

Modelos de Erosión en Casing durante Fracturas por Tree-Saver

Prieto Agustin, Dario Codega, Nicolas Rebasa - Tenaris

Agenda

- Introducción Teórica – Erosión por Partículas Sólidas
- Modelos Empíricos
- Casos Reales – Fractura por Tree-Saver
- Resultados y Conclusiones

Agenda

- **Introducción Teórica – Erosión por Partículas Sólidas**
- Modelos Empíricos
- Casos Reales – Fractura por Tree-Saver
- Resultados y Conclusiones

Definición de Erosión

- Pérdida de material debida a la **abrasión** (remoción mecánica) generada por el pasaje de un fluido.
- Mecanismos de erosión:
 - Erosión por gotas de líquidos (ej. gas condensado)
 - Cavitación
 - Corrosión-erosión (en ambientes con altos cortes de agua, O_2 , CO_2 , H_2S , bajo pH)
 - Erosión por partículas sólidas

Zonas de riesgo de Erosión

Cambios de dirección o interrupción del flujo:

- Curvas
- Codos, Tees
- Válvulas
- Conexiones (zona J)
- Cambio de sección de flujo
- Cordón de soldaduras

Flujo turbulento → Mayor riesgo de daño por erosión.

ρ = Densidad
 v = Velocidad → Q / A_t
 D = Diámetro de tubería
 μ = Viscosidad dinámica

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

En tuberías:
 $Re < 2100$ → Flujo laminar
 $Re > 4000$ → Flujo turbulento



Ej. Fractura con agua + arena:

Casing	Caudal	Re
3 1/2" 9.3#	35 bpm	~2.1 MM
5" 21.4#	90 bpm	~4.0 MM



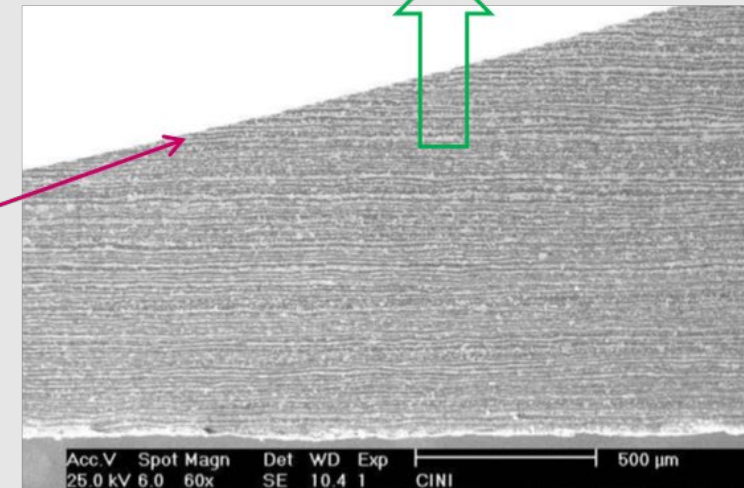
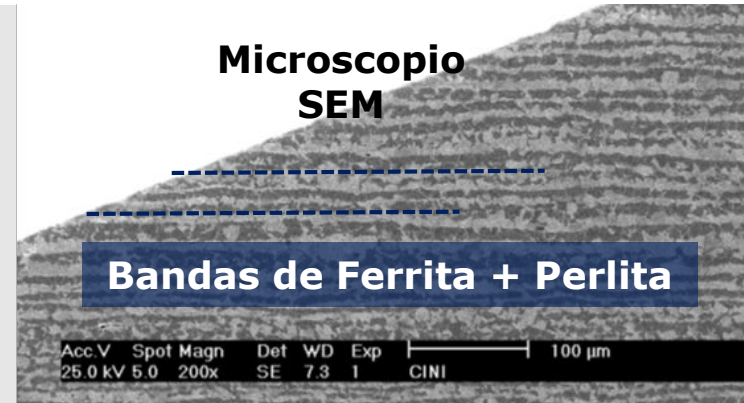
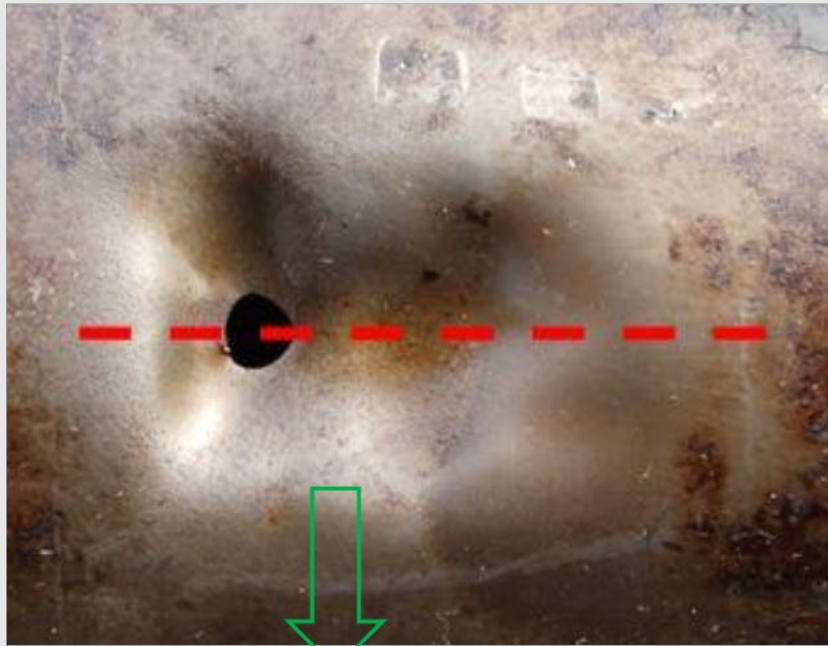
Erosión en zona J
Casing 5 1/2" LTC
**14 etapas de
fractura (caudal
promedio 93 bpm)**



Ref. SPE 147514 Assessment and Prediction of Erosion in Completion Systems-under Hydraulic Fracturing Operations Using Computational Fluid Dynamics



Identificación de Daños por Erosión



- Superficies redondeadas y de baja rugosidad
- Bandas de segregación del acero sin curvaturas ni cambios de dirección

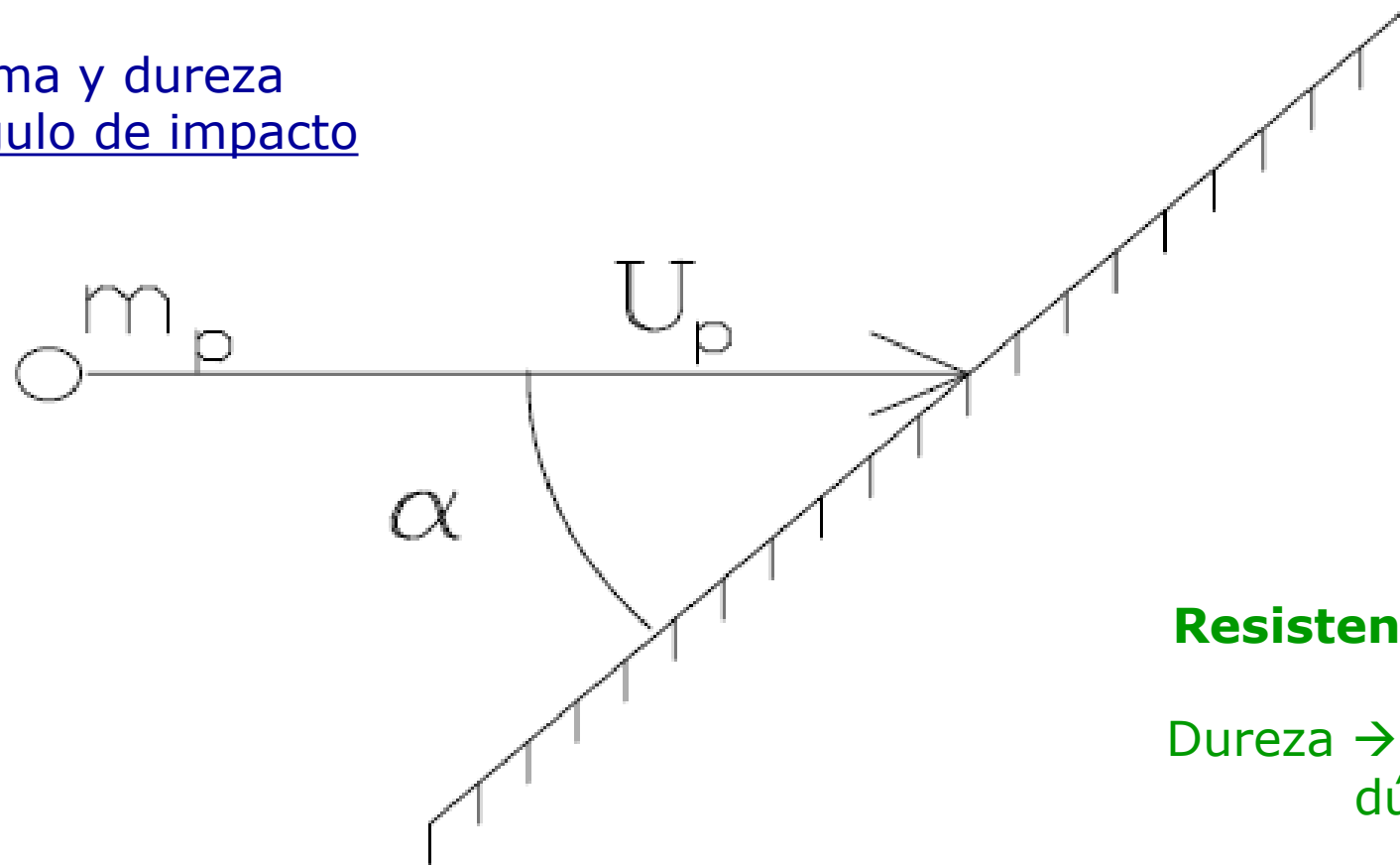
Agenda

- Introducción Teórica – Erosión por Partículas Sólidas
- **Modelos Empíricos**
- Casos Reales – Fractura por Tree-Saver
- Resultados y Conclusiones



