

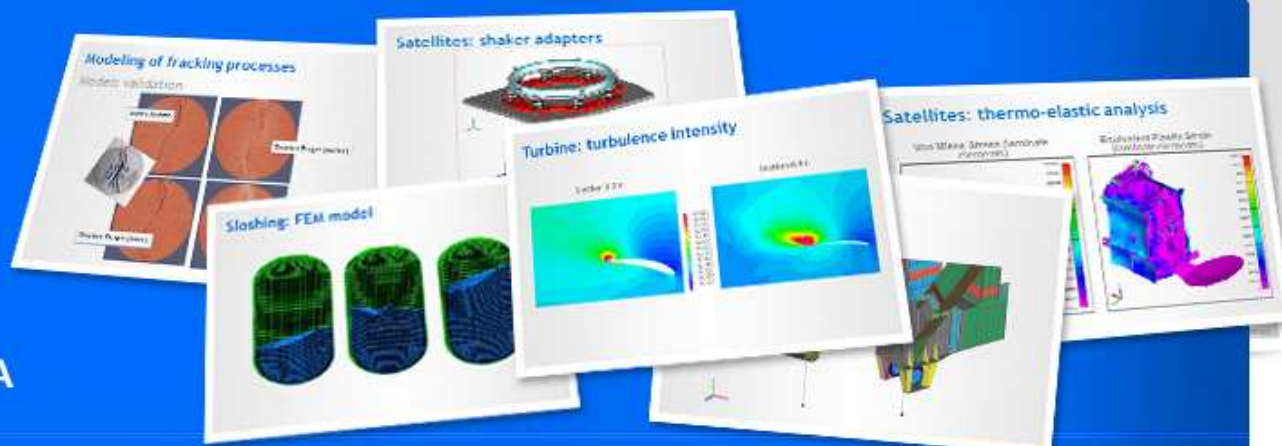


SIM&TEC

Simulación y Tecnología

Simulation and Technology

DE LA CIENCIA
A LA TECNOLOGIA



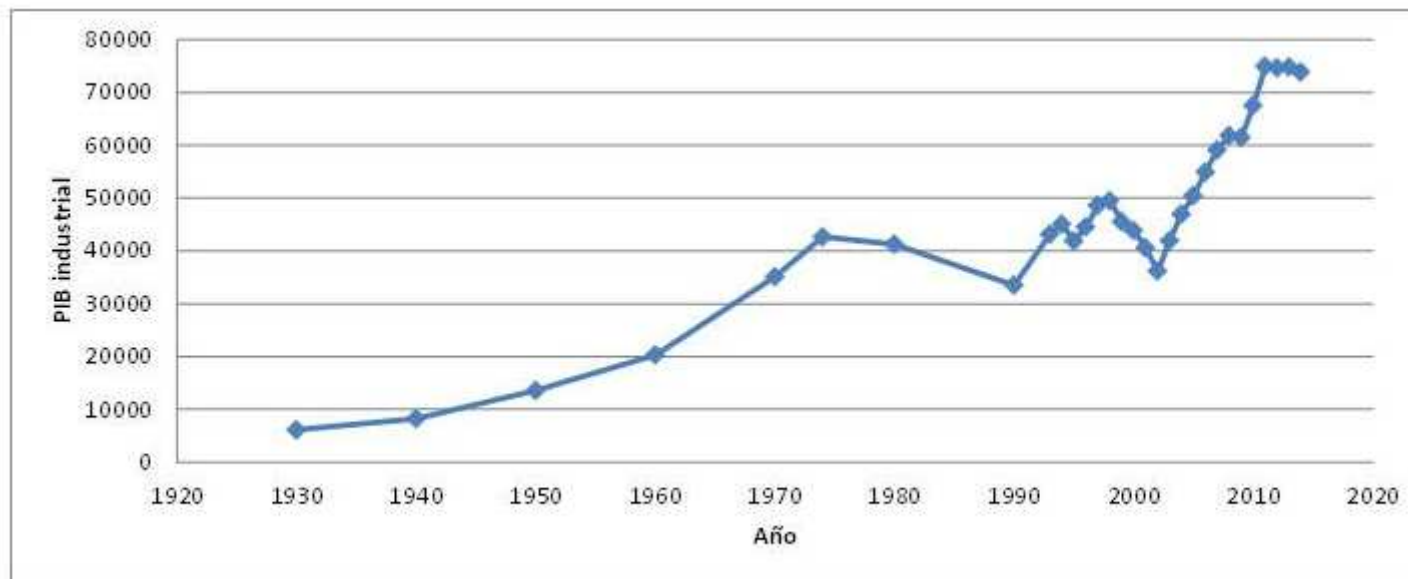
De la Ciencia a la Tecnología

El desafío para la comunidad argentina de Mecánica Computacional es contribuir a transformar conocimiento científico en Desarrollo Tecnológico argentino

Complejizar la matriz productiva argentina con producción local de tecnología para lo que el **Modelado Computacional** es una herramienta fundamental

