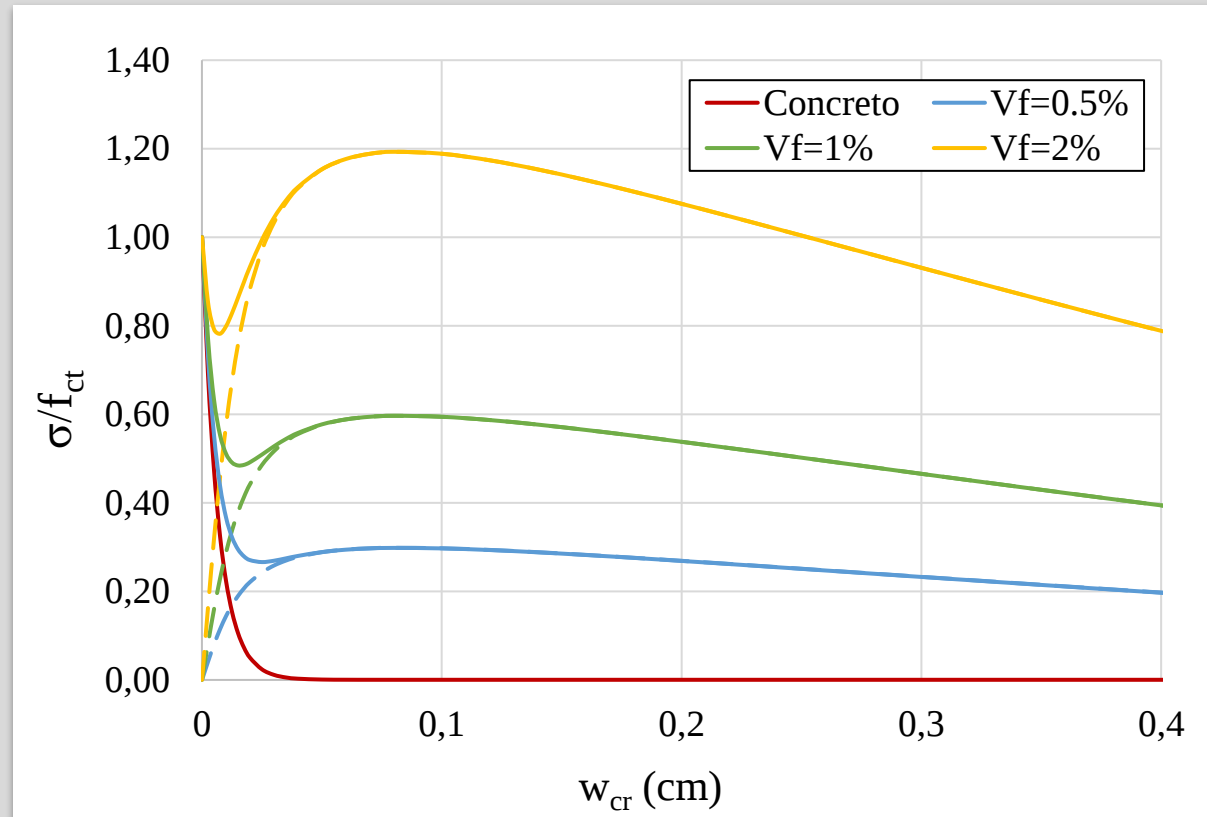
- Modelos constitutivos para hormigones traccionados:
 - Hórmigon armado: *tension-stiffening*:



Modelado computacional

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

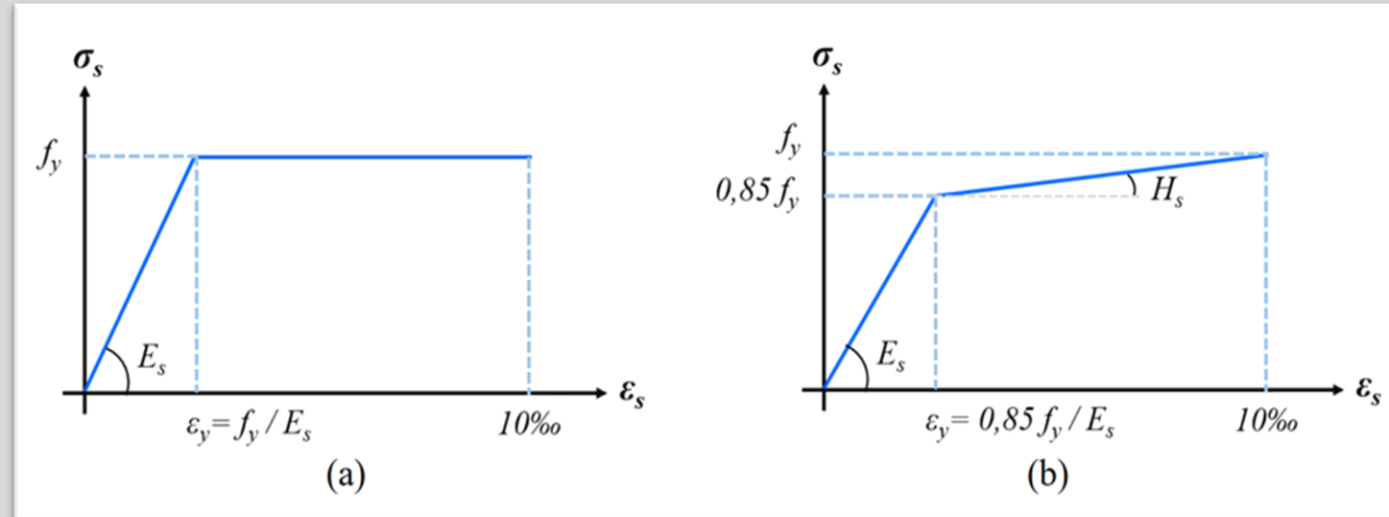
- Modelos constitutivos para hormigones traccionados:
 - CRFA: *tension-stiffening* y aporte de las fibras;
 - Apertura de grietas por tensión: $w_{cr} = l_c \cdot \varepsilon$



Modelado computacional

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

- Modelos constitutivos para el refuerzo:
 - Modelos bilineares:
 - Elastoplástico perfecto;
 - Elastoplástico con endurecimiento.

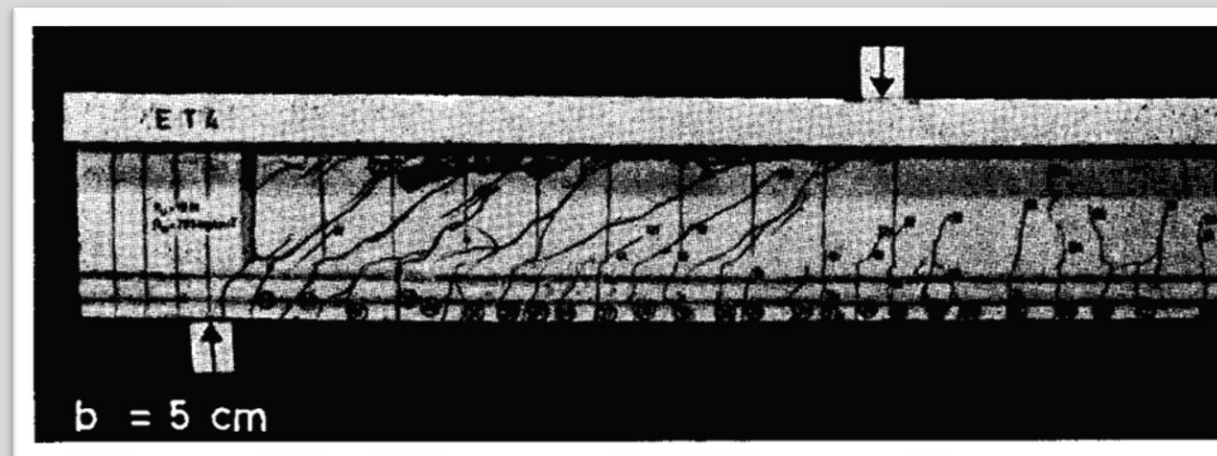


(Fuente: Lazzari, 2016)

Validación de modelos numéricos

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

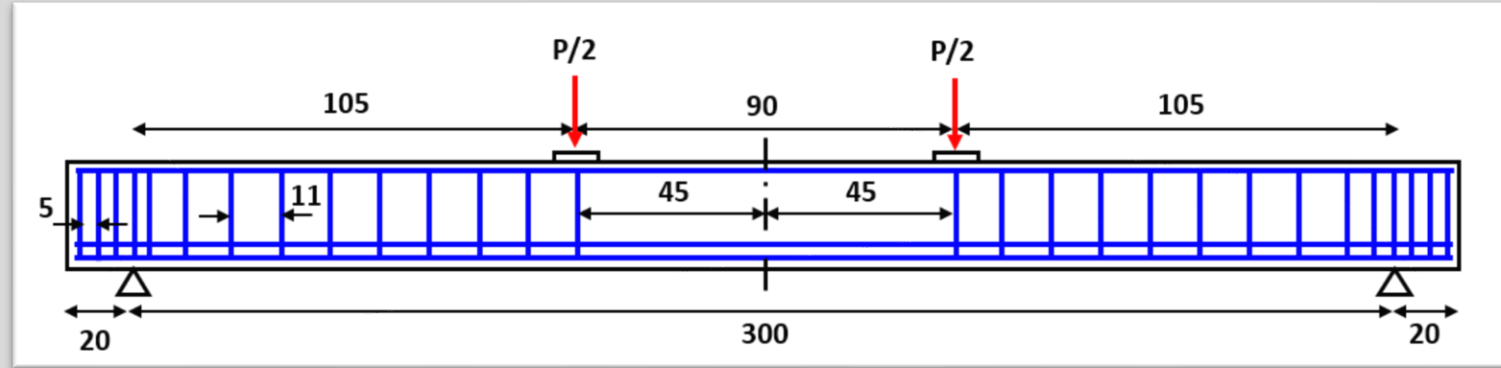
- Ensayos de tracción y compresión uniaxiales y biaxiales;
- Modelización numérica de ensayos experimentales:
 - Leonhardt e Walther (1962);
 - Lim e Oh (1999);
 - Kovács e Balázs (2003).
- Cambio de tolerancia a 2/3 de la carga;
- Valor estimado de l_c para CRFA.