Impacto de partículas

Tamaño, forma y dureza
Velocidad y ángulo de impacto



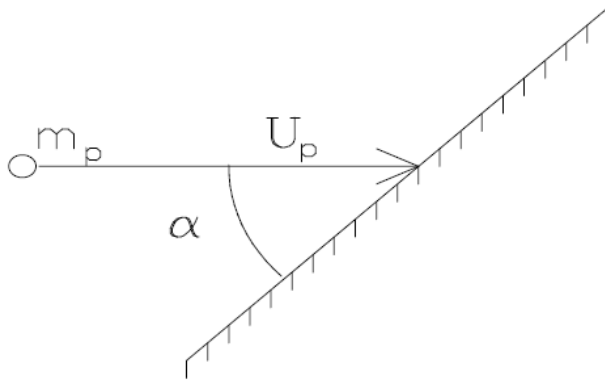
Resistencia del Material

Dureza → Comportamiento
dúctil/frágil



¿Cómo estimar la velocidad de la partícula y el ángulo de impacto?

$U_p ? \alpha ?$



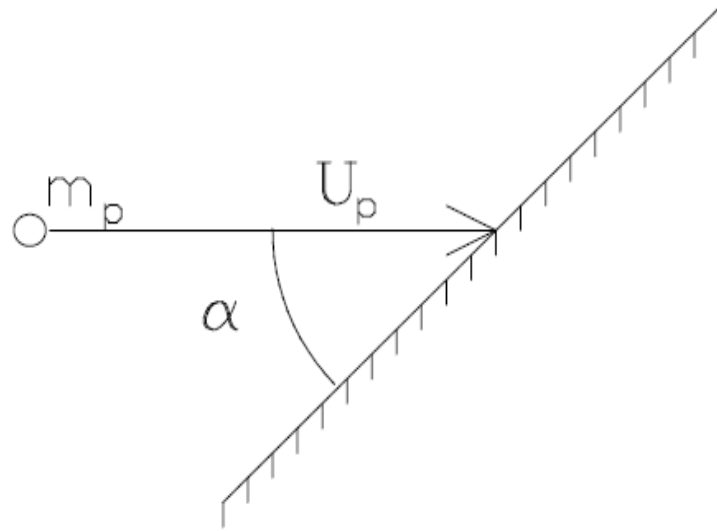
**Ecuaciones Navier-Stokes → Modelos de
CFD (“Computational Fluid Dynamics”)**

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g}$$

Alternativa → **Modelos
empíricos simplificados**

Modelos de Erosión – DNV 0501

- **DNV RP 0501** Recommended Practice – Erosive Wear in Piping Systems
- Estimación de pérdida de espesor por erosión (según geometría):



$$E \sim m_p \cdot K \cdot U_p^n \cdot F(\alpha)$$

E = Velocidad de erosión

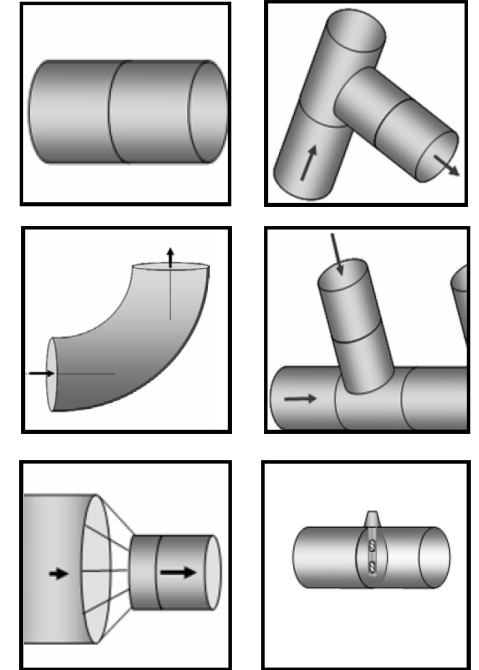
U_p = Velocidad de impacto de partícula

m_p = Caudal másico de arena

$F(\alpha)$ = Función de la ductilidad del material

α = Ángulo de impacto

K, n = Constantes empíricas del material



- Consideraciones del modelo: solo para **erosión por abrasión de sólidos**, sin considerar efectos de corrosión, cavitación y/o impacto de partículas líquidas.

DNV-Huser

$$E_L = 3,15 \times 10^{10} \frac{m_p \cdot K \cdot V^n \cdot F(\alpha)}{\rho_t A_t}$$

- E_L = Velocidad de erosión [mm/y]
- m_p = Caudal másico de arena [kg/s]
- V = Velocidad de impacto de la partícula [m/s]
- $K = 2 \times 10^{-9} [(m/s)^{-n}] \rightarrow$ Para aceros al C
- $n = 2,6 \rightarrow$ Para aceros al C
- α = Ángulo de impacto de las partículas
- A_t = Área expuesta a erosión [m²]
- ρ_t = Densidad del material [kg/m³] $\rightarrow \sim 7800$ kg/m³ para aceros al C



DNV Tubería Recta

$$E_L = 2,5 \times 10^{-5} \cdot m_p \cdot V^{2,6} / D^2$$

- E_L = Velocidad de erosión [mm/y]
- m_p = Caudal másico de arena [kg/s]
- V = Velocidad del fluido [m/s]
- D = Diámetro interno de la tubería [m]



Salama Modificado

- **BP Erosion Guidelines**, Revision 2.1 (1999), J W Martin

$$E_L = \frac{0,182 \cdot V^2 \cdot W \cdot d_p}{\rho_m \cdot D^2}$$

E_L = Velocidad de erosión [mm/y]

W = Caudal másico de arena [kg/d]

V = Velocidad del fluido [m/s]

d_p = Diámetro promedio de las partículas de arena [micrones]

D = Diámetro interno de la tubería [mm]

ρ_m = Densidad de la mezcla [kg/m³]

- Consideraciones del modelo: desarrollado para codos o curvas con radios de curvatura $\sim 5 \times D$ (diámetro de pasaje), y flujo mono-fásico (líquido o gas); en tubería recta se estima que la erosión es un orden de magnitud menor que la predicha por el modelo.

Agenda

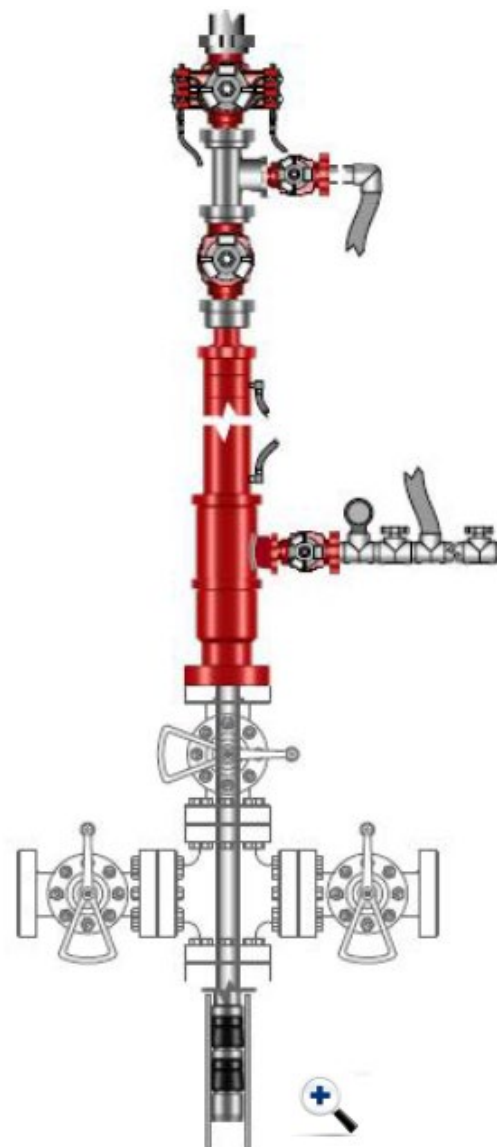
- Introducción Teórica – Erosión por Partículas Sólidas
- Modelos Empíricos
- **Casos Reales – Fractura por Tree-Saver**
- Resultados y Conclusiones