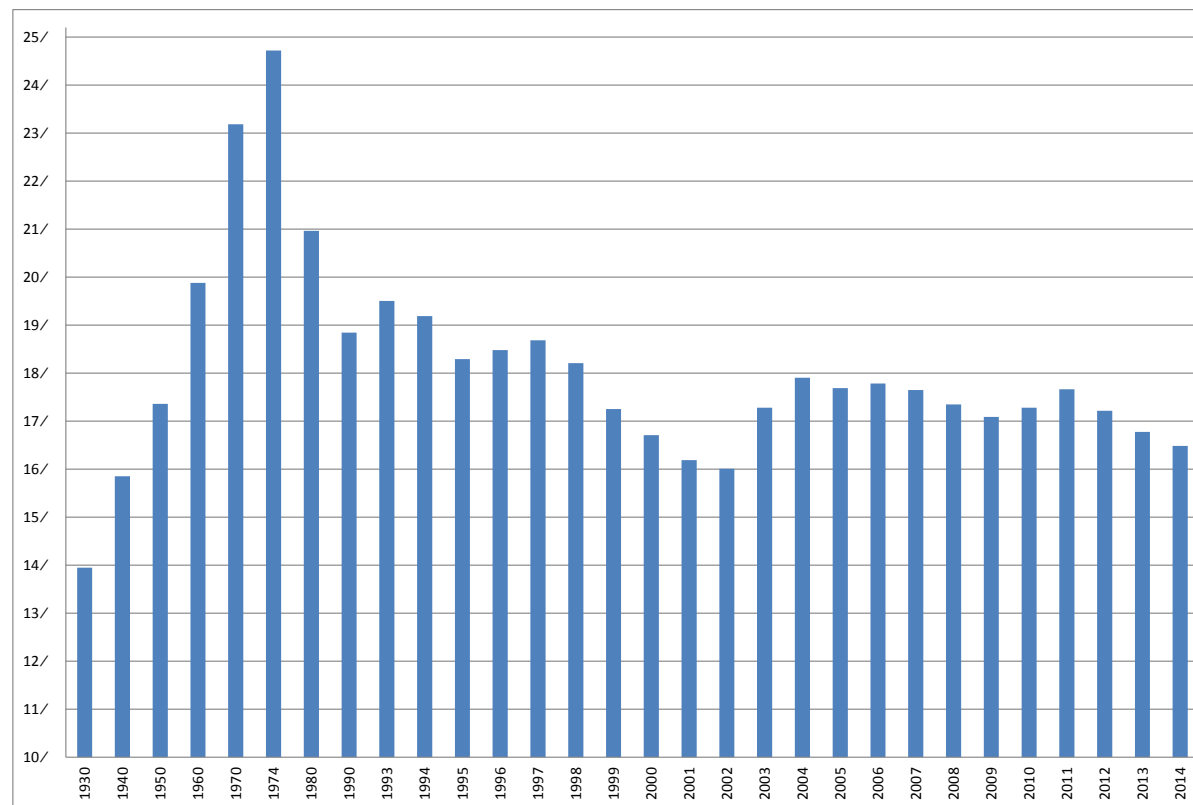
Desarrollo Tecnológico Argentino

Una lectura de la historia nacional



Desarrollo Tecnológico Argentino

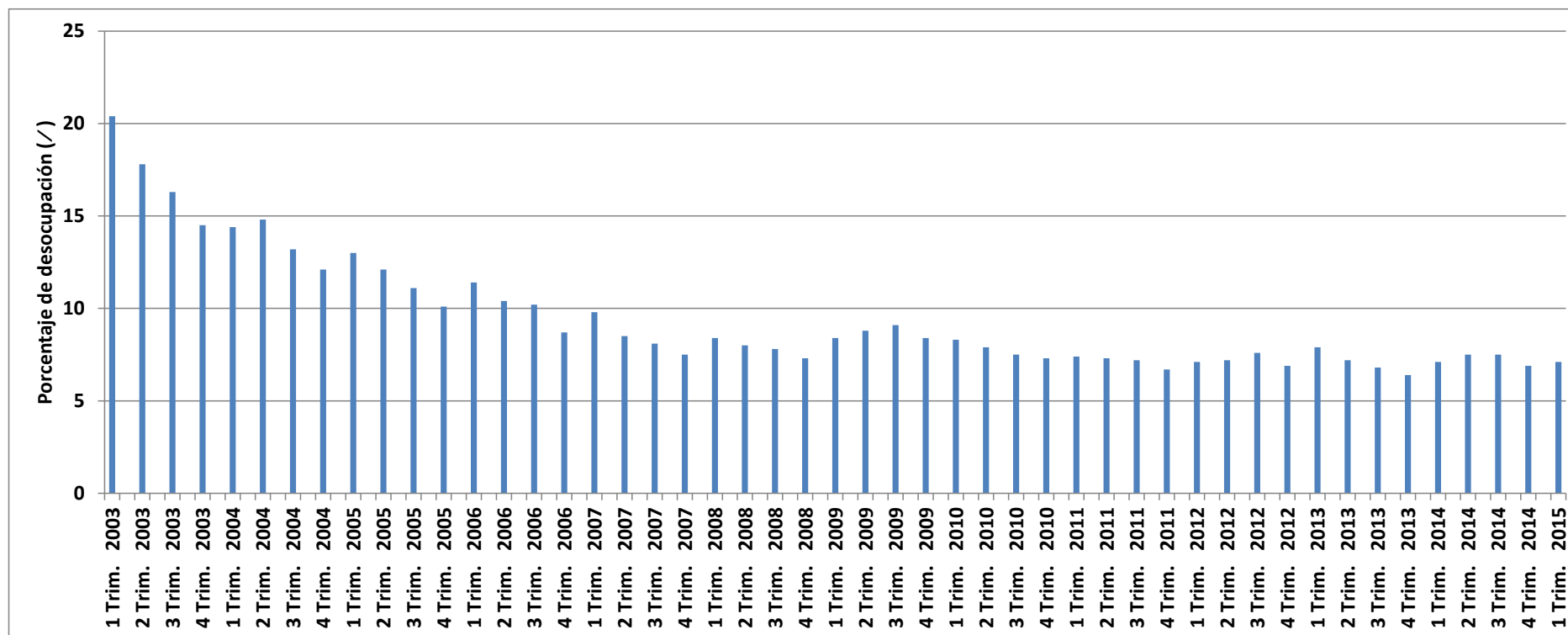
Una lectura de la historia nacional



Participación del PIB industrial en el PIB total

Desarrollo Tecnológico Argentino

Una lectura de la historia nacional



Desarrollo Tecnológico Argentino

¿Por qué producción local de tecnología?

2.1.1. Industria automotriz

Las terminales automotrices, que son multinacionales globalizadas, concentran la producción de autopartes en países seleccionados ya sea por su cercanía a los centros de consumo concentrado o por sus bajos costos. Este criterio, impecable desde la lógica de la producción en escala y de la optimización del beneficio, es decir, desde la lógica de las multinacionales, resulta altamente perjudicial para la economía argentina: los vehículos nacionales representan entre el 38% y el 44% de las ventas de vehículos en el mercado interno y estos “vehículos nacionales” tienen una integración nacional promedio del 34.3% [3], resultando que **hay un porcentaje de importación de aproximadamente un 85% en los vehículos que se venden en el mercado interno**. Cuantos más vehículos se venden más se deteriora la balanza comercial argentina.

El déficit comercial debido a la industria automotriz se estima para el 2014 en **8,000 millones de dólares**.

2.1.2. Industria electrónica

Nuevamente se trata de una industria con una muy fuerte participación de empresas multinacionales globalizadas y el déficit que provocan en la balanza comercial argentina fue de **7,211 millones de dólares** en el año 2012 [2].

Desarrollo Tecnológico Argentino

¿Por qué producción local de tecnología?

En el año 2012 la Argentina exportó bienes a un precio promedio de 806.58 USD/ton e importó bienes a un precio promedio de 2020.09 USD/ton, es decir el precio específico de los bienes importados es de 2.5 veces el precio específico de los bienes exportados lo que demuestra la baja complejidad de nuestra estructura industrial.



SIM&TEC
Simulación y Tecnología
Simulation and Technology

*Marcela Goldschmit, Rita Toscano
Eduardo Dvorkin*

- 15 personas (incluyendo secretaria y maestranza)
 - 3 doctores en Ingeniería
 - 1 doctora en Ciencia de la Computación
 - 9 ingenieros
- Desarrollo interno de tesis para maestrías FI-UBA
- Plan de carrera basado en el progreso en los niveles de educación formal y responsabilidad

- ➔ FAdeA S.A. | <http://www.fadeasa.com.ar>
- ➔ Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) | <http://www.inti.gov.ar>
- ➔ INVAP S.E. | <http://www.invap.com.ar>
- ➔ Nucleoeléctrica Argentina S.A. (NA-SA) | <http://www.na-sa.com.ar>
- ➔ PTC-Alliance | <http://www.ptcalliance.com/>
- ➔ QUIP | <http://www.quip.com.br>
- ➔ REPSOL-Bolivia | <http://www.repsol.com>
- ➔ ROCH S.A. | <http://www.roch.com.ar/>
- ➔ Socotherm Americas | <http://www.socotherm.com.ar>
- ➔ TENARIS | <http://www.tenaris.com>
- ➔ TERNIUM | <http://www.ternium.com>
- ➔ Tubo Trans Electric S.A. | <http://www.ttesa.com.ar>
- ➔ Veng S.A. | <http://www.conae.gob.ar>
- ➔ YPF | <http://www.ypf.com>
- ➔ YTEC S.A | <http://www.ypf.com/ypfylaindustria/YPFTecnologia/Paginas/YPF-Tecnologia-S-A.aspx>



Proyectos a presentar:

- Proyectos satelitales
- COPV
- Simulador de Fractura Hidráulica

Proyectos a presentar:

- Proyectos satelitales
- COPV
- Simulador de Fractura Hidráulica

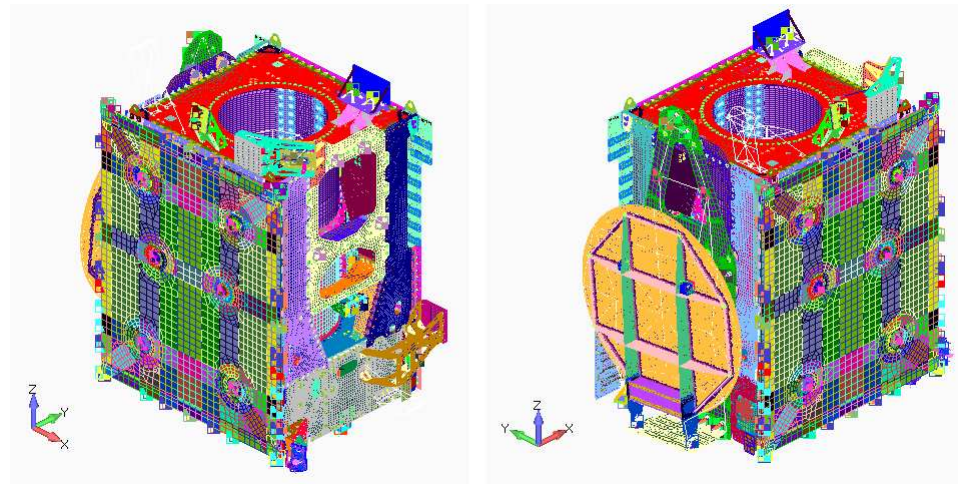
Proyectos satelitales

Cliente: INVAP S.E.