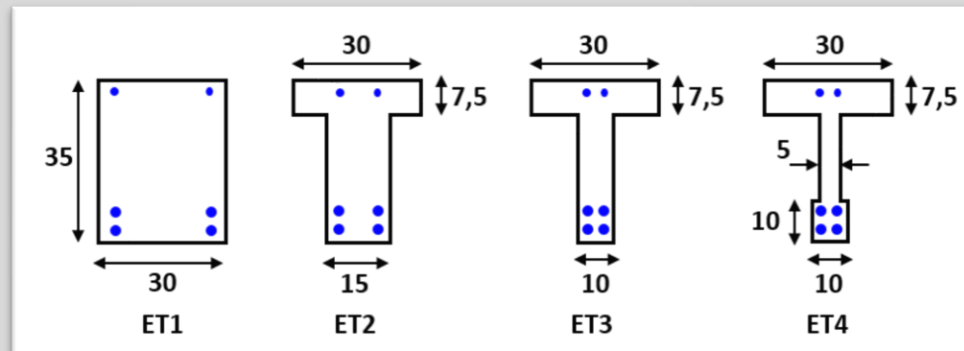
(Fuente: Leonhardt e Walther, 1962)

Validación de modelos numéricos

- Vigas Leonhardt e Walther (1962):



(Fuente: Lazzari, 2016)



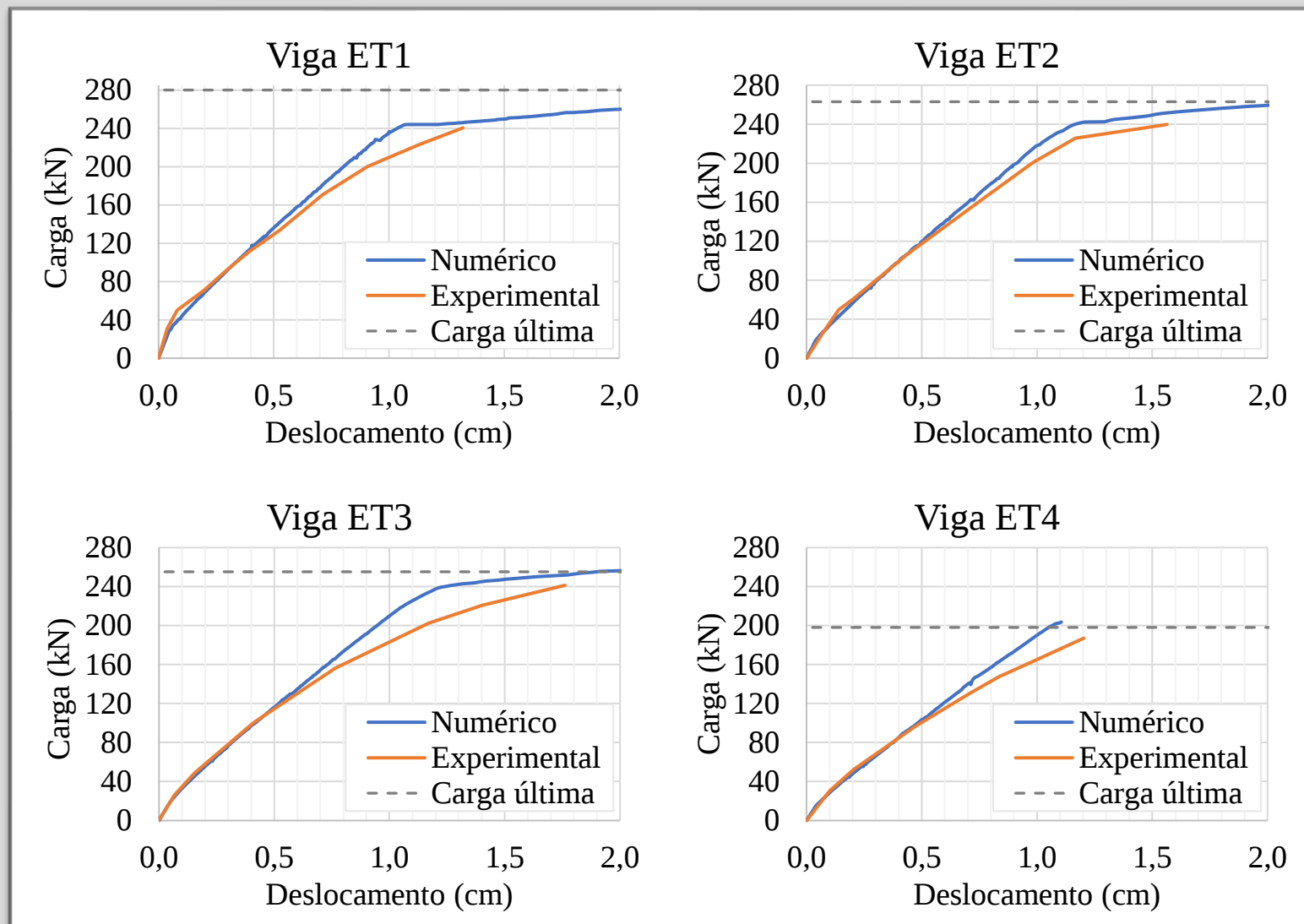
(Fuente: Lazzari, 2016)

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

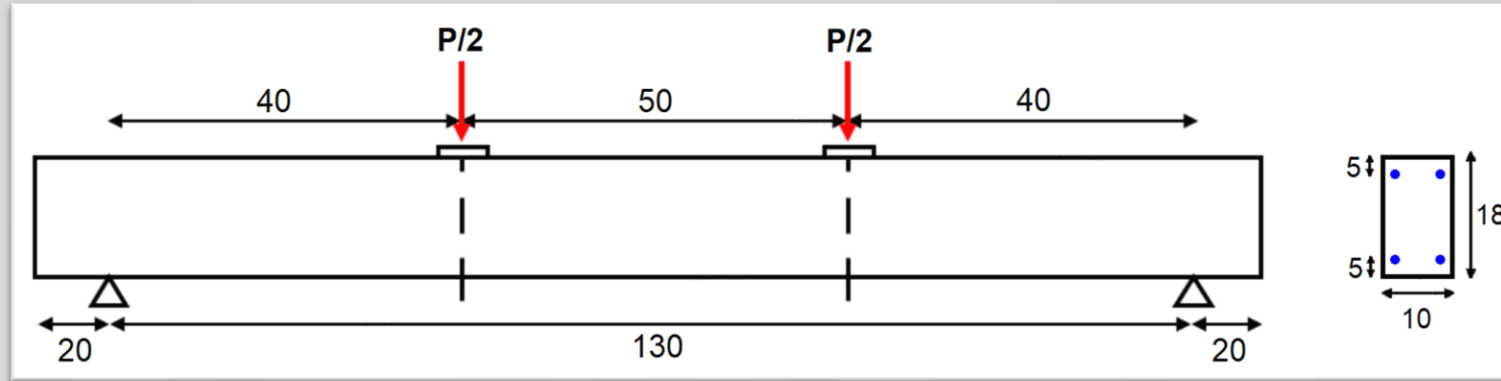
Validación de modelos numéricos

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

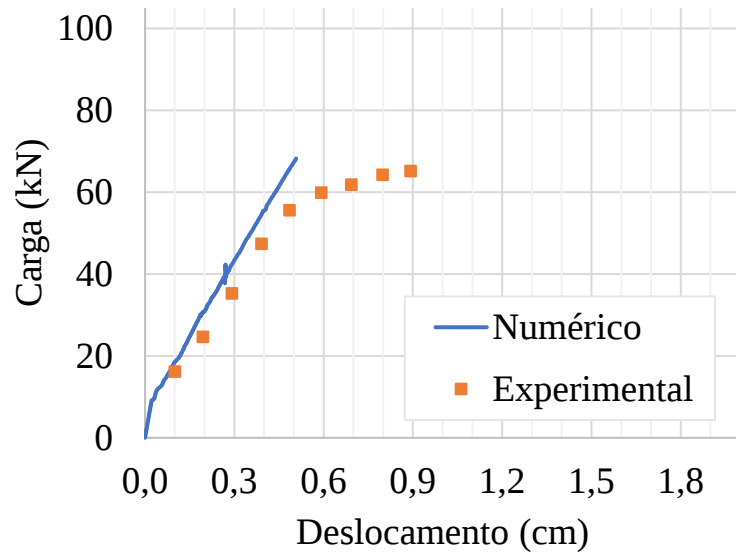
- Vigas Leonhardt e Walther (1962):