Esquema Tree-Saver



Área proclive a ser
erosionada





Caso 1

Fractura por Casing 3 ½" 9.2# N80 y Tree-Saver

- Caudal de fractura = 35 BPM
 - WHP máx. 9250 psi / Back-up 2000 psi
 - Concentración máx. arena 5,4 ppg
 - Fluido base agua (8,33 ppg)
 - ID 3 ½" 9.2# = 2,992"
-
- **Se detecta comunicación con anular luego de 2,1 hs de bombeo**
 - **Falla en el 1er casing desde la boca de pozo, en la salida del stinger (tree-saver)**



Extremo de falla





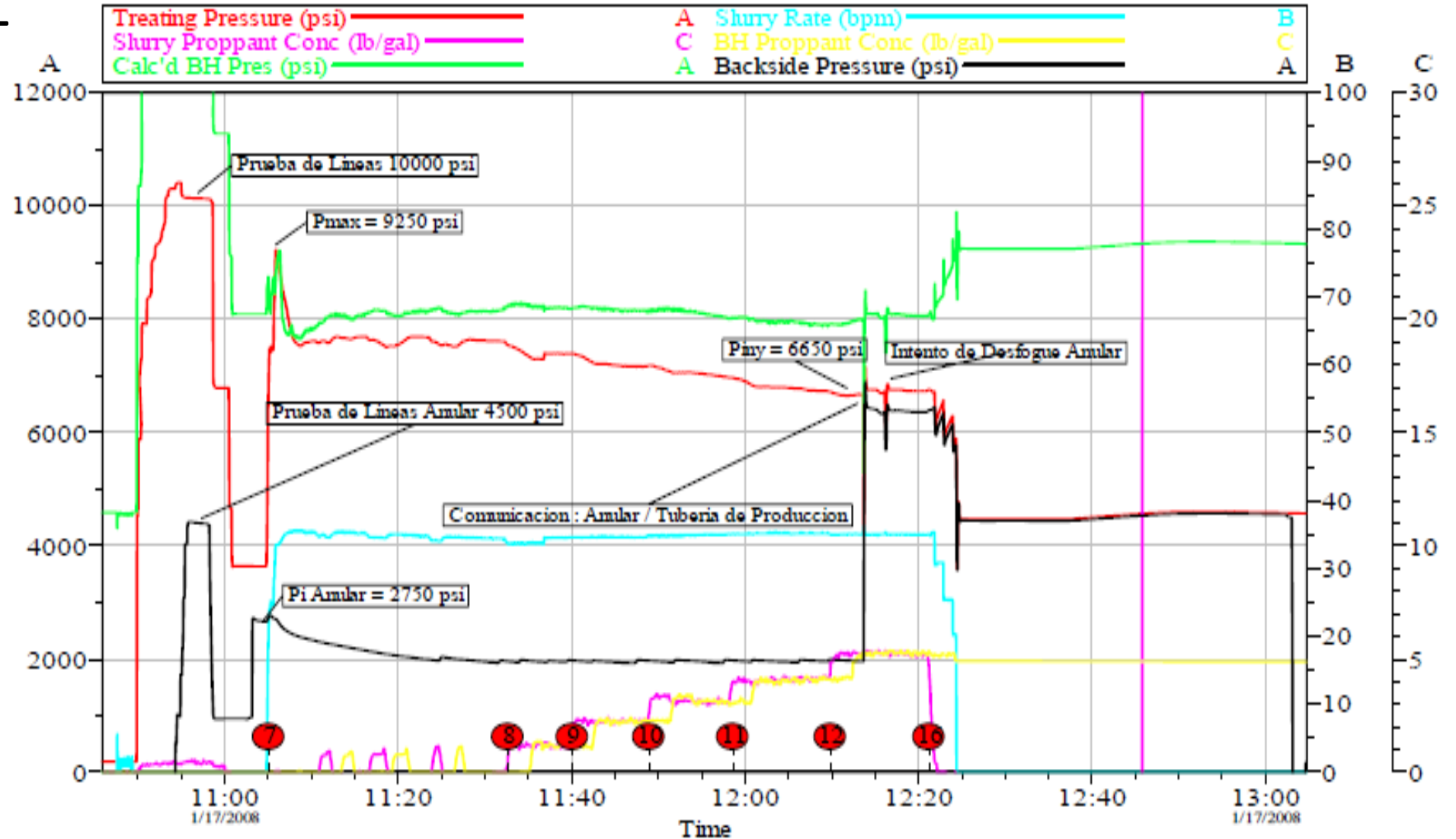
Caso 1



Morfología de superficie tipo "panal de abejas" → Daño por erosión



Caso 1





Caso 2

Fractura por Casing 3 ½" 9.2# N80 y Tree-Saver

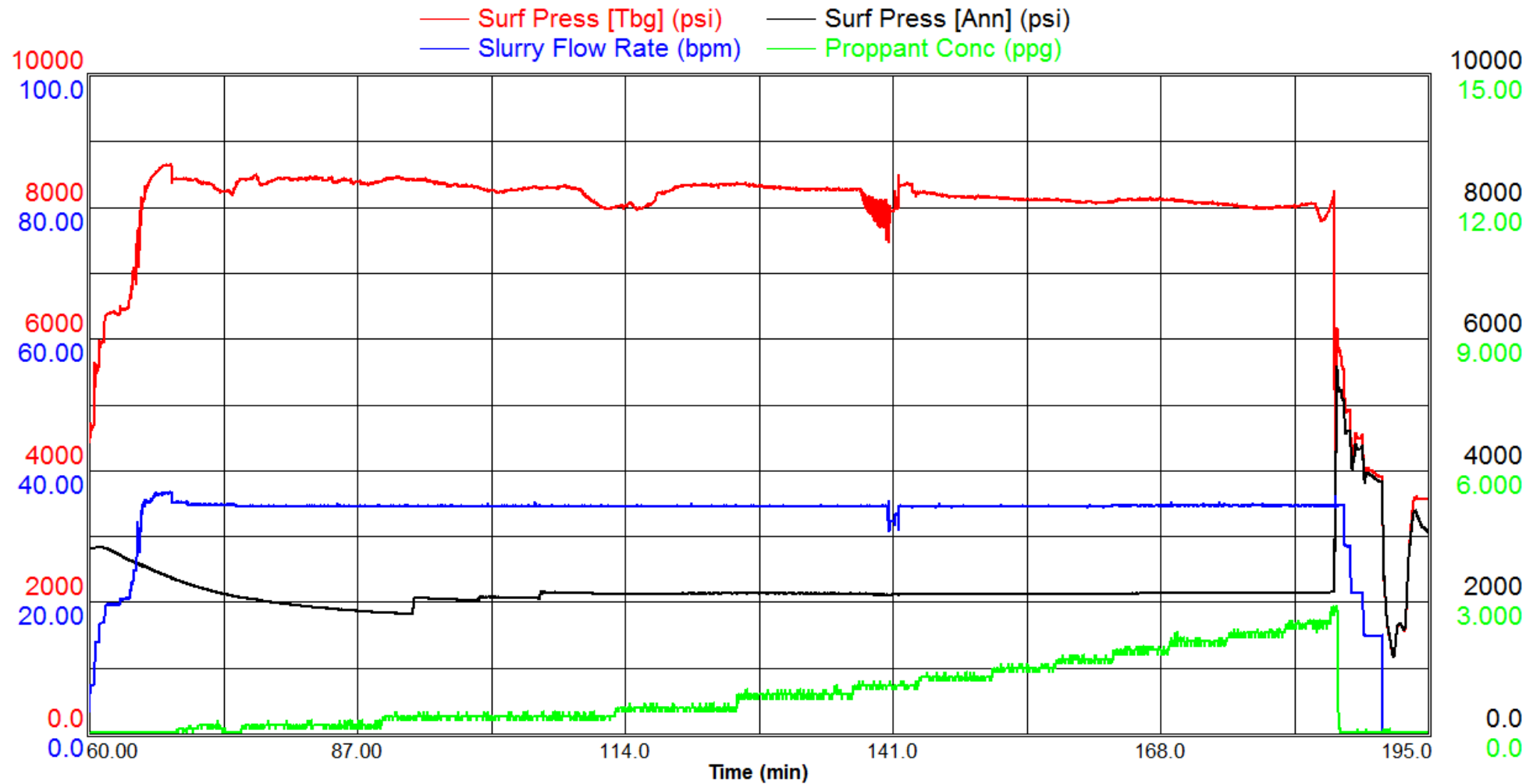
- Caudal de fractura = 30 BPM
- WHP máx. 9150 psi
- Concentración máx. arena 5 ppg
- Fluido base agua (8,33 ppg)
- Tiempo de bombeo ~4,5 hs
- ID 3 ½" 9.2# = 2,992"
- Tree-saver ID = 1,500"
- **Falla del 1er casing 3 ½" en la salida del tree-saver, durante la etapa #2**