Lidera: Ing. Matías Wigutow

Proyectos satelitales

Modelos estructurales dinámicos y termoelásticos
de ARSAT-1, ARSAT-2, SAOCOM,
pre-diseño SARE

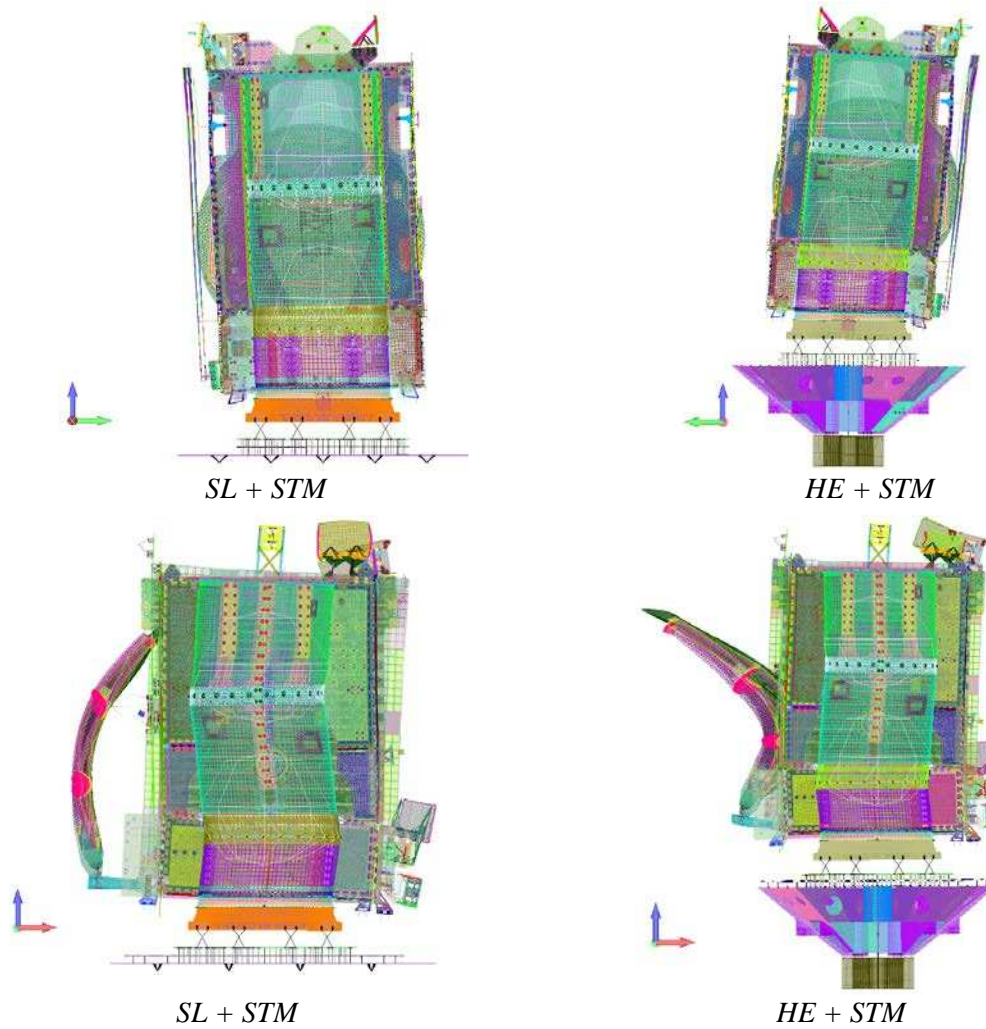


Total number of elements used to model ARSAT-1

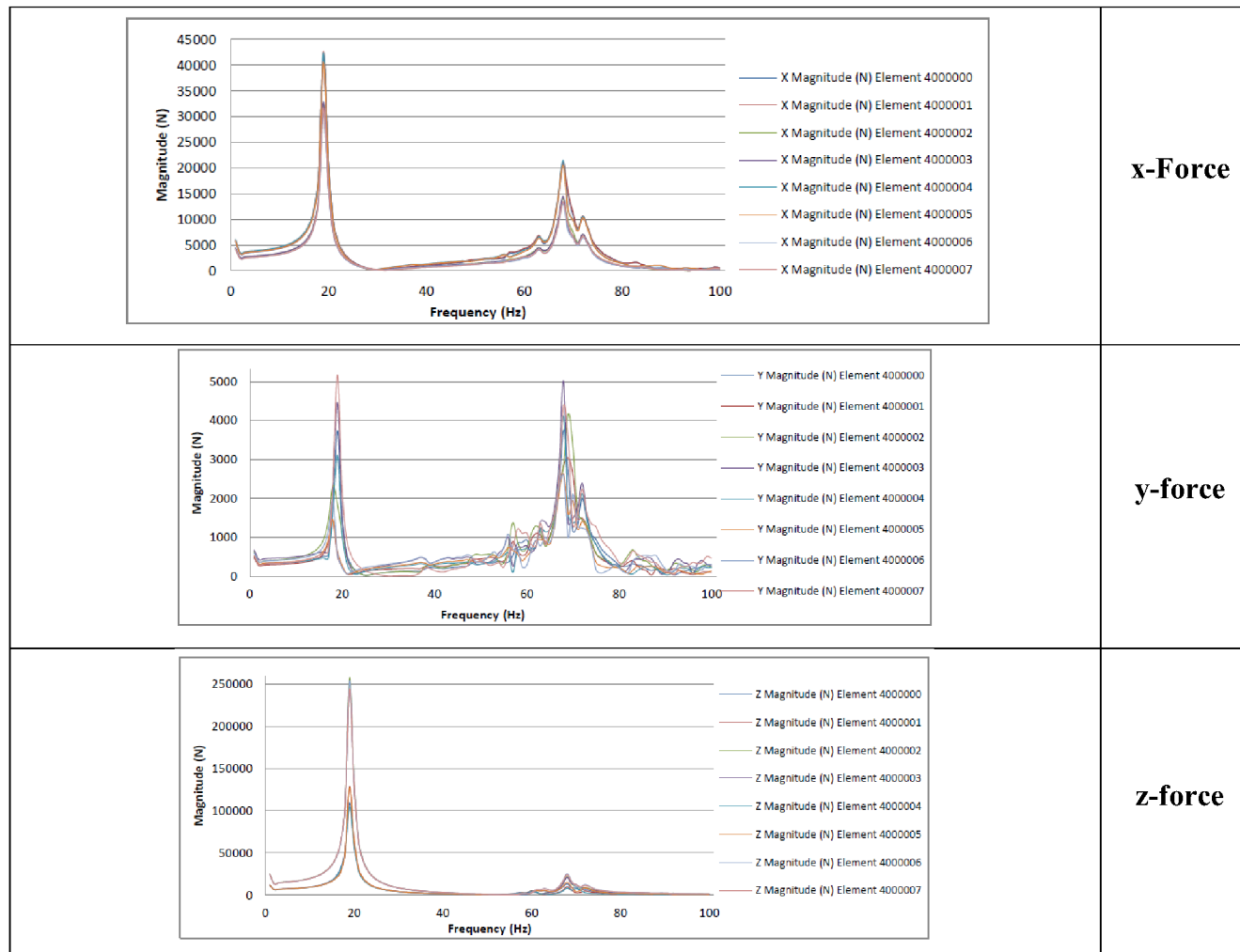
	ARSAT-1 STM	8 F-L SHA+SL	16 F-L SHA+SL	8 F-L SHA+HE	16 F-L SHA+HE
Element Type	# Elements	# Elements	# Elements	# Elements	# Elements
Bar	1,243	1,243	1,243	1,243	1,243
Beam	1,146	1,146	1,146	1,146	1,146
CBUSH	3,284	3,540	3,612	3,540	3,612
DOF spring	4,911	4,911	4,911	4,911	4,911
Plate	138,218	265,334	265,334	385,167	385,167
Laminate	276,682	276,682	276,682	276,682	276,682
Solid	0	206,488	206,488	206,488	206,488
Mass	355	371	387	371	387
Rigid	9,778	11,326	11,374	11,395	11,443
TOTAL	435,617	771,041	771,177	890,943	891,079