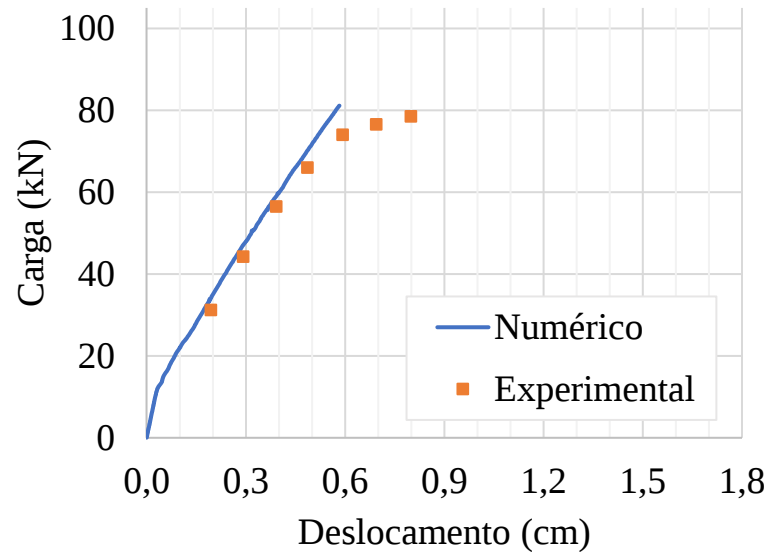
- Vigas de Lim e Oh (1999):



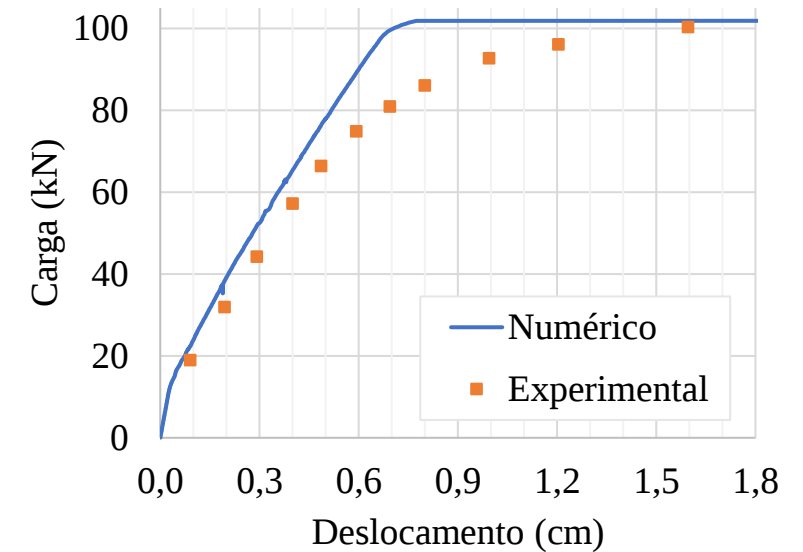
Viga S0F0



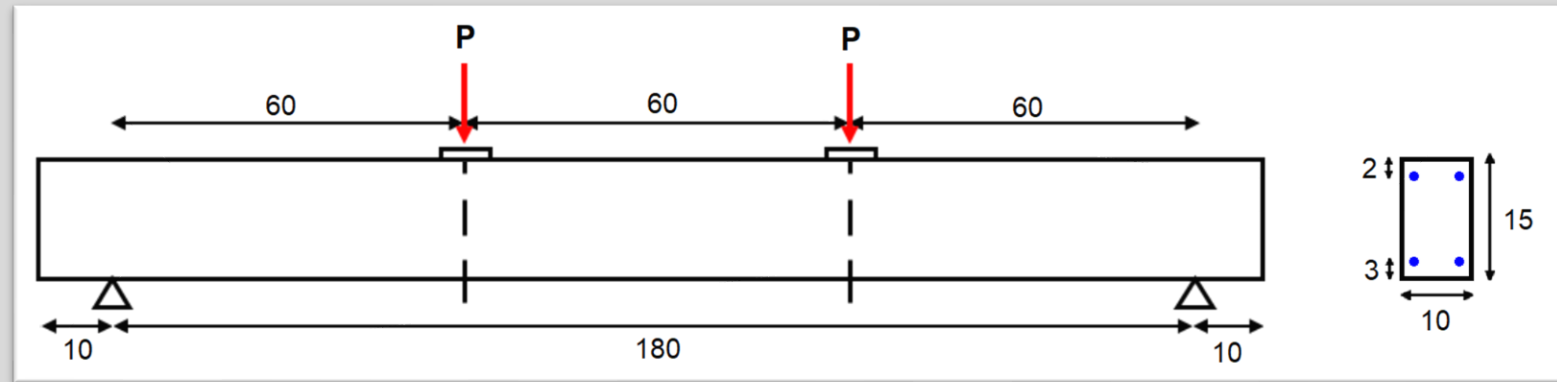
Viga S0F1



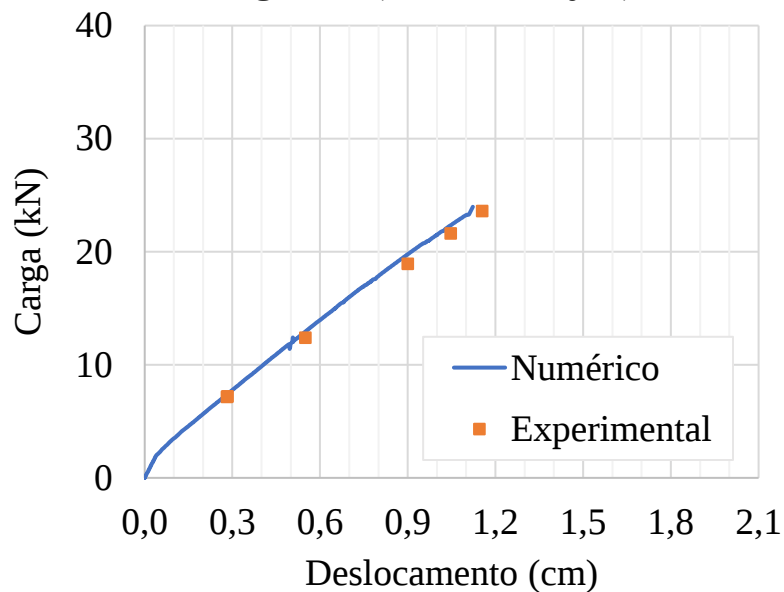
Viga S0F2



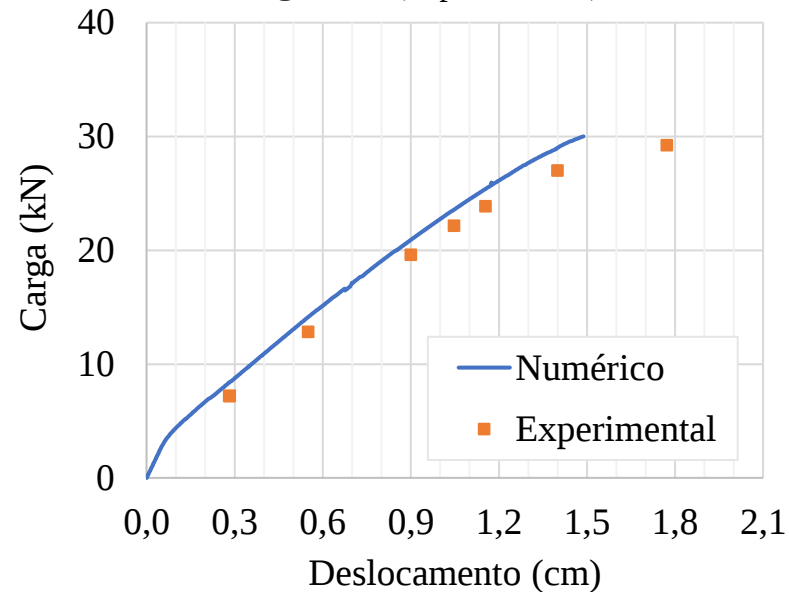
- Vigas de Kovács e Balázs (2003):



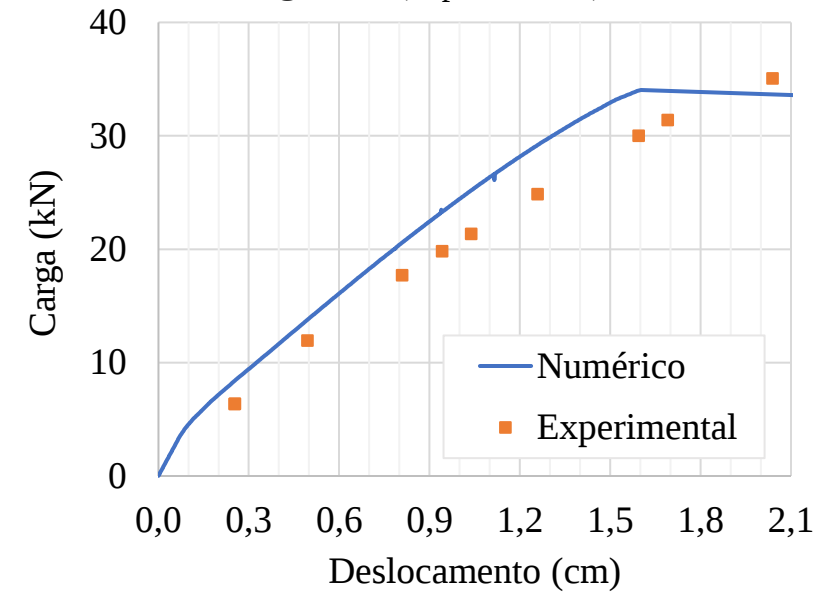
Viga A1 (Sem reforços)



Viga A2 ($V_f = 0,5\%$)