Superficie interna de la falla

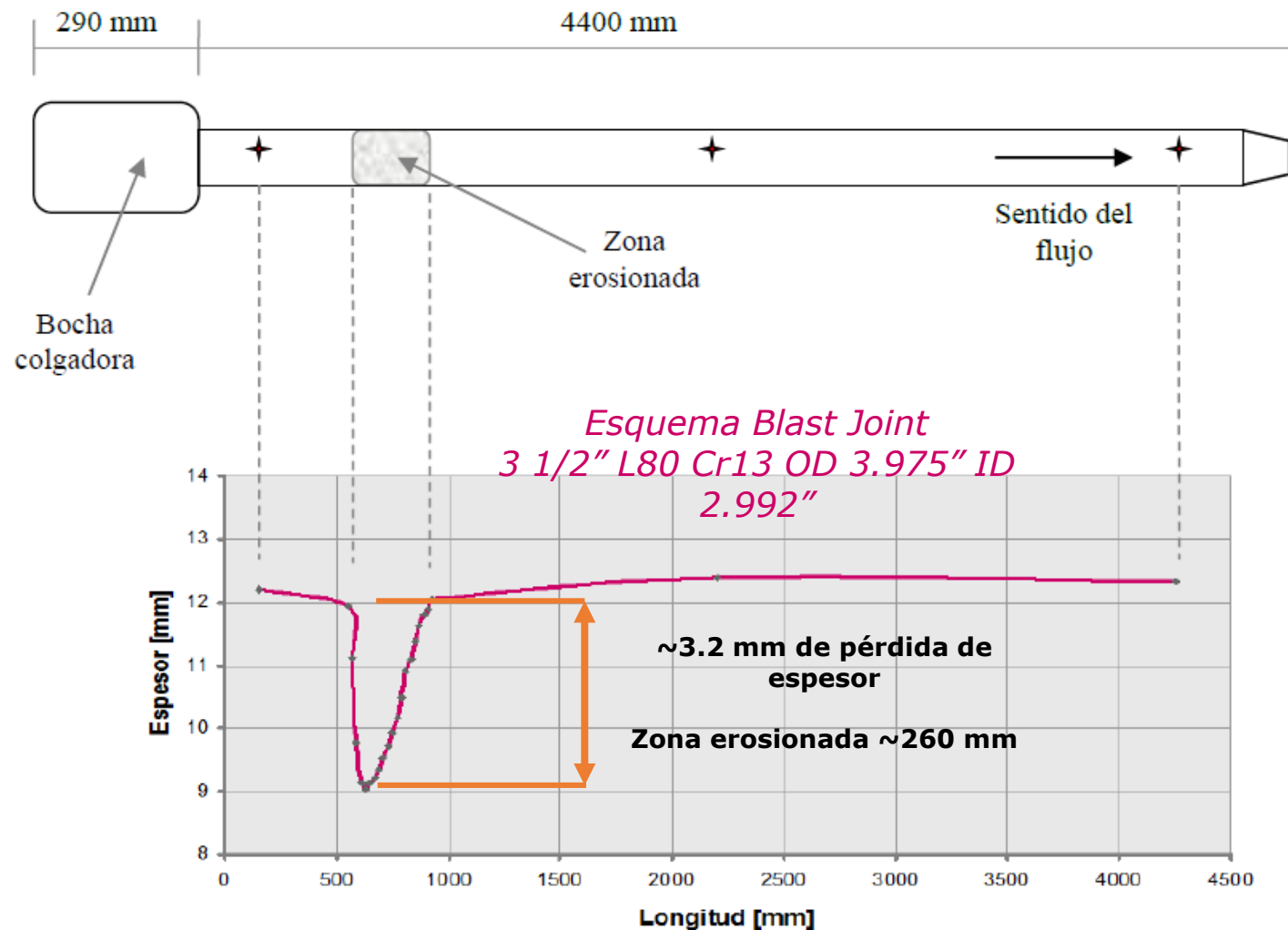


Caso 2





Caso 3 – Uso de Blast Joint



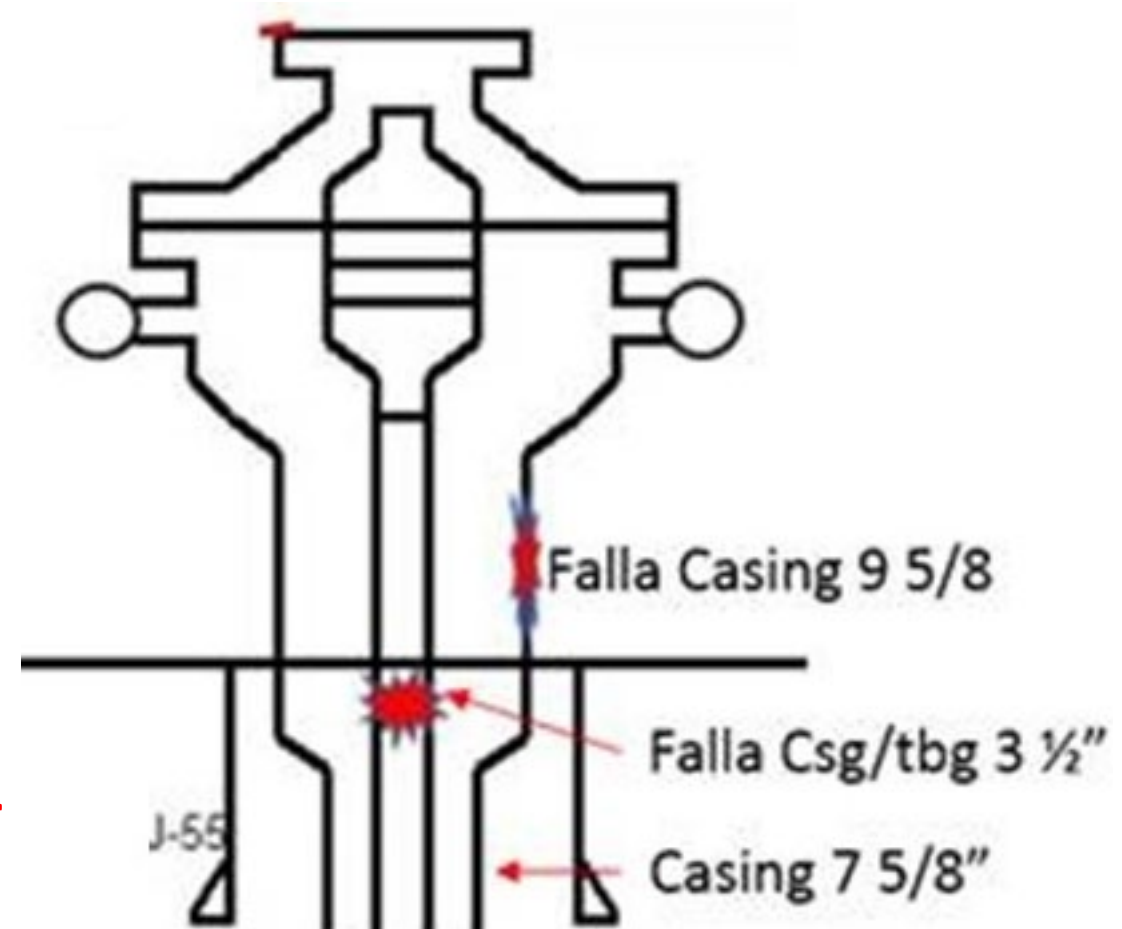
- Fractura utilizando un blast joint en la zona del tree-saver, para medir luego la pérdida de espesor del mismo.
- Condiciones de fractura:
 - 35 BPM
 - 3,2 horas de bombeo
 - Concentración máx. arena 4 ppg
 - ID tree-saver = 1,750"
 - ID Blast Joint = 2.992"



Caso 4

Fractura por Casing 3 ½" 10.2# P110 y Tree-Saver

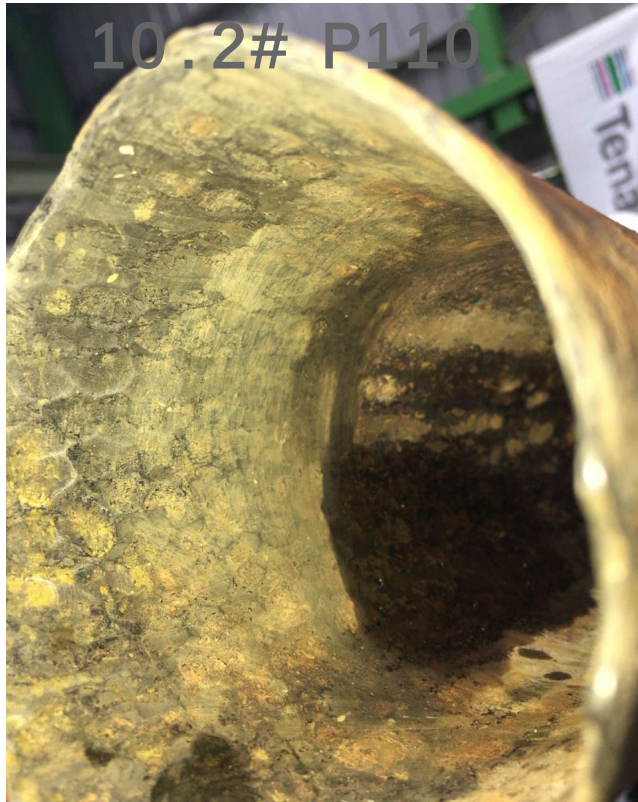
- Caudal de fractura = 35 BPM
- WHP máx. 11000 psi
- Concentración máx. arena 4-6 ppg
- Fluido base agua (8,33 ppg)
- Tiempo de bombeo ~5,2 hs
- ID 3 ½" 10.2# = 2,922"
- Tree-saver ID = 1,750"
- **Falla del 1er casing 3 ½" en la salida del tree-saver durante la etapa #5**