FEMAP – NASTRAN

Modos naturales flexionales ARSAT-1



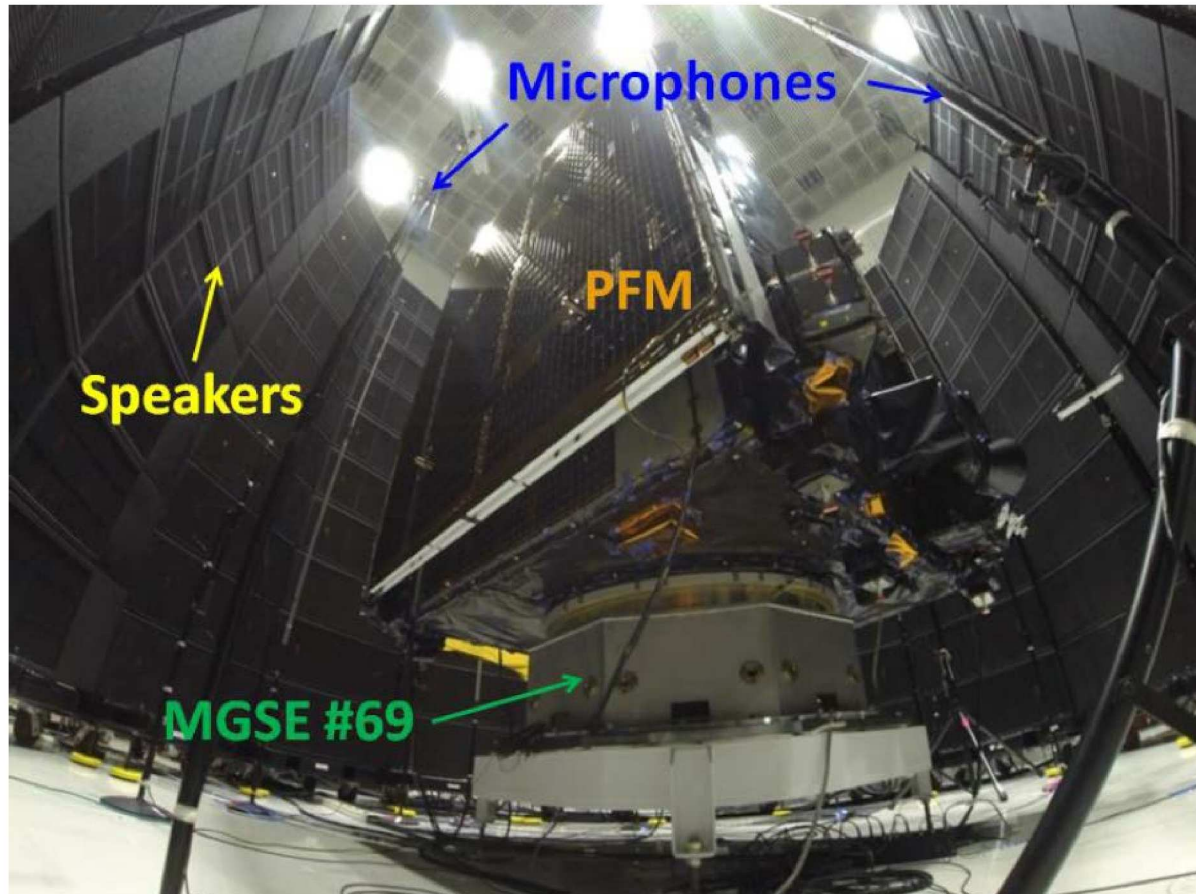
Sine sweep test con 8 force-links



Otros análisis dinámicos

Para el satélite en la ojiva del lanzador:

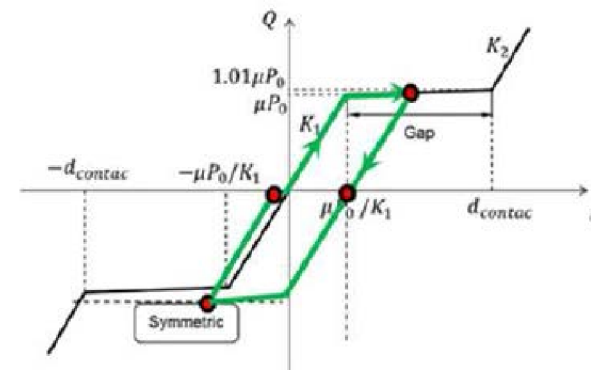
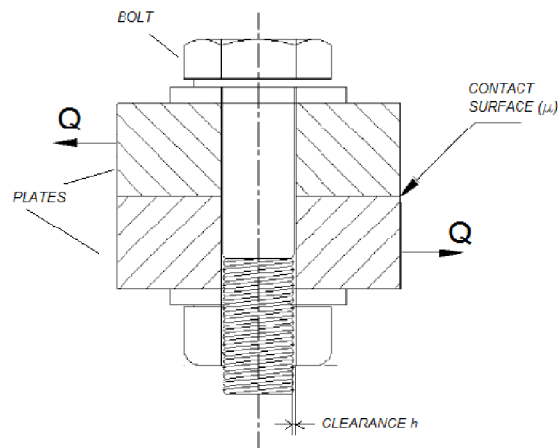
- Vibraciones aleatorias
- Presión acústica (Direct Acoustic Field)



DAF test arrangement at CEATSA (Bariloche, Argentina)

Análisis termoelástico

- Resistencia
- Alineación



Modelo de histéresis en la conexiones friccionales

Proyectos a presentar:

- Proyectos satelitales
- COPV
- Simulador de Fractura Hidráulica

Proyectos satelitales

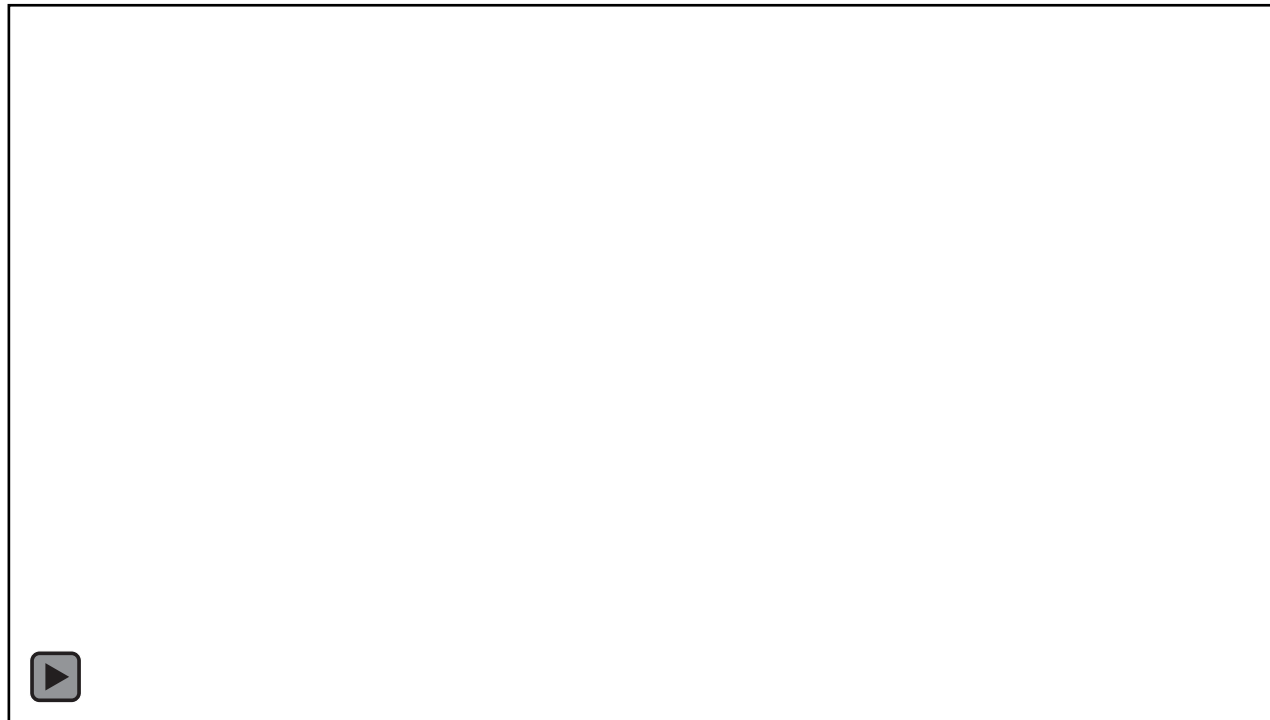
Cliente: VENG S.A.