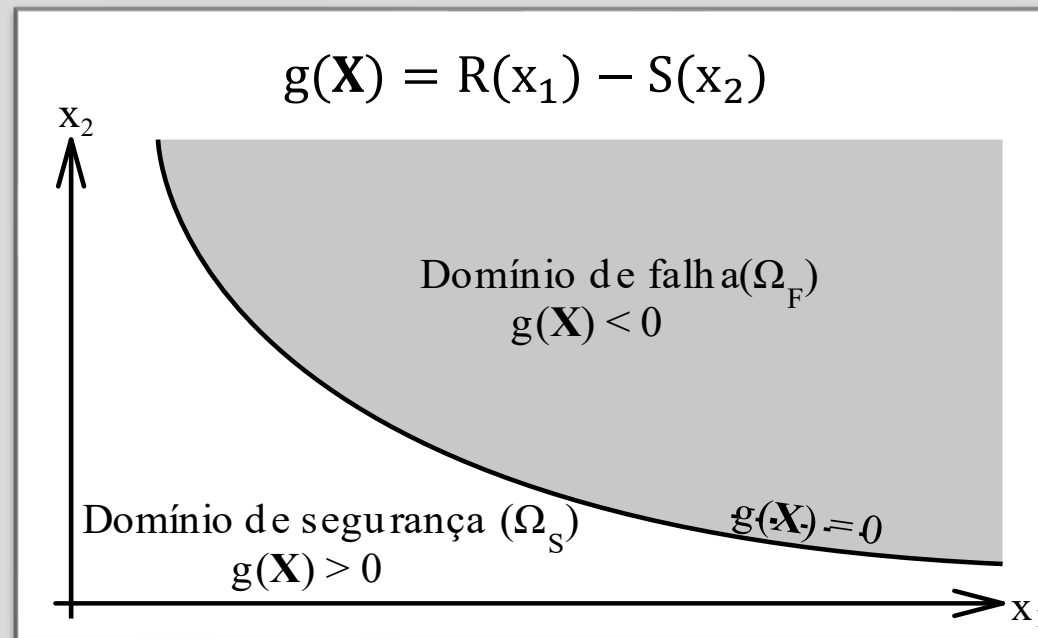
Viga A3 ($V_f = 1,0\%$)



Confiabilidad estructural

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

- Confianza en que un elemento cumplirá su función;
- Caracterización del problema:
 - Distribuciones de probabilidad;
 - Correlación entre variables;
 - Función de estado limite: $g(\mathbf{X}) = \theta_R P_R - \theta_S (G + Q)$

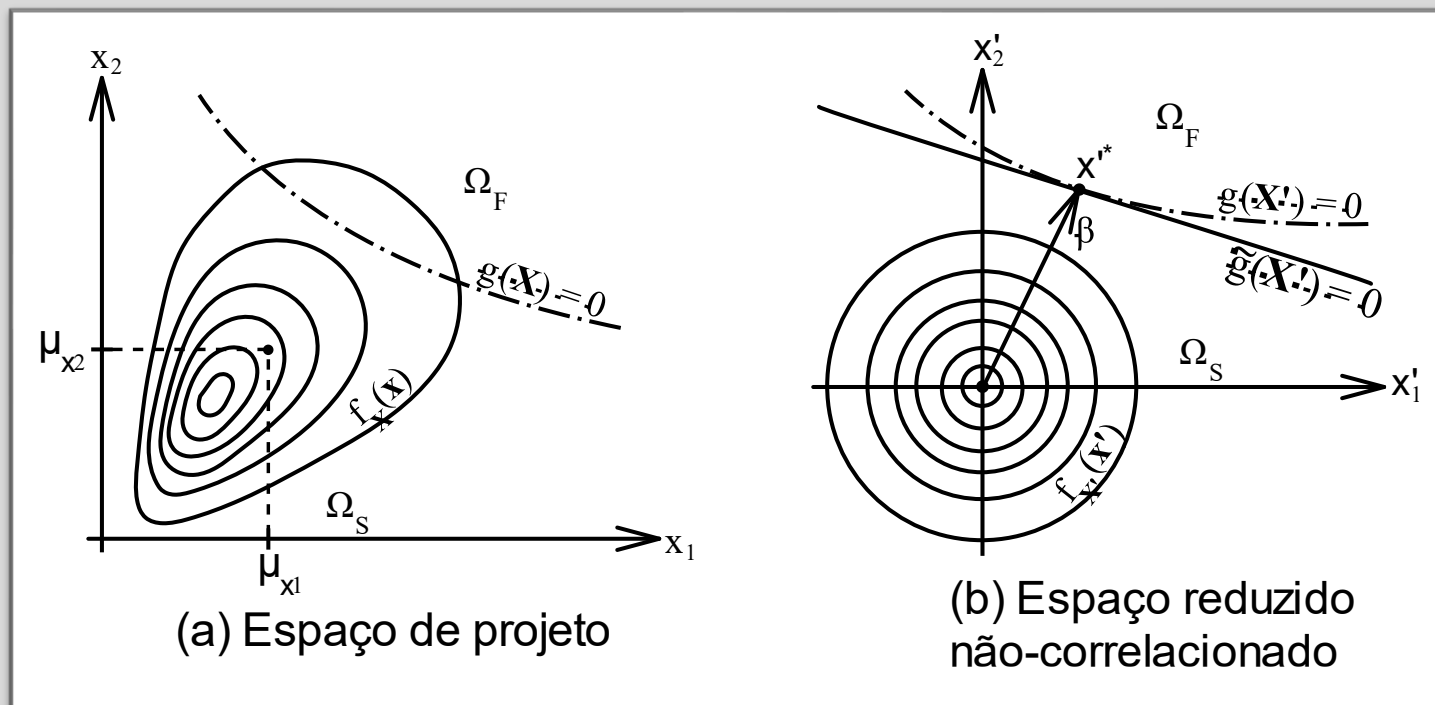


Confiabilidade estrutural

- Introdução
- Hormigón reforçado com fibra de aço
- Modelado computacional
- Validação de modelos numéricos
- Confiabilidade estrutural
- Análisis de substitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

• Método FORM:

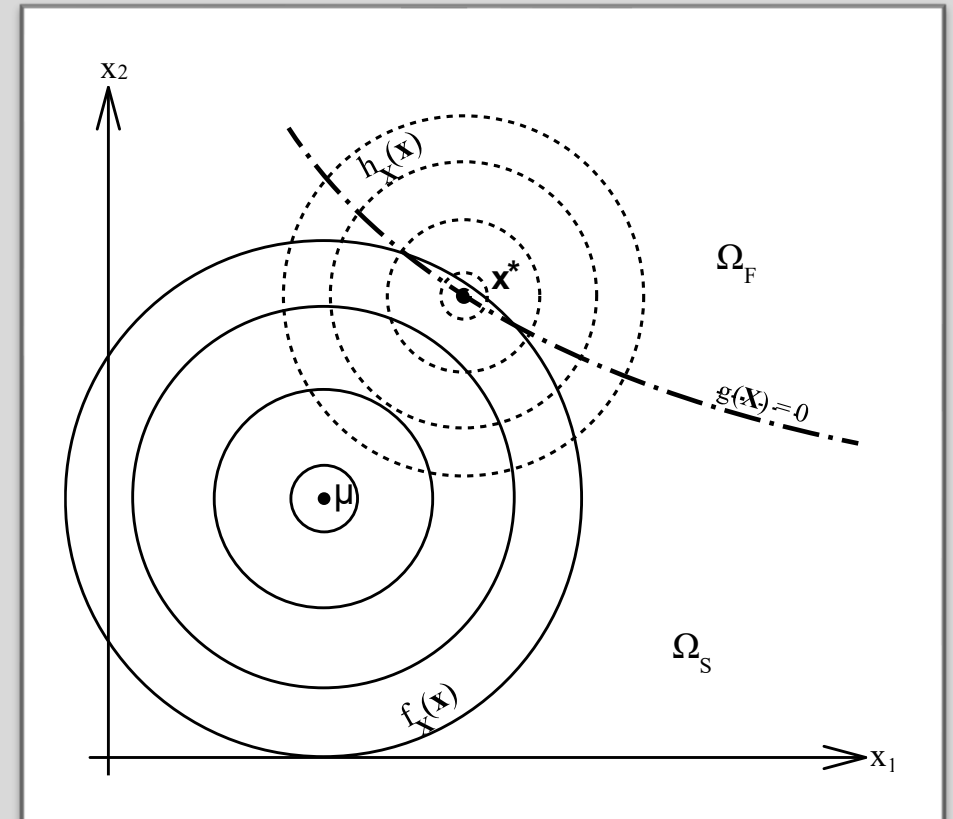
- Enfoque de primer orden;
- Método de transformação;
- Índice de confiabilidade $\beta - p_f$;
- Algoritmos de solución: HLRF y iHLRF.