Caso 4

Extremo superior del tubo cortado 3 ½"

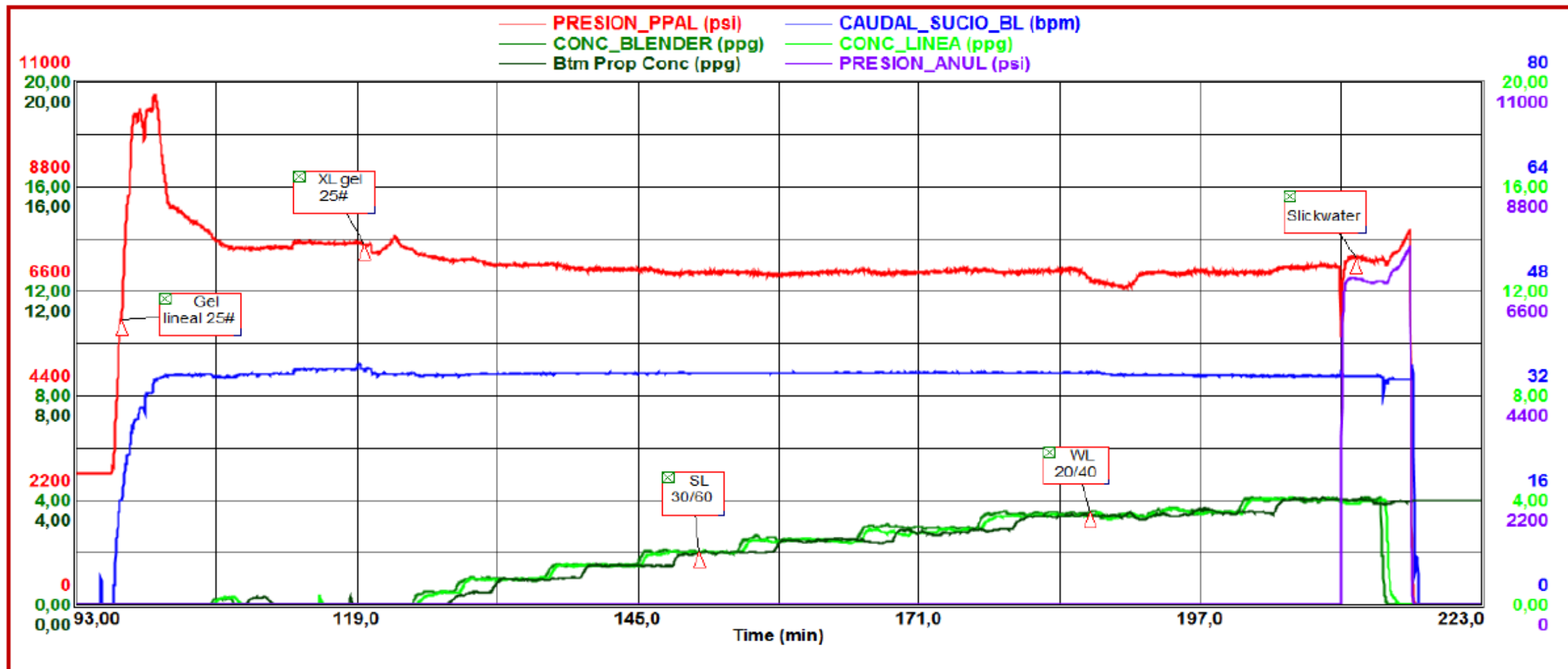


Morfología tipo "panal de abejas" → Daño por erosión

Expansión de OD por presión interna

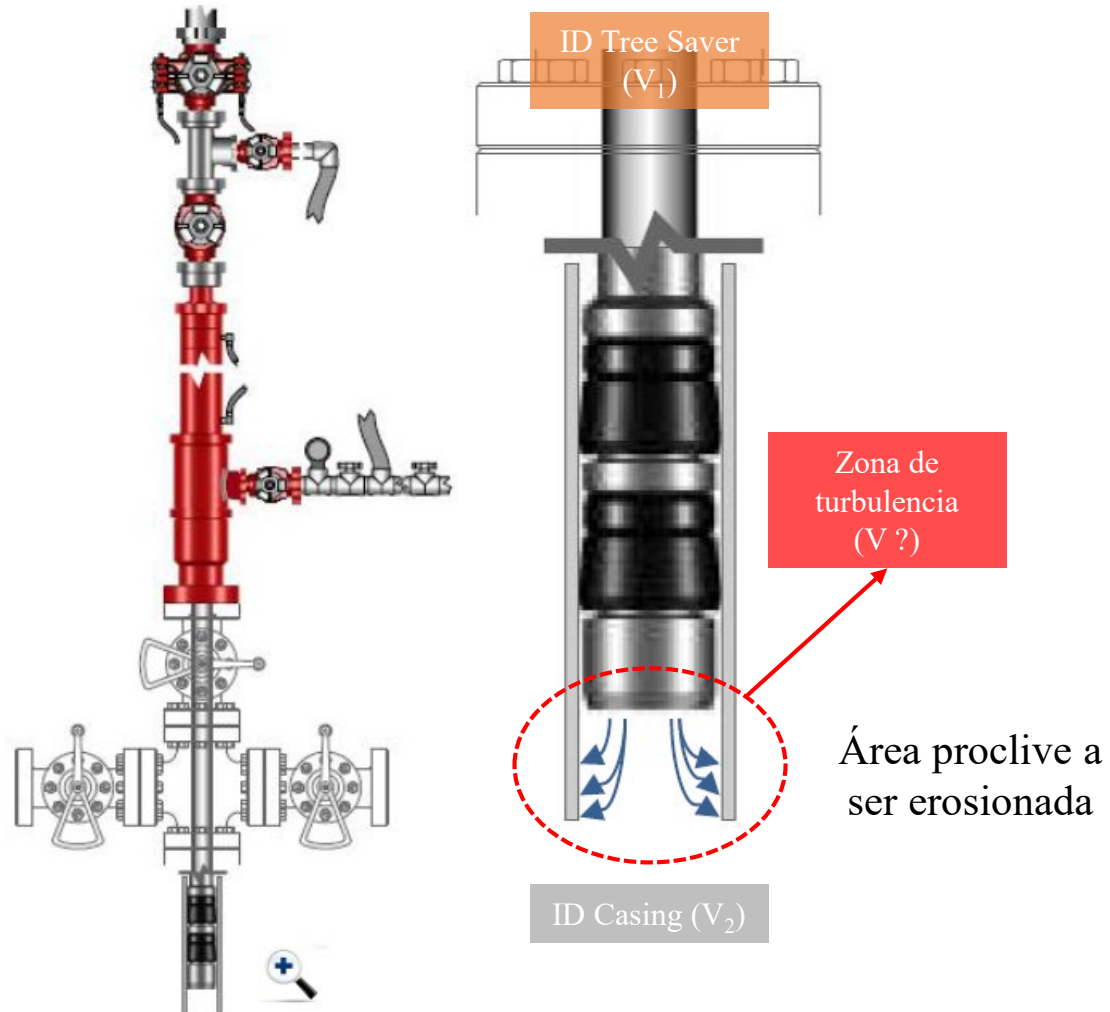


Caso 4





Modelo Propuesto – Fractura por Tree-Saver



Zona de turbulencia en la salida del tree saver → Riesgo de erosión alto

Qué velocidad considerar en esta zona para calcular la pérdida de espesor por erosión?