Lidera: Ing. Hernán Logarzo

Composite Overwrapped Pressure Vessels









Fibra de Carbono

Marca y modelo: TORAY T700 12k

Resistencia a la tracción: 4900 MPa

Módulo de elasticidad: 230 GPa

Diámetro del filamento: 7 mm

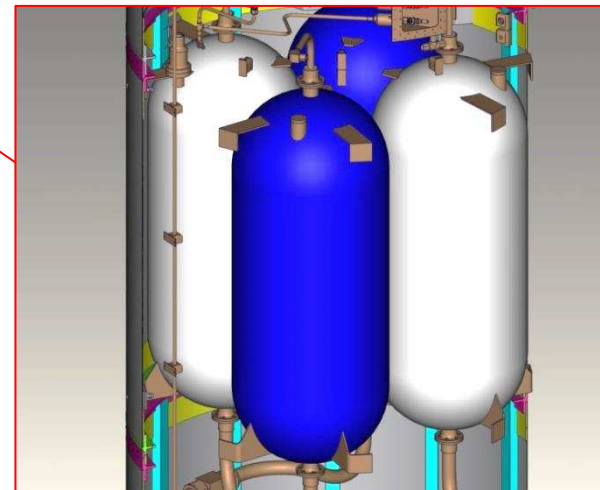
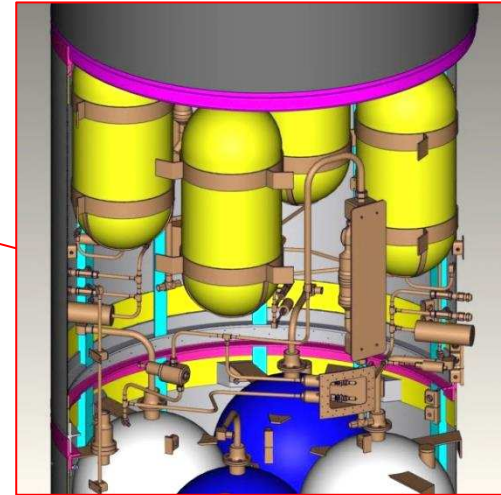
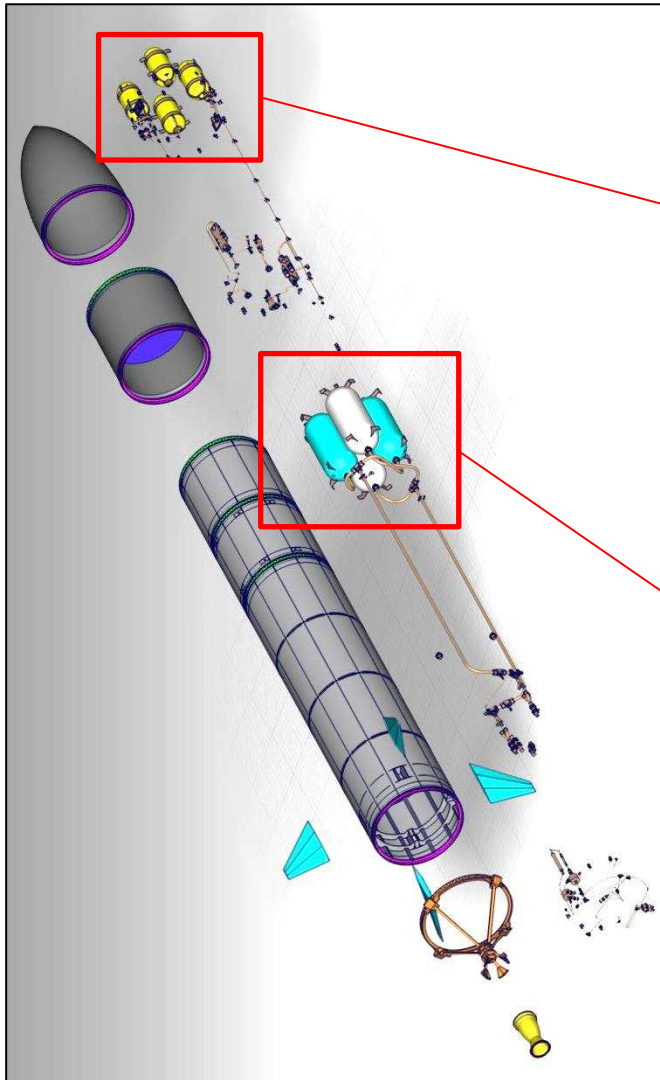
Peso: 1800 kg/m³



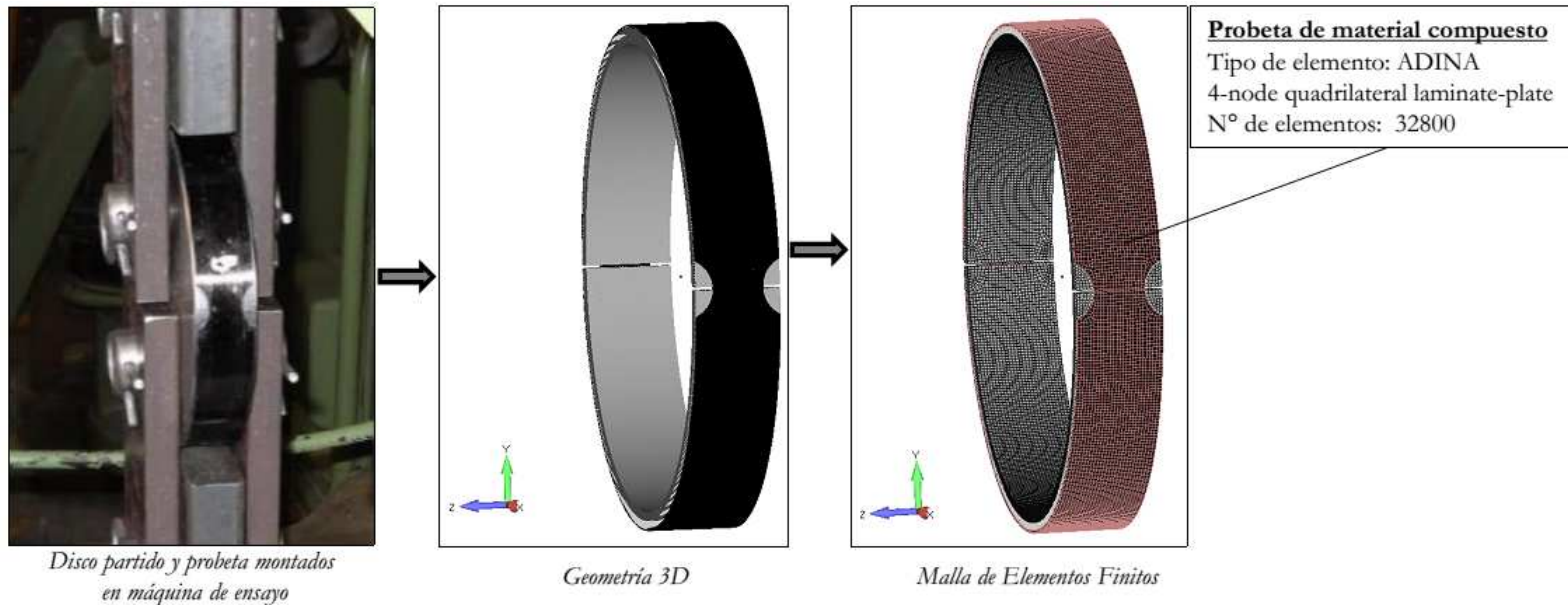
Resina epoxi

Fabricada por

INTEMA (Grupo de Materiales Compuestos)