Confiabilidad estructural

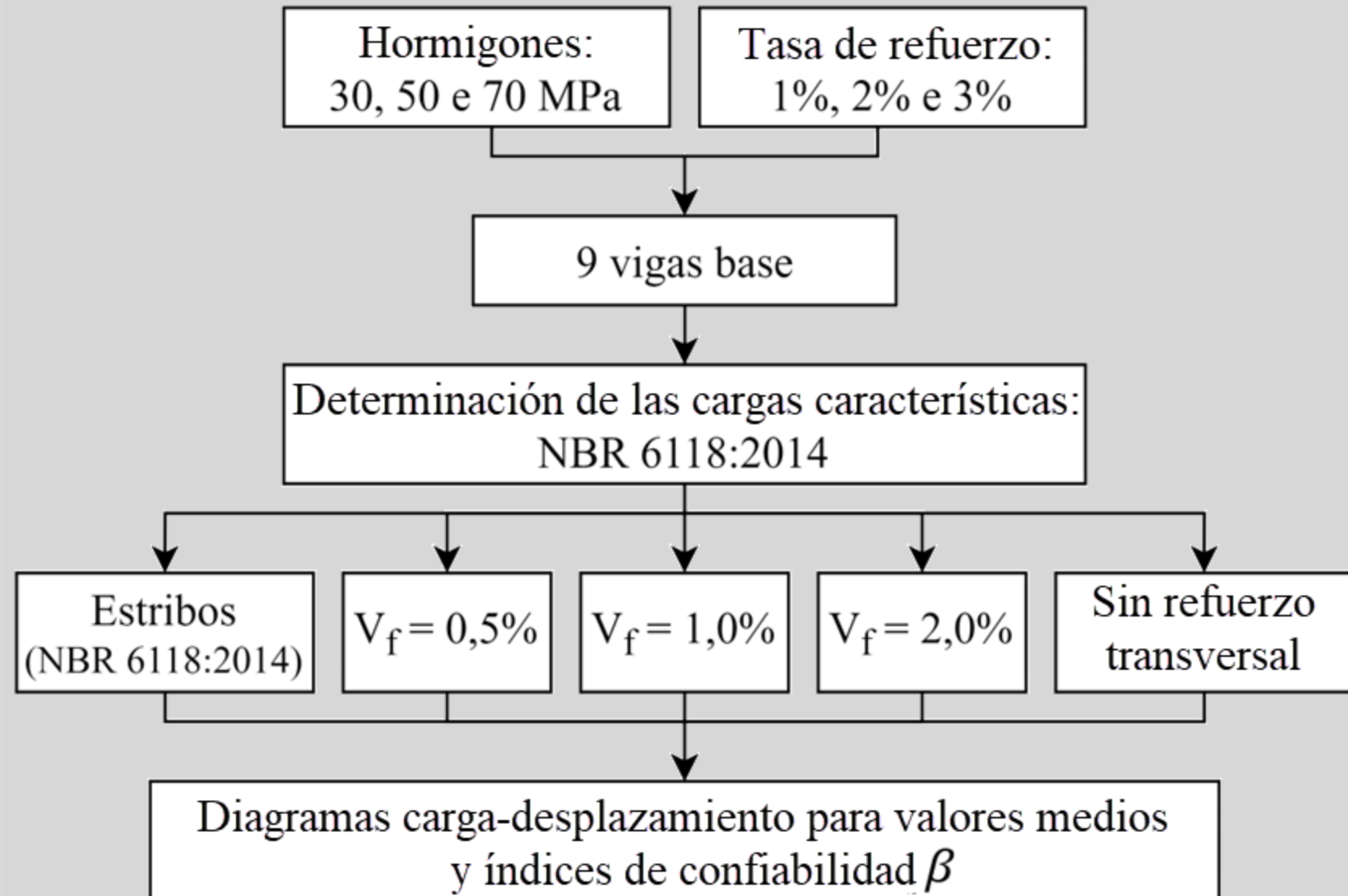
- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

- Método de Monte Carlo:
 - Evaluar el modelo repetidamente para valores aleatorios;
 - Muestreo directo:
 - Alto número de simulaciones;
 - Muestreo por Importancia:
 - Aumento de la eficiencia;
 - Valores generados en la región de interés;
 - Ponderación en el recuento de fallas;
 - **Conocimiento del punto de muestreo.**



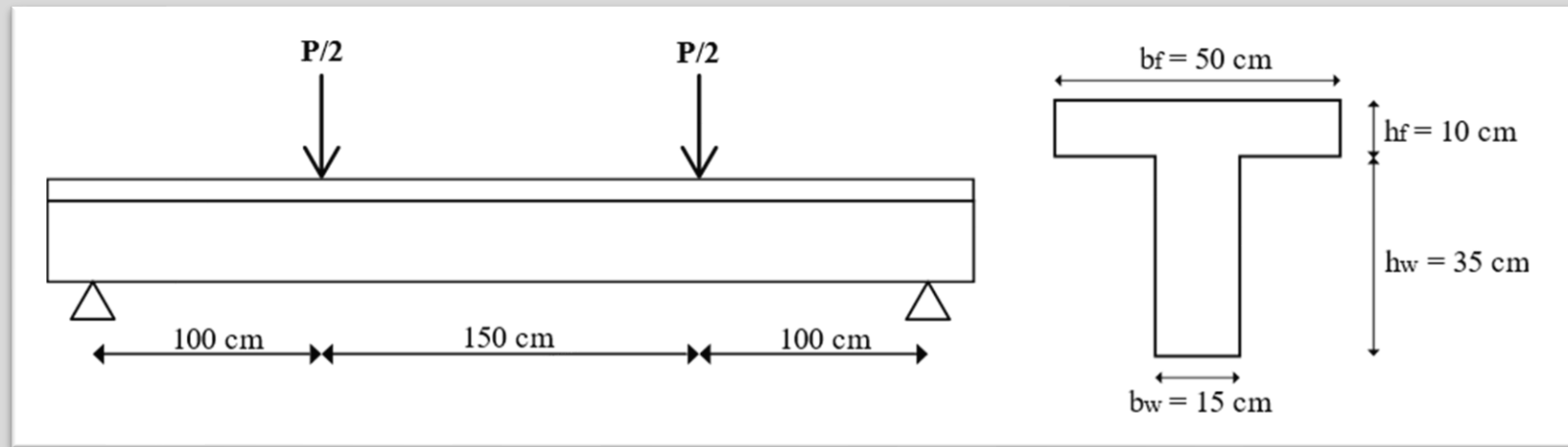
Análisis de sustitución de armaduras transversales

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales



Análisis de la sustitución de la armadura transversal

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales



- Malla con 5 elementos en la altura y 10 en media longitud de la viga;
- Carga en dos pasos ($2/3P_u + 1/3P_u$);
- La carga de ruptura se estimó inicialmente en unas 2x la carga característica, con incrementos del 25% al 50% dependiendo del contenido de fibra;
- Verificación del modo de falla:
 - Fluencia del refuerzo longitudinal;
 - Rotura por esfuerzo cortante.

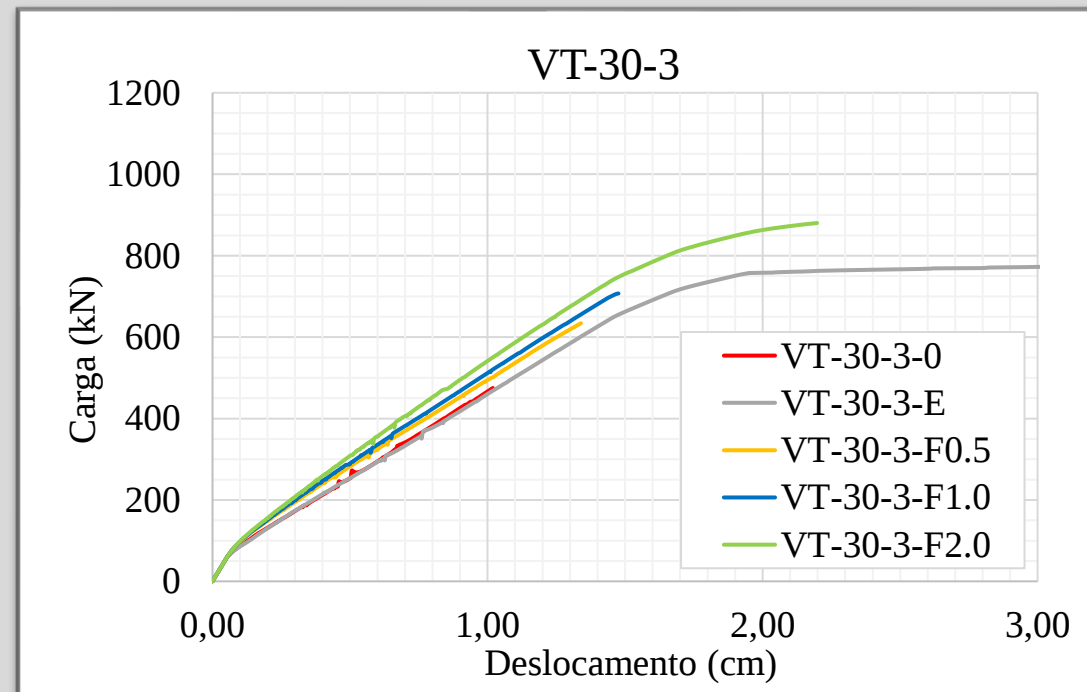
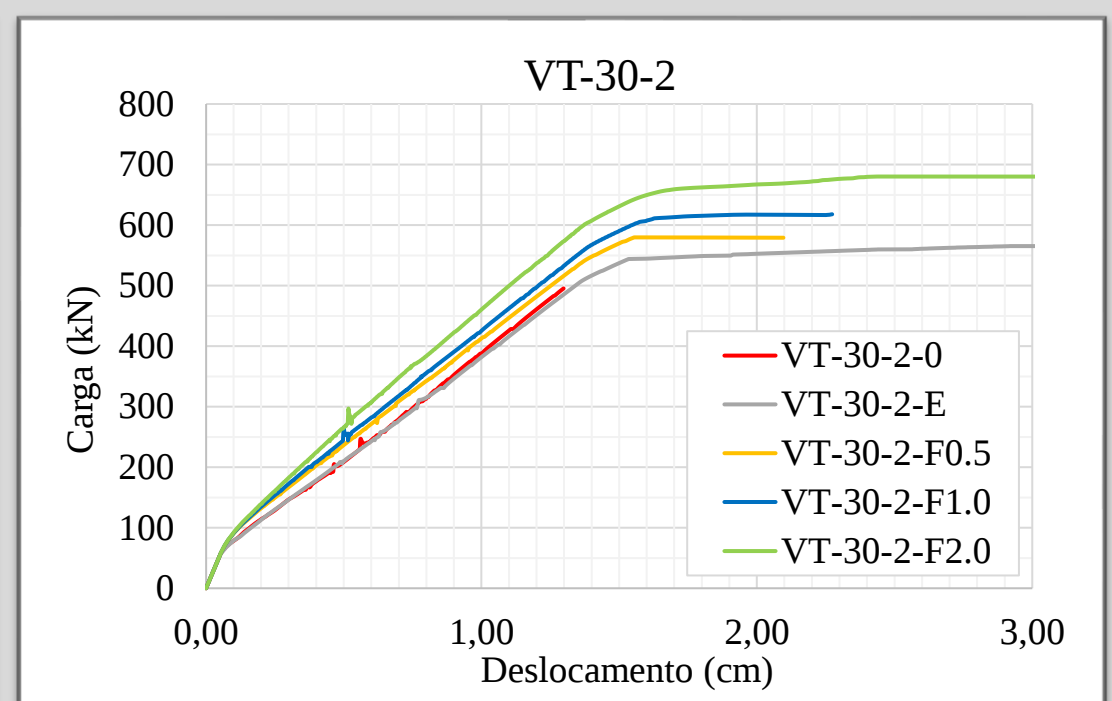
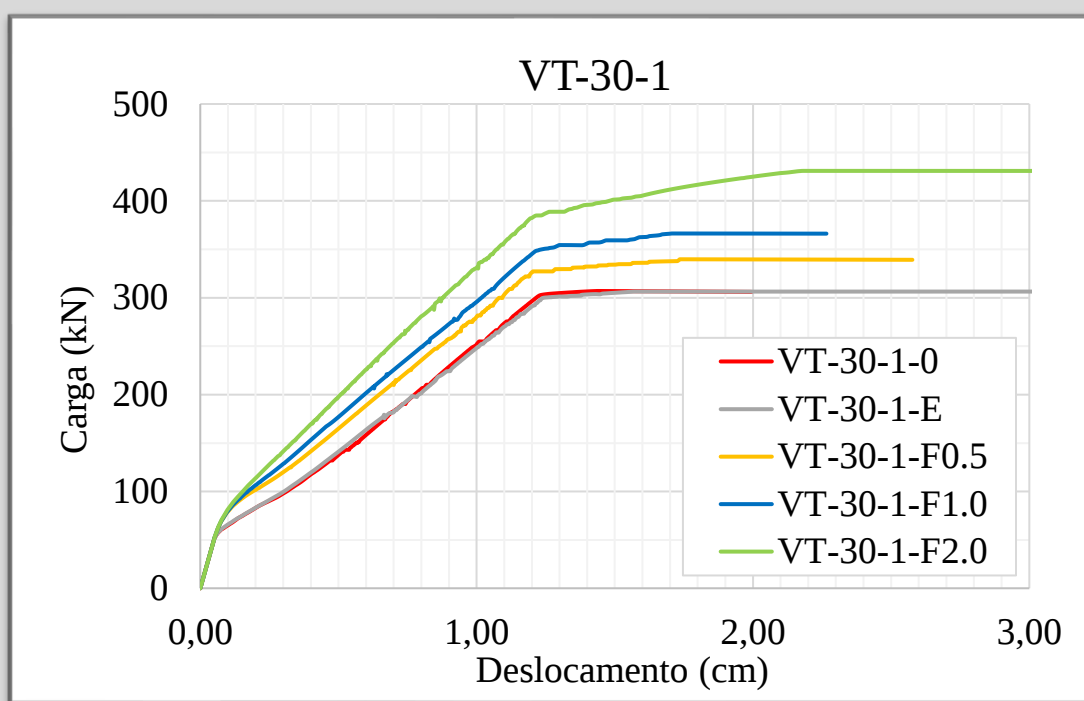
Análisis de la sustitución de la armadura transversal