Propuesta:

$$V = V_2 + (V_1 - V_2) * f_v$$

$$0 < f_v < 1$$

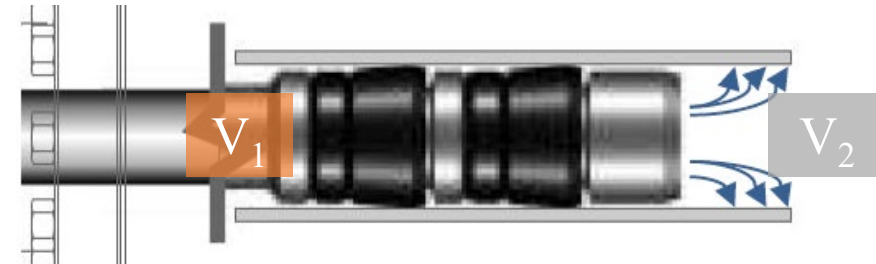


$$E_L = 3,15 \times 10^{10} \frac{m_p \cdot K \cdot V^n \cdot F(\alpha)}{\rho_t A_t} \quad \textbf{Modelo DNV-Huser}$$

$$E_L = 2,5 \times 10^{-5} \cdot m_p \cdot V^{2,6} / D^2 \quad \textbf{Modelo DNV Tramo Recto}$$

$$E_L = \frac{0,182 \cdot V^2 \cdot W \cdot d_p}{\rho_m \cdot D^2} \quad \textbf{Modelo Salama Mod.}$$

$$V = V_2 + (V_1 - V_2) \cdot f_v$$
$$0 < f_v < 1$$



CASO	Tubing	ID tree saver (in)	ID nominal del casing (mm)	Espesor nominal del casing (mm)	Cantidad de fracturas	ID mín. remanente en el casing (mm)	Pérdida de espesor real (% esp. nominal)	Rango de presiones durante la última fractura (psi)	Caudales promedios de las fracturas (BPM)
CASO 1	3 1/2" 10.2#	1 3/4"	74.2	7.3	2	78.5	29%	10050-7695	32
CASO 2	3 1/2" 10.2#	1 3/4"	74.2	7.3	6	78.59	30%	7340-10000	30
CASO 3	3 1/2" 9.2#	1 3/4"	76.0	6.5	2	80	31%	8210-8420	30
CASO 4 (*)	3 1/2" 10.2#	1 3/4"	74.2	7.3	4	N/A	~50-60% (*)	10576-9018	34
CASO 5 (*)	3 1/2" 10.2#	1 3/4"	74.2	7.3	5	N/A	~50-60% (*)	10666-5631	34

(*) Casos donde se detectó una rotura total del casing. Los valores de pérdidas de espesor real son estimados utilizando el módulo de MAW ("Max. Allowable Wear") del StressCheck, considerando las condiciones de pozo durante la última fractura, y tomando los mín. factor de diseño = 1.



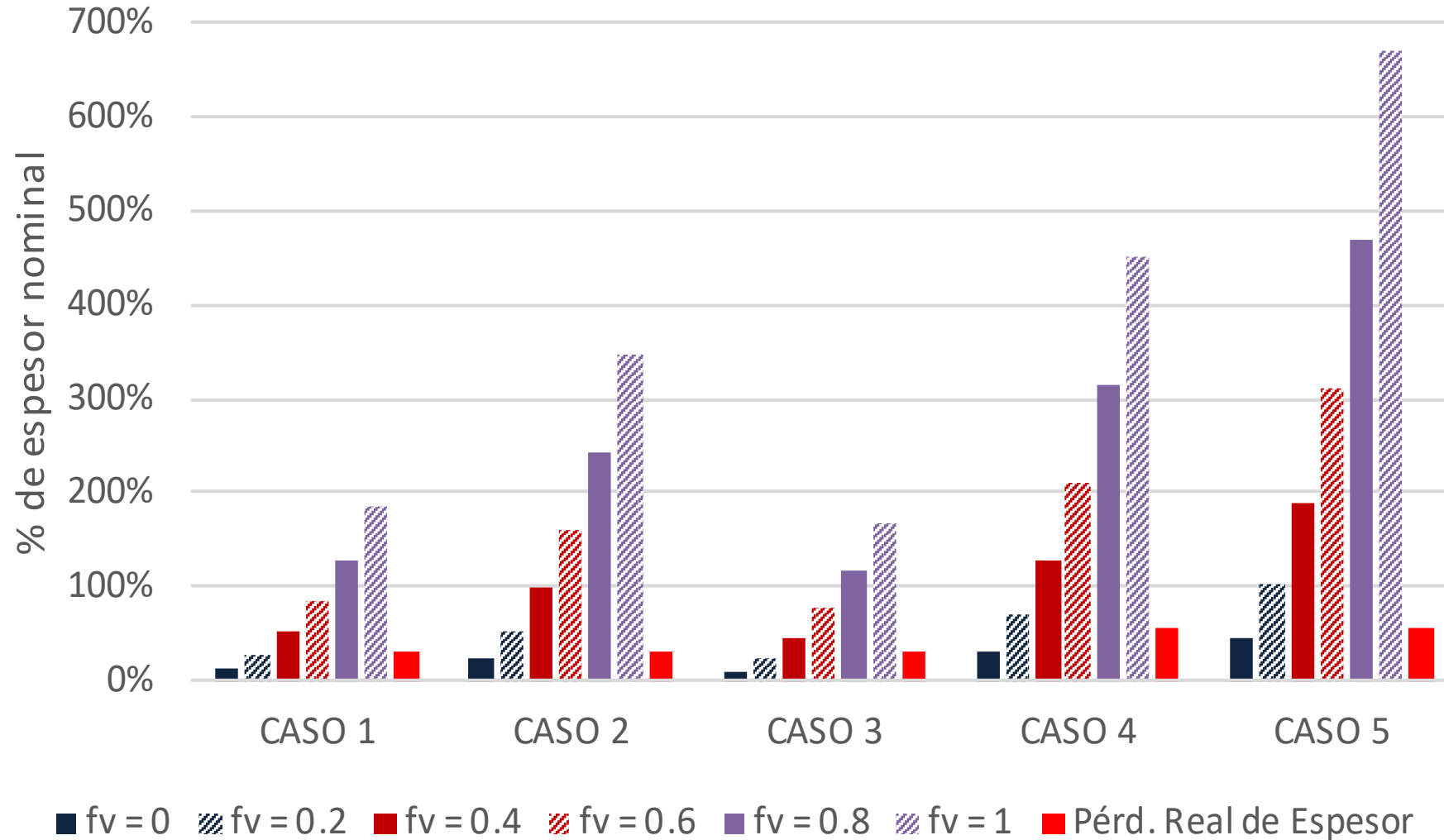
Agenda

- Introducción Teórica – Erosión por Partículas Sólidas
- Modelos Empíricos
- Casos Reales – Fractura por Tree-Saver
- **Resultados y Conclusiones**



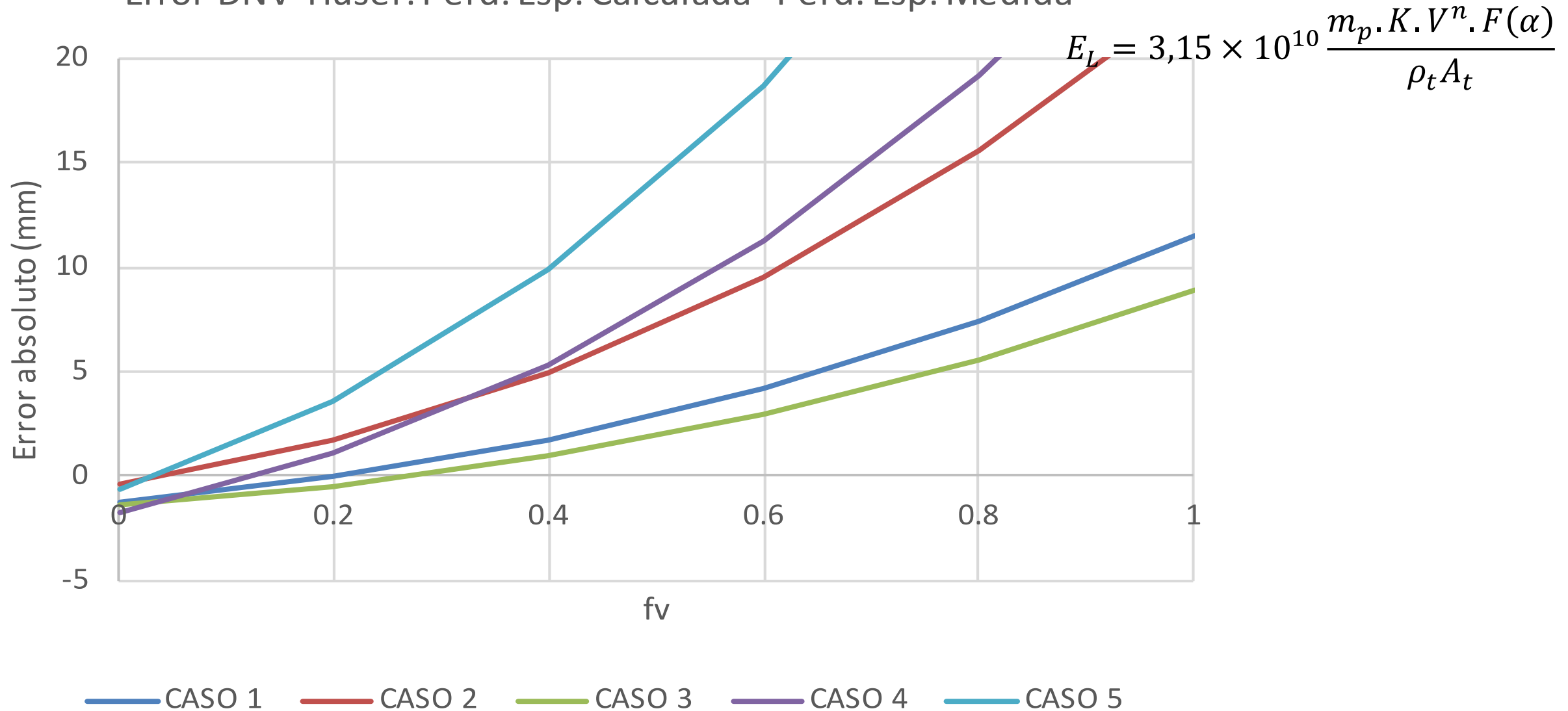
Pérdidas de Espesor - DNV-Huser

$$E_L = 3,15 \times 10^{10} \frac{m_p \cdot K \cdot V^n \cdot F(\alpha)}{\rho_t A_t}$$