Laminado: ensayo de disco partido



KOHLLENIA desarrolló el ensayo físico en el Laboratorio de Materiales de FI-UBA

Laminado: ensayo de disco partido

Lote N°	Ángulo bobinado	% de fibra en volumen	Solapamiento [%]	σ_{rotura} (teórico)	Carga de rotura promedio [N]
1=2	88.38	0.69	0	3381	74284
3	89.51	0.74	20	3626	99529
4	88.38	0.80	0	3920	71953
5	88.38	0.62	0	3038	85711

Tabla I – Características de lotes de probetas

Laminado: ensayo de disco partido

Modelos de material:

- Modelo ortótropo (mono capa)
- Modelo de capas alternadas de fibras (elásticas ortótropas) y matriz (plasticidad de Hill)

Laminado: ensayo de disco partido

Modelo ortótropo (mono capa)

Criterio de falla de Tsai-Hashin

El criterio de falla de Tsai-Hashin se aplica especialmente a materiales compuestos, donde los mecanismos de falla de la matriz y de las fibras son distintos. La falla ocurre cuando se satisfacen las siguientes desigualdades:

$$\frac{\sigma_{11}}{S_{11}^+} \geq 1 \quad (\text{si } \sigma_{11} > 0) \quad \longrightarrow \quad \text{Falla de fibras debido a esfuerzos de tracción}$$

$$\frac{\sigma_{11}}{S_{11}^-} < 1 \quad (\text{si } \sigma_{11} < 0) \quad \longrightarrow \quad \text{Falla de fibras debido a esfuerzos de compresión}$$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{S_{22}^+}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1 \quad (\text{si } \sigma_{22} > 0) \quad \longrightarrow \quad \text{Falla de matriz debido a esfuerzos de tracción}$$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{2 \cdot S_{23}}\right)^2 + \left[1 - \left(\frac{S_{22}^-}{2 \cdot S_{23}}\right)^2\right] \cdot \frac{\sigma_{22}}{S_{22}^-} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 \geq 1 \quad (\text{si } \sigma_{22} < 0) \quad \longrightarrow \quad \text{Falla de matriz debido a esfuerzos de compresión}$$

Donde:

S_{11}^+ = Esfuerzo límite de tracción en dirección 1 (longitudinal a las fibras) = $\sigma_{\text{rotura (teórico)}}$ (valores indicados en Tabla I)

S_{11}^- = Esfuerzo límite de compresión en dirección 1 (longitudinal a las fibras) = - 1570 MPa

S_{22}^+ = Esfuerzo límite de tracción dirección 2 (perpendicular a las fibras) = 70 MPa

S_{22}^- = Esfuerzo límite de compresión en dirección 2 (perpendicular a las fibras) = - 350 MPa

S_{12} = Esfuerzo límite de corte en el plano 1-2 = 98 MPa

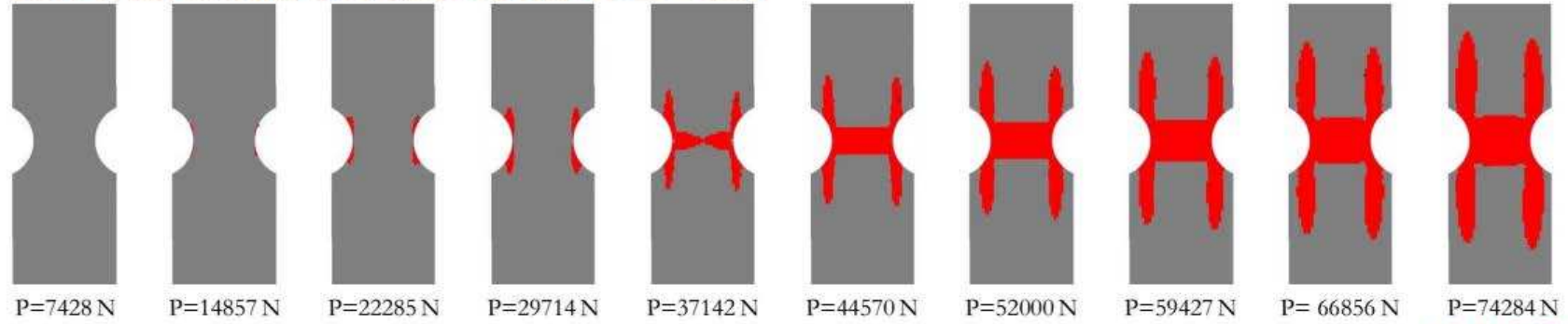
S_{23} = Esfuerzo límite de corte en el plano 2-3 = 98 MPa

Los valores de esfuerzos límites se obtienen del catálogo del fabricante de fibras.

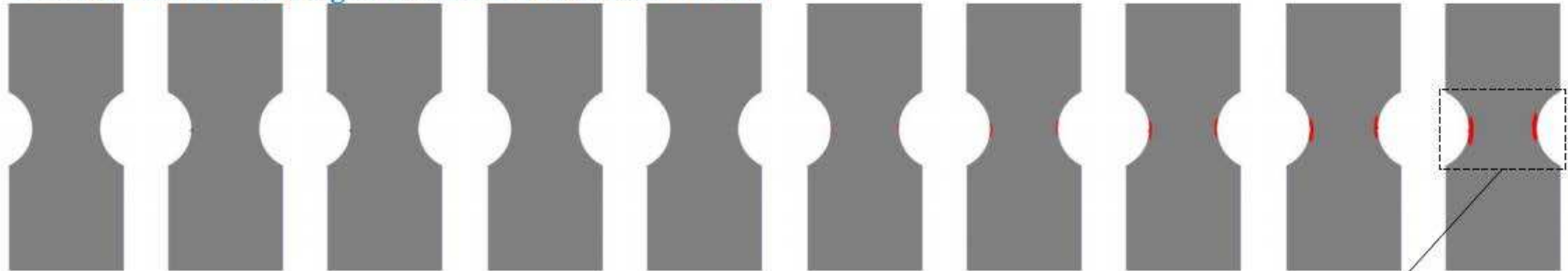
Laminado: ensayo de disco partido

Modelo ortótropo (mono capa)

Zonas de falla de Matriz según *Criterio de Tsai-Hashin* – Lote 1

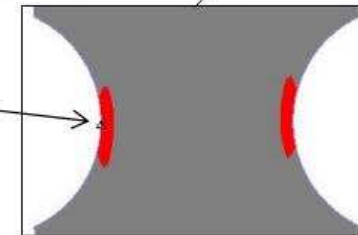


Zonas de falla de Fibras según *Criterio de Tsai-Hashin* – Lote 1



(falla de la probeta)

$$\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{rotura(teórico)}} \geq 1$$

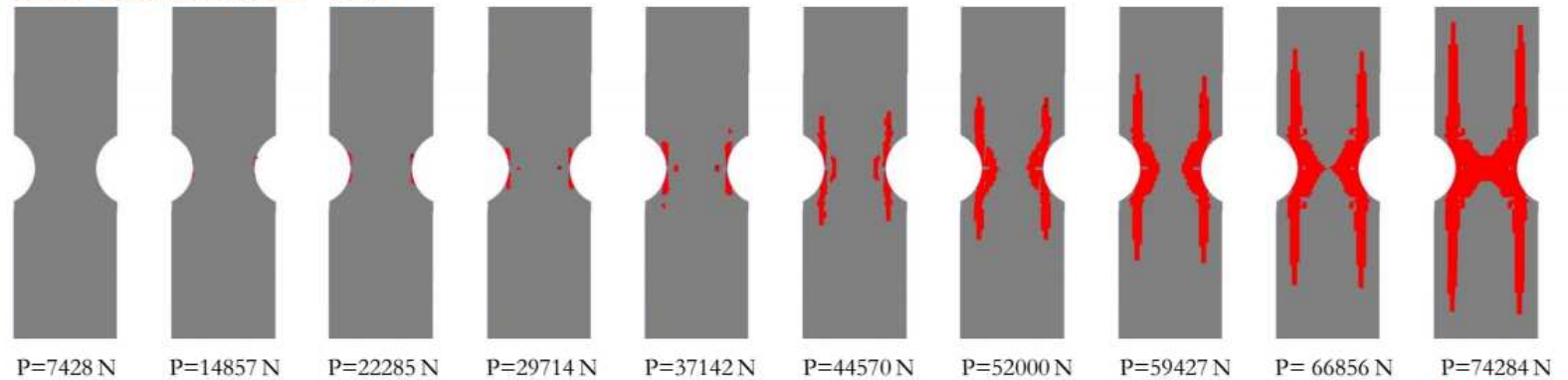


Las zonas de fallas para los Lotes 3, 4 y 5 son similares (variaciones de décimas de milímetros)