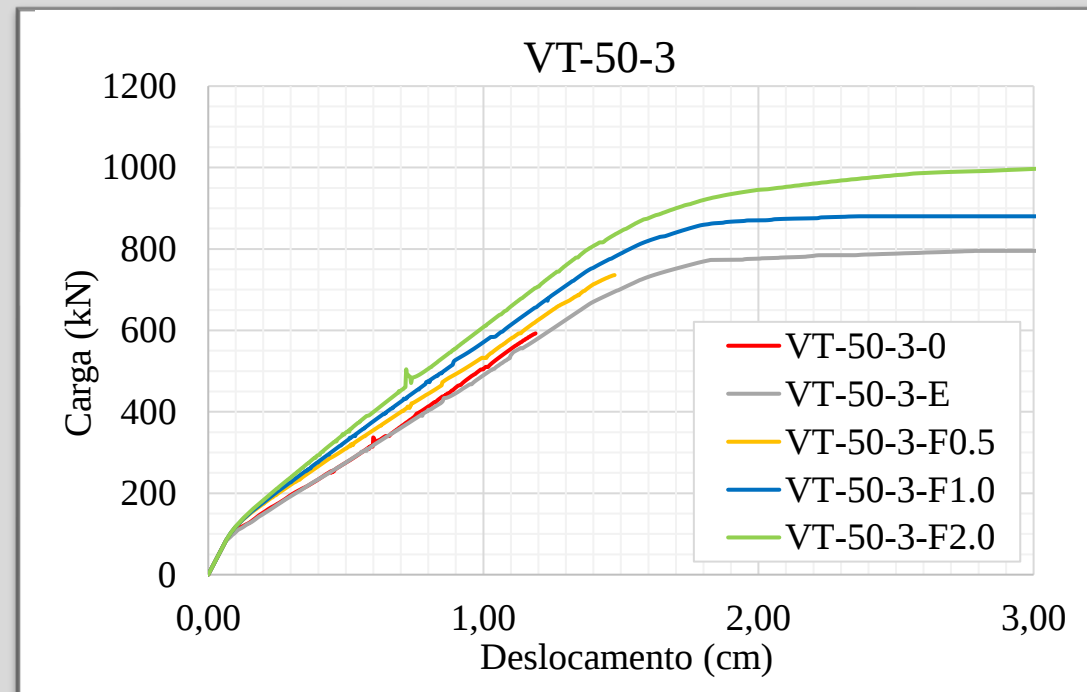
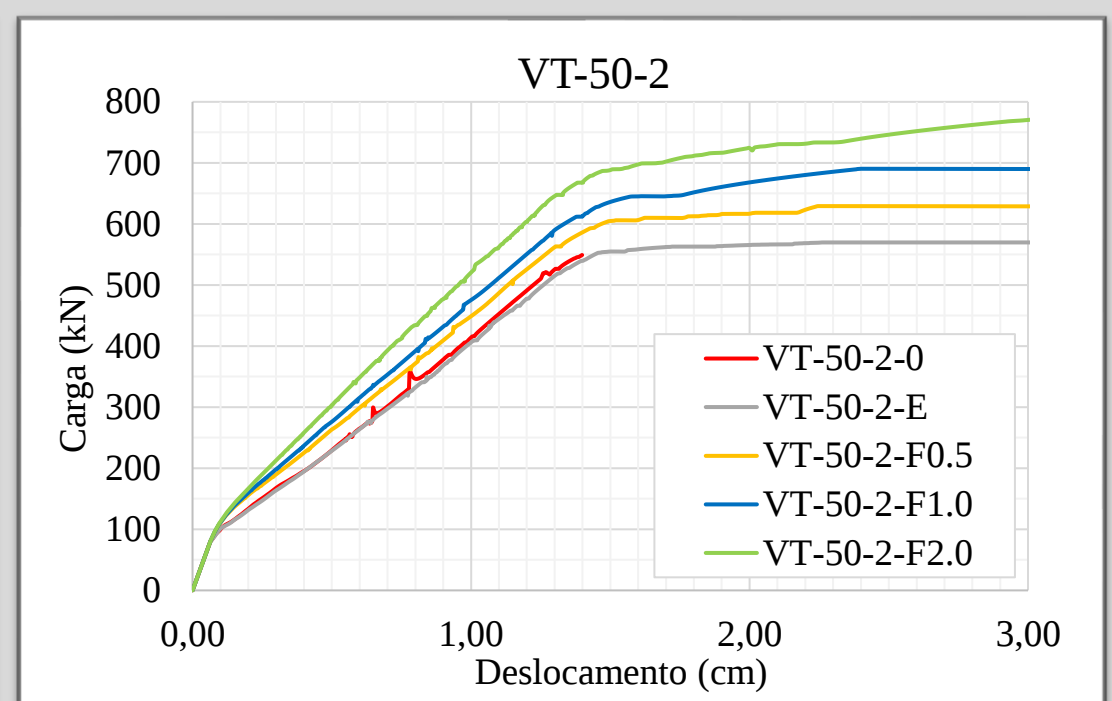
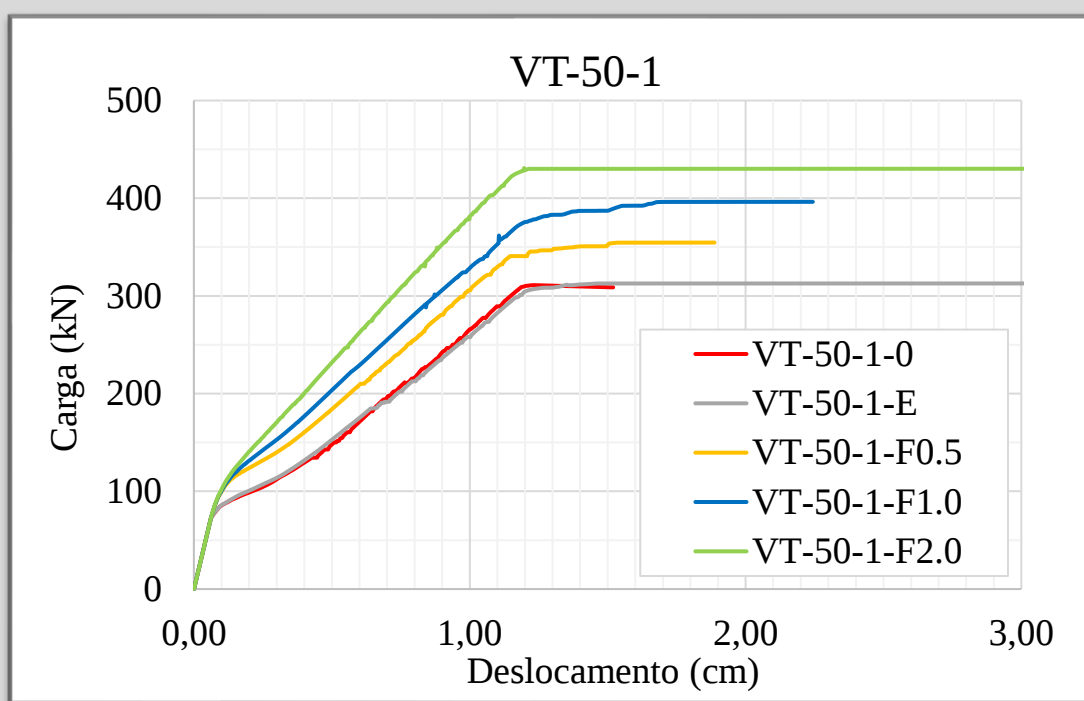
- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