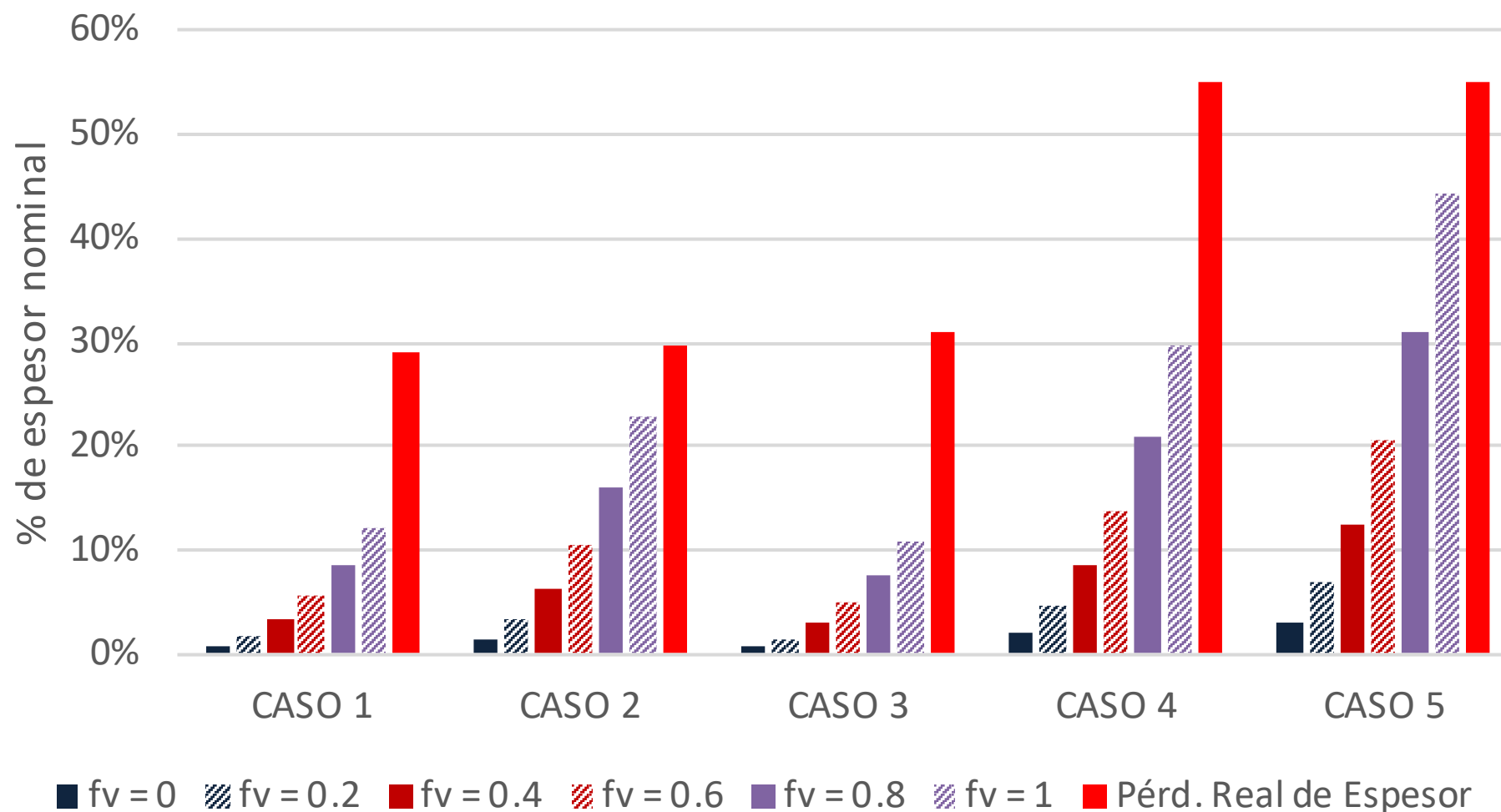
Error DNV-Huser: Pérd. Esp. Calculada - Pérd. Esp. Medida





Pérdidas de Espesor - DNV Tramo Recto

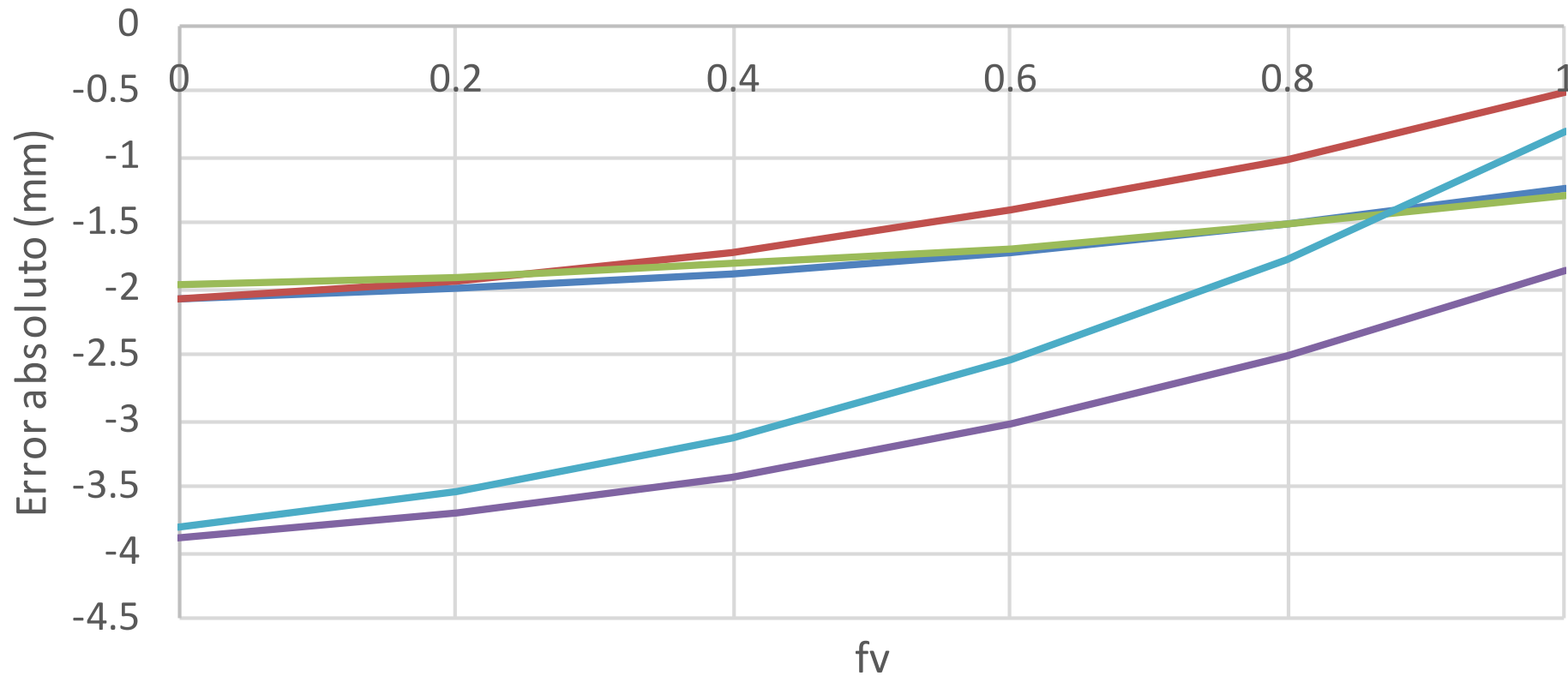
$$E_L = 2,5 \times 10^{-5} \cdot m_p \cdot V^{2,6} / D^2$$