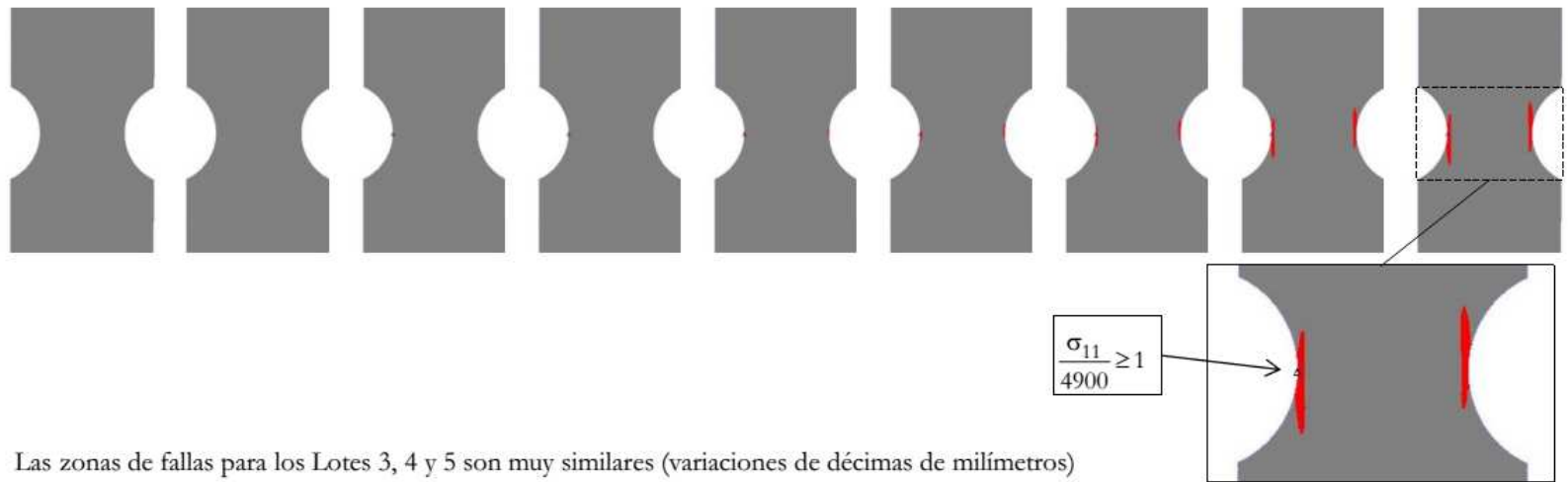
Laminado: ensayo de disco partido

Modelo de capas alternadas de fibras (elásticas ortótropas) y matriz (plasticidad de Hill)

Zonas de falla de Matriz – Lote 1



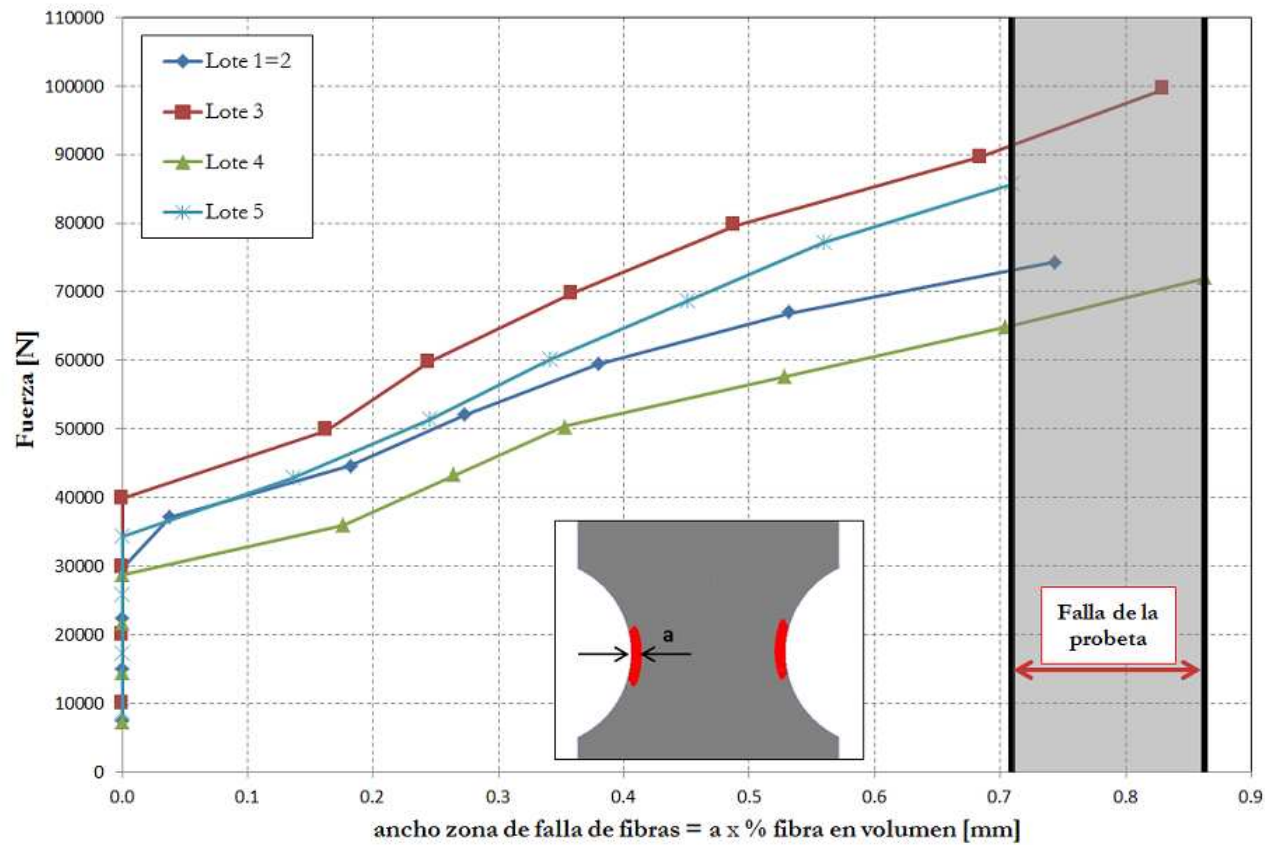
Zonas de falla de Fibras – Lote 1



Las zonas de fallas para los Lotes 3, 4 y 5 son muy similares (variaciones de décimas de milímetros)