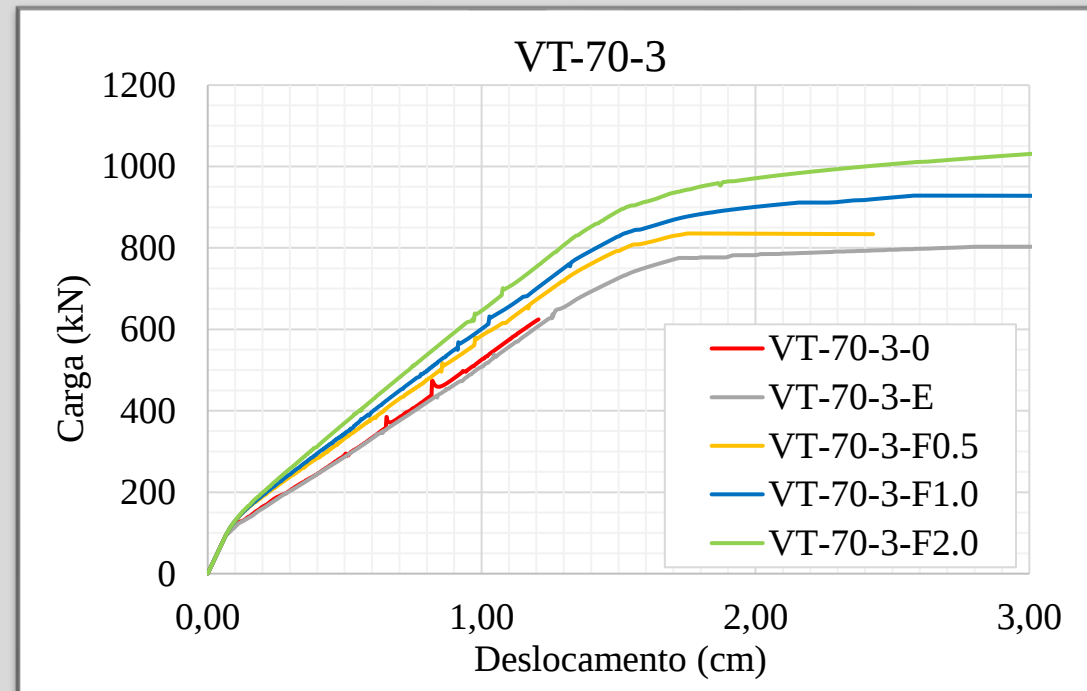
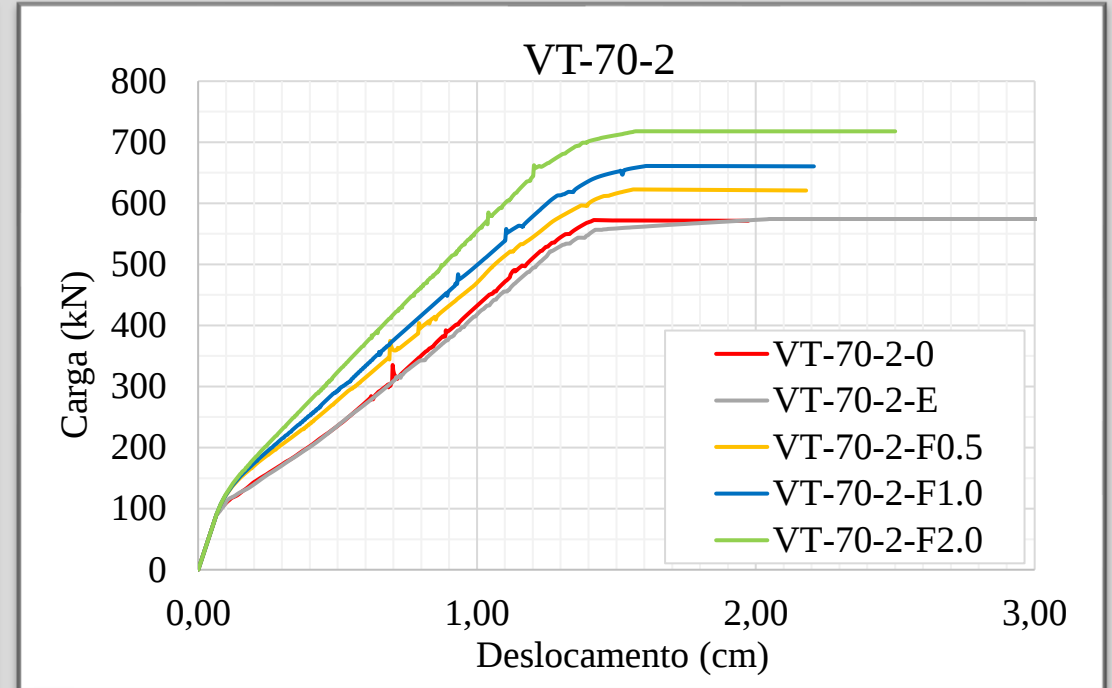
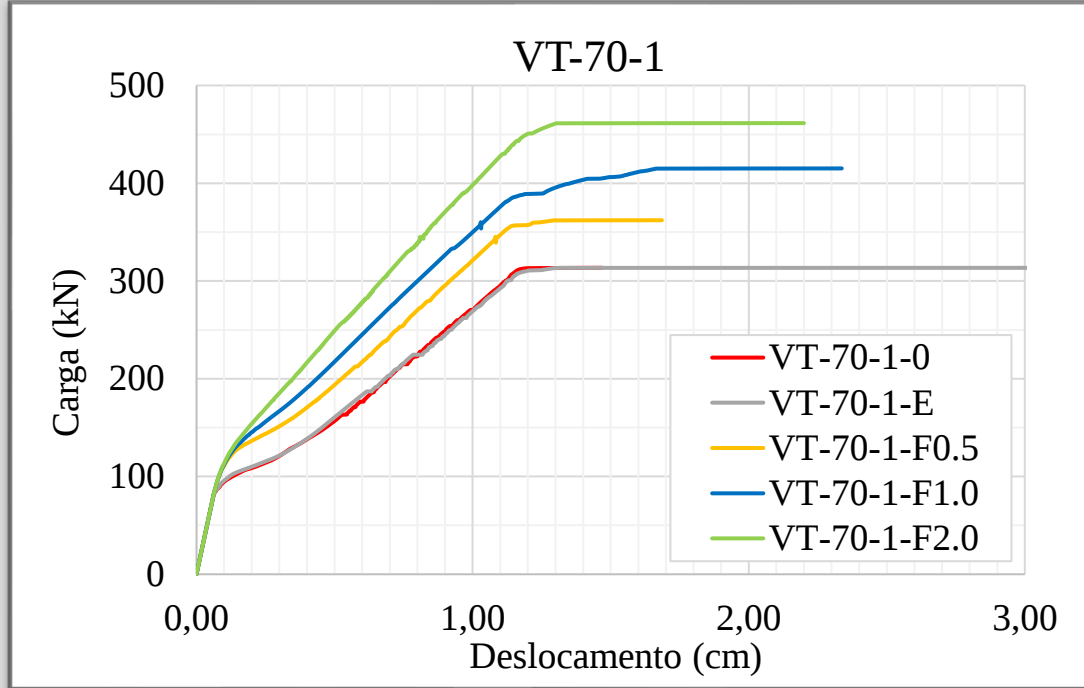
- Variables aleatorias consideradas:

Variable	Distribución	Coefficiente de variación	Media
Resistencia a la compresión del hormigón (f_c)*	Normal	0,15	$1,32.f_{ck}$
Límite elástico de la armadura (f_y)	Normal	0,05	$1,09.f_{yk}$
Volumen de fibra (V_f)	Lognormal	0,10	$1,10.V_f$
Carga permanente (G)	Normal	0,10	$1,05.G_k$
Carga variable (Q)	Gumbel	0,25	$0,92.Q_k$
Errores del modelo de resistencia y sollicitación (θ_R e θ_S)	Lognormal	0,05	1,00