Error DNV Tramo Recto: Pérd. Esp. Calculada - Pérd. Esp. Medida

$$E_L = 2,5 \times 10^{-5} \cdot m_p \cdot V^{2,6} / D^2$$

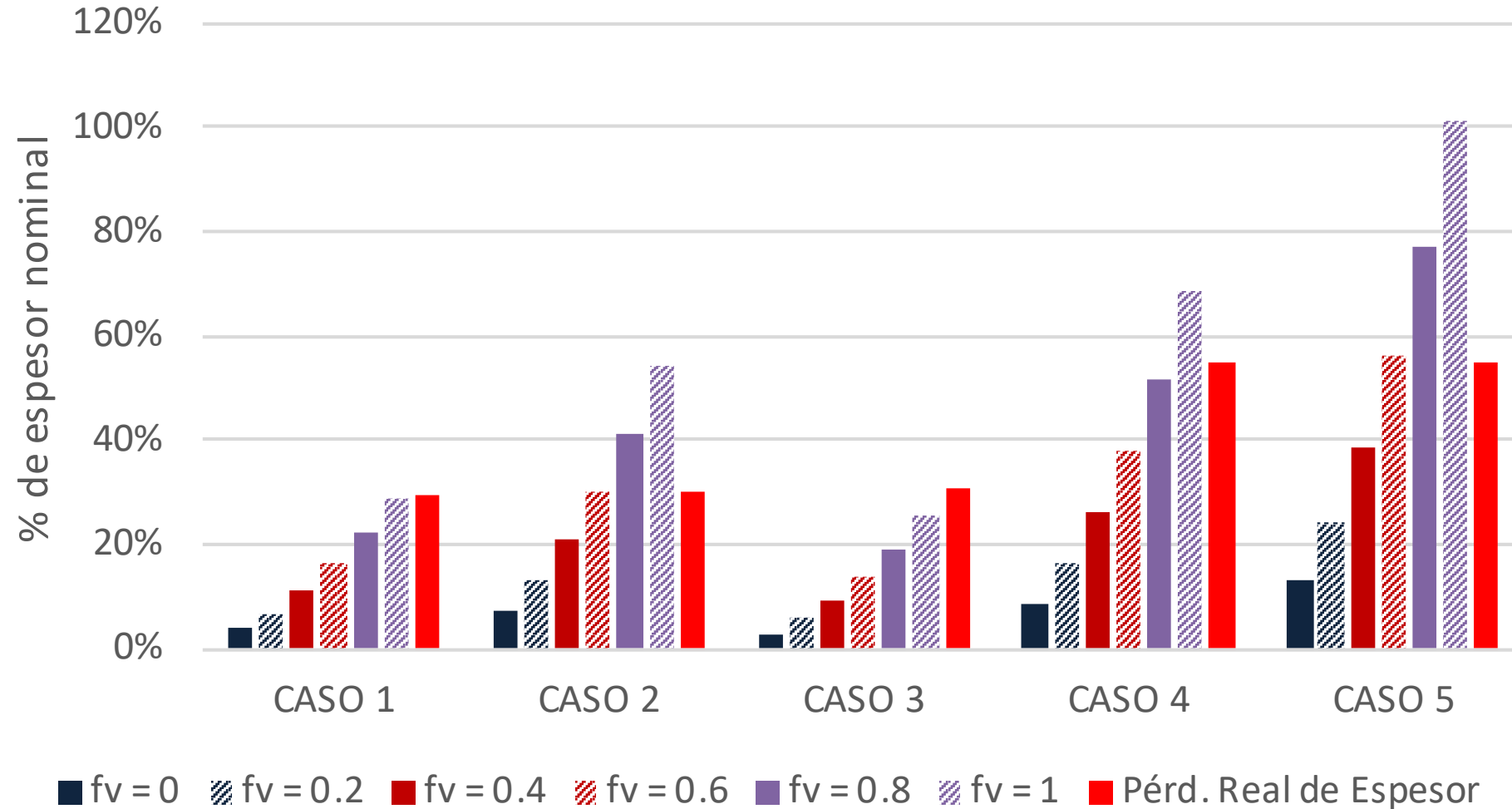


— CASO 1 — CASO 2 — CASO 3 — CASO 4 — CASO 5



Pérdidas de Espesor - Salama (mod.)

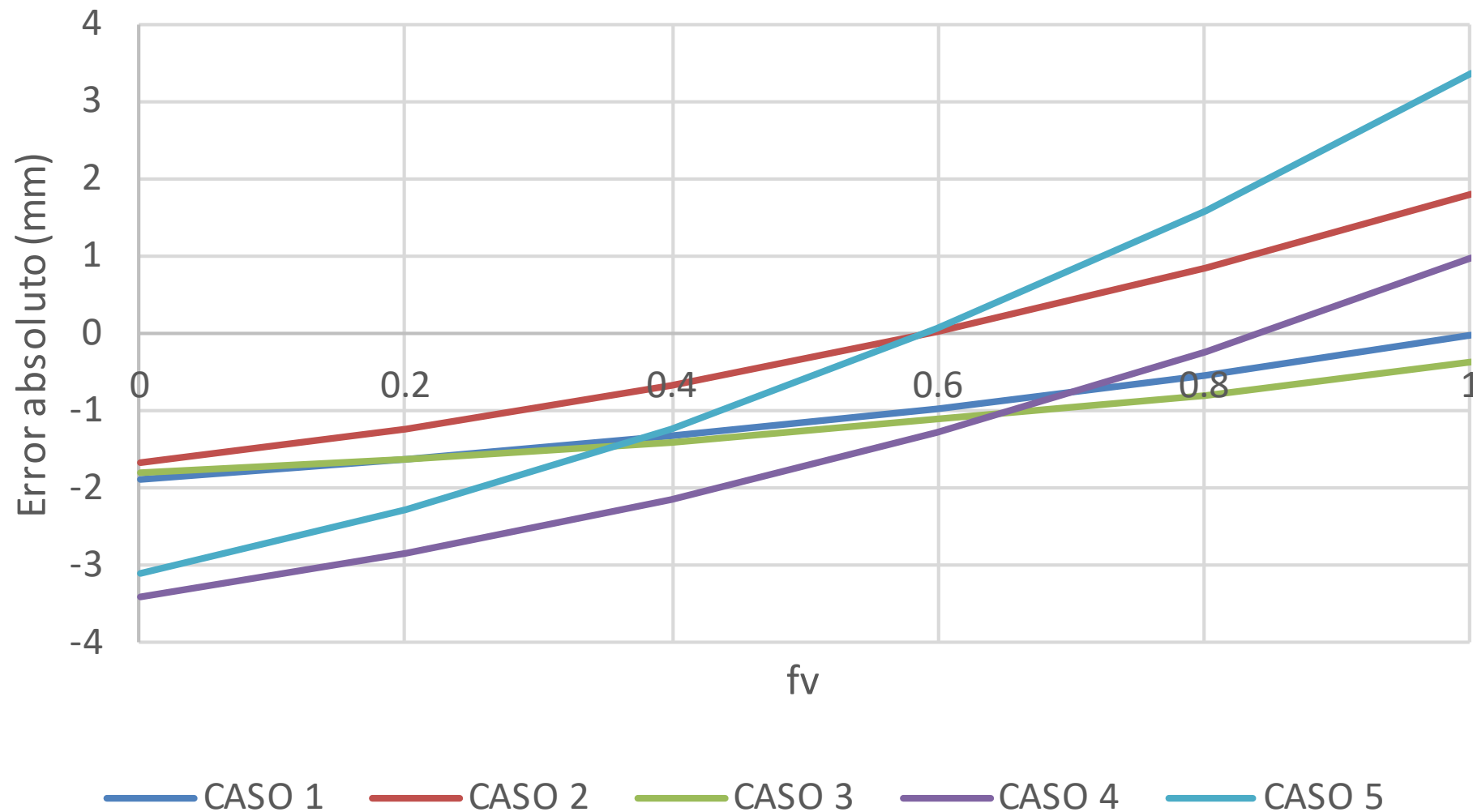
$$E_L = \frac{0,182 \cdot V^2 \cdot W \cdot d_p}{\rho_m \cdot D^2}$$





Error Salama (mod.): Pérd. Esp. Calculada - Pérd. Esp. Medida

$$E_L = \frac{0,182 \cdot V^2 \cdot W \cdot d_p}{\rho_m \cdot D^2}$$



Conclusiones

- Las estimulaciones hidráulicas generan flujos turbulentos ($Re > 2 \text{ MM}$), que sumado a la presencia de partículas sólidas, generan altos riesgos de erosión en los tubulares.
- En particular, para el caso de una fractura mediante tree-saver, se observaron los siguientes resultados, comparando daños medidos con modelos de bibliografía:
 - Modelo DNV-Huser: valores de f_v entre 0 y 0.2 correlacionan correctamente con los valores reales.
 - Modelo Salama Modificado: valores de f_v entre 0.6 y 0.9 correlacionan correctamente con los valores reales.
 - Modelo DNV Tramo Recto: el modelo no alcanza a replicar los valores reales, aún teniendo valores de f_v de 1.
- Se propone seguir recopilando datos reales para ajustar los modelos de predicción de erosión.