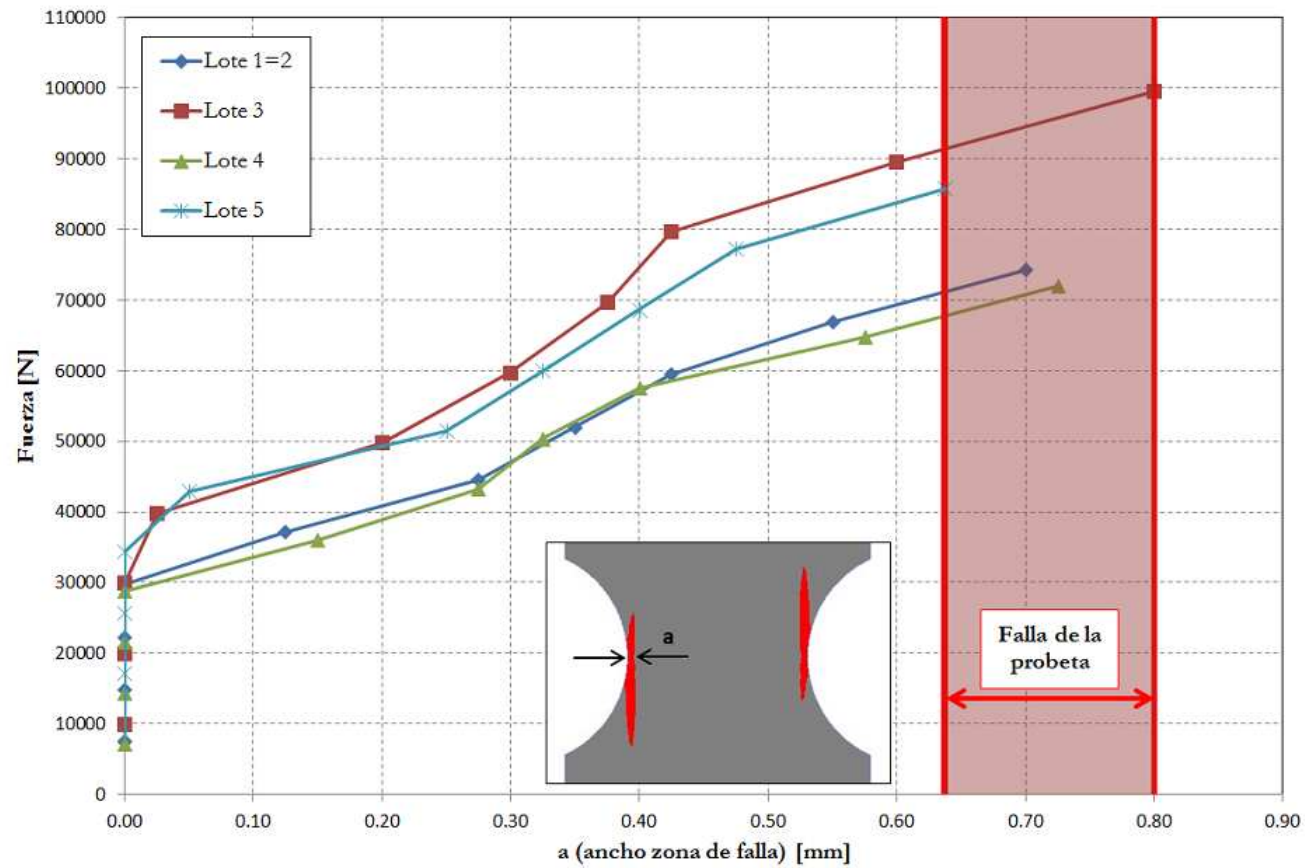
4.1 Resultados Modelo Ortótropo

Gráfico *Fuerza – ancho zona de falla de fibras*



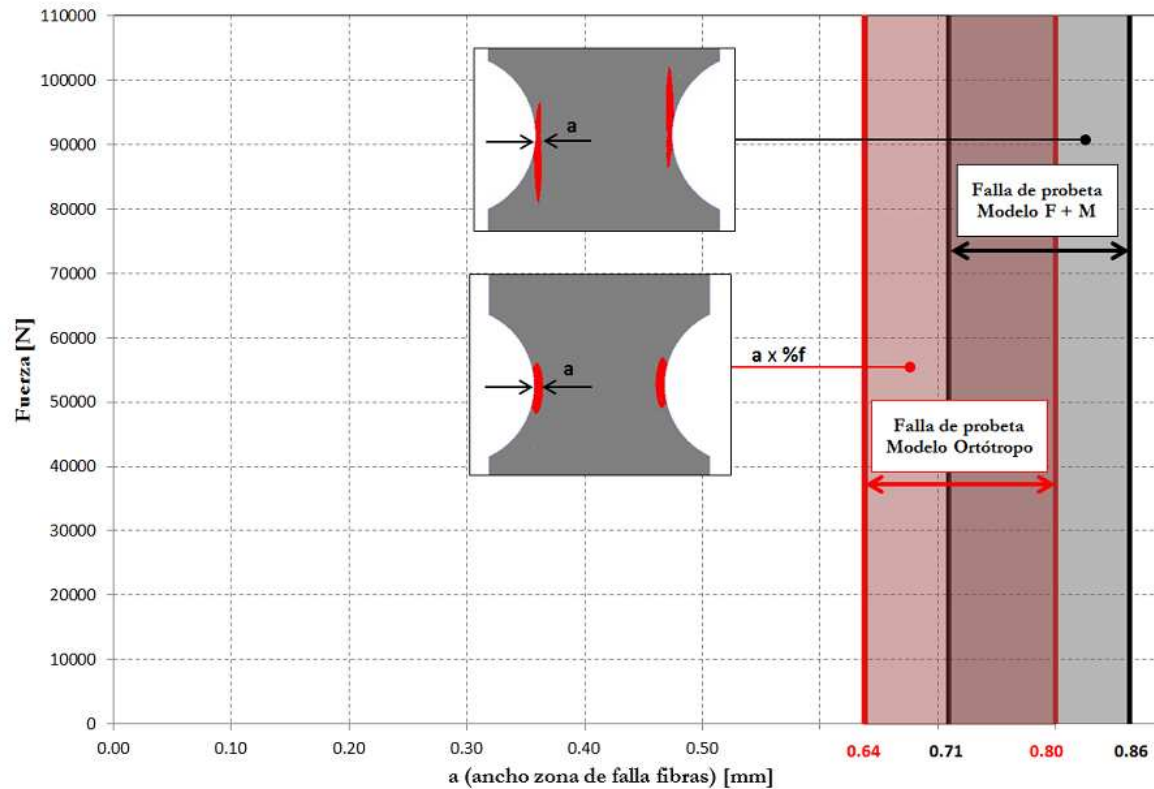
4.2 Resultados Modelo Fibras + Matriz

Gráfico *Fuerza – ancho zona de falla de fibras*



Laminado: ensayo de disco partido

Comparación de modelos



En el caso de los ensayos de disco partido ambos modelos dan resultados prácticamente coincidentes

RECIPIENTES BOBINADOS METAL-COMPUESTO

Liner

- Recipiente comercial de Aluminio 6061-T6
- Capacidad: 50 litros

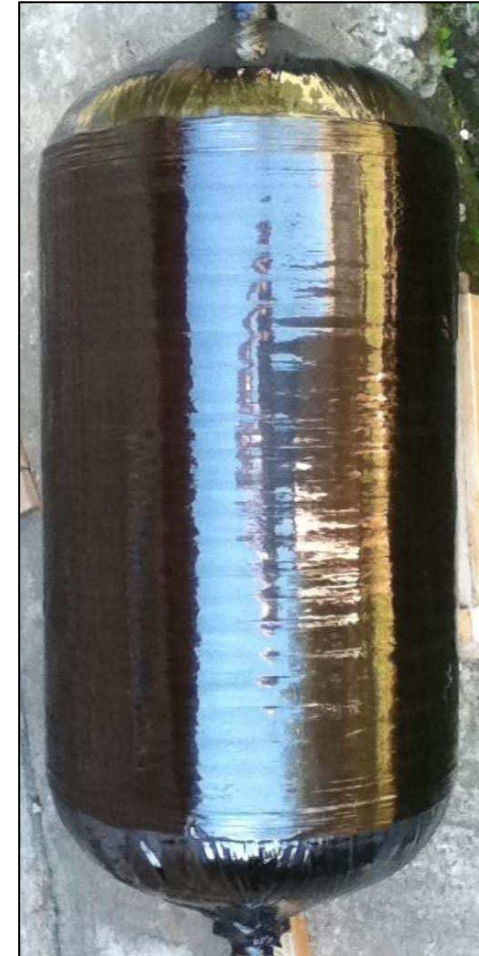
Laminado

- Secuencia de bobinado
[$(\pm 88.9^\circ / \pm 7.9^\circ)_7 / \pm 88.9_5$]
- Espesor: 7.10 mm
- Relación de fibras en volumen: 45%

Geometría s/ “Composite Pressure Vessels” – V. V. Vasiliev