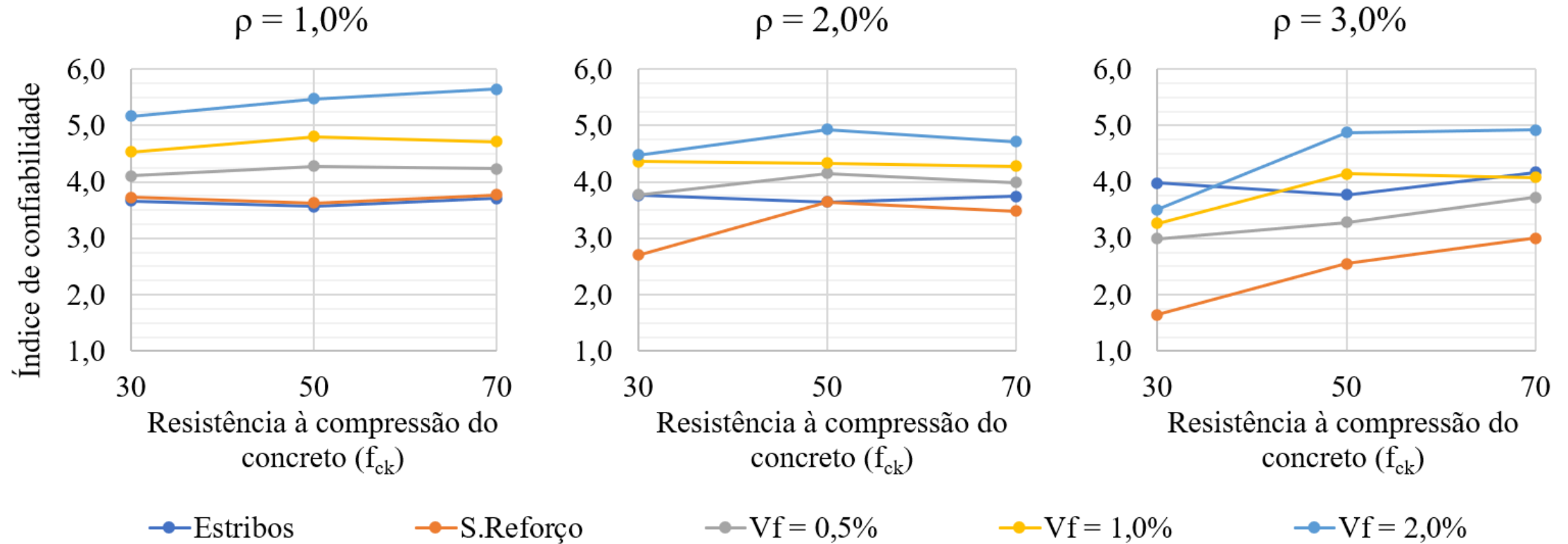
(* Controla el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción)



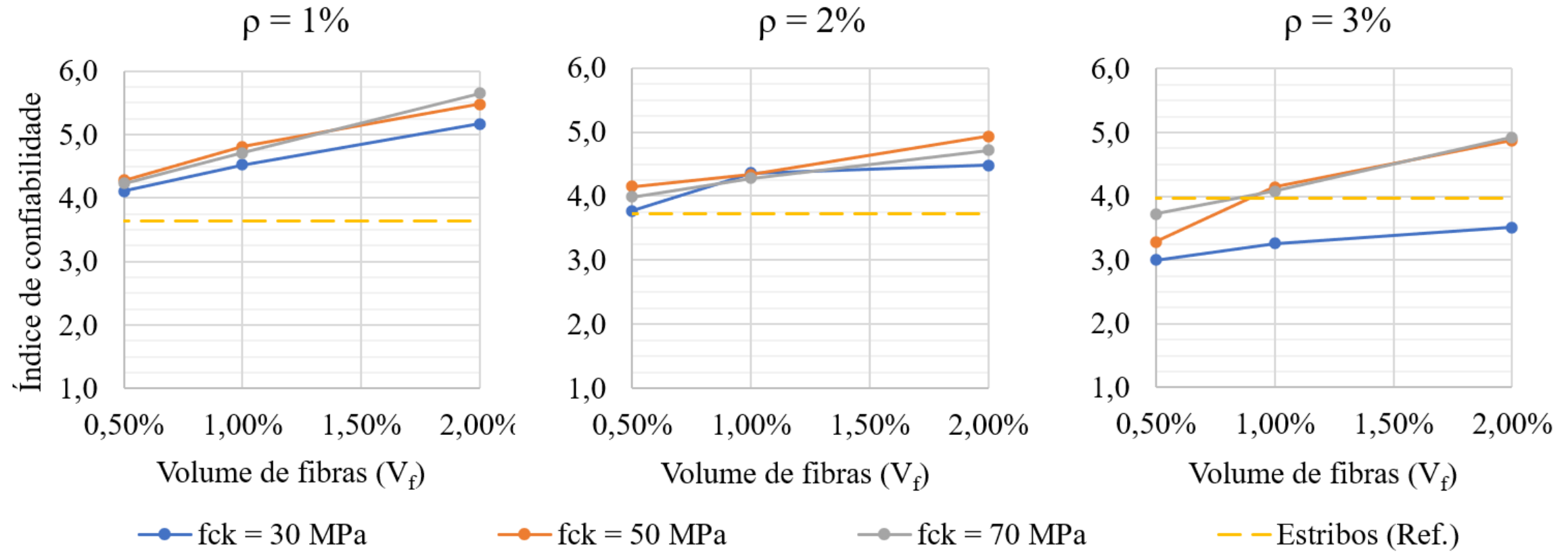




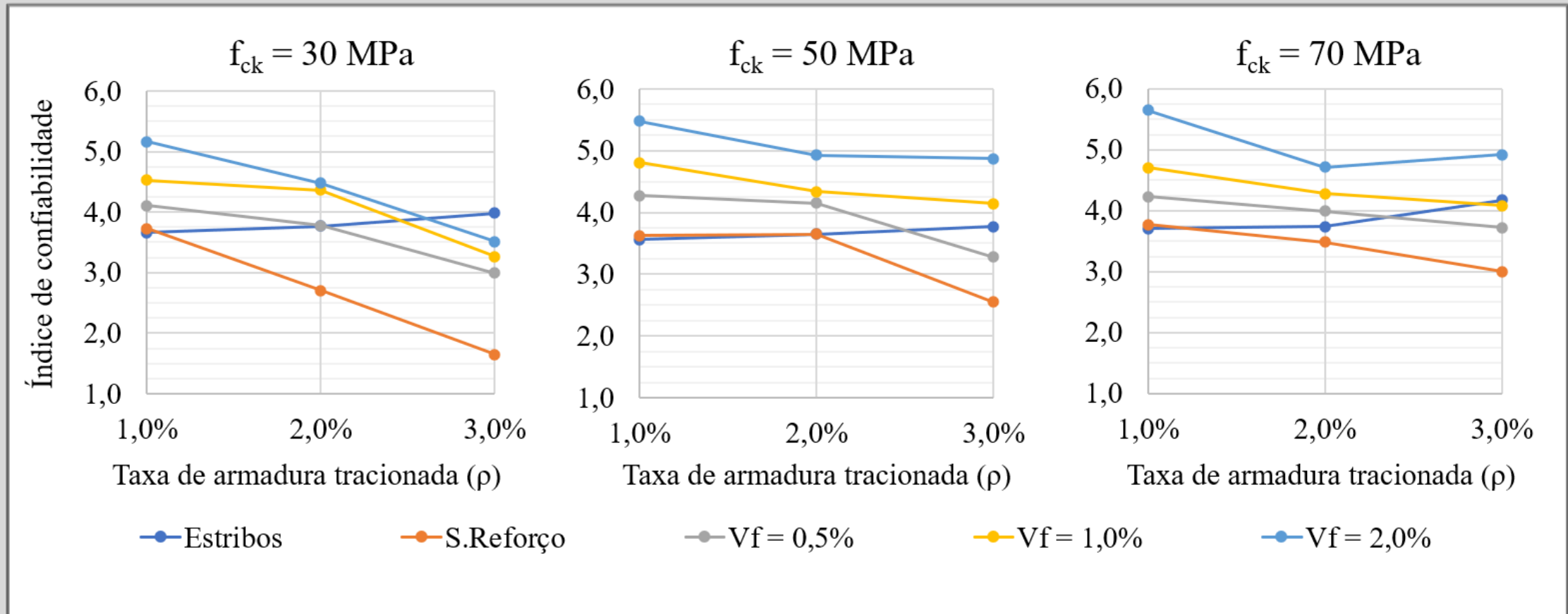
- Análisis paramétrico en relación con la resistencia del hormigón:



- Análisis paramétrico en relación con el volumen de fibra:



- Análisis paramétrico en relación con la relación de armadura de tracción:



Consideraciones finales

- Introducción
- Hormigón reforzado con fibra de acero
- Modelado computacional
- Validación de modelos numéricos
- Confiabilidad estructural
- Análisis de sustitución de armaduras transversales
- Consideraciones finales

- Los modelos constitutivos implementados son adecuados para la simulación de vigas de hormigón armado con y sin fibras de acero;
- El criterio adoptado para la consideración de la rigidez a tracción mejoró la observación de las fallas de cortante en vigas sin estribos;
- La herramienta para el análisis de confiabilidad estructural presenta buenos resultados y permite una evaluación más precisa;
- El diseño de la fuerza cortante según NBR 6118:2014 es conservador, como se esperaba (sigue el mismo en la NBR 6118:2023);
- Las fibras de acero aumentan la seguridad estructural de las vigas que fallan debido a la flexión;
- En el caso de las fallas por cizallamiento, se requieren mayores márgenes de seguridad para CRFA dada la mayor dependencia del hormigón;
- **Se requiere atención a la seguridad estructural para llevar a cabo dicho reemplazo.**



Muchas gracias por su atención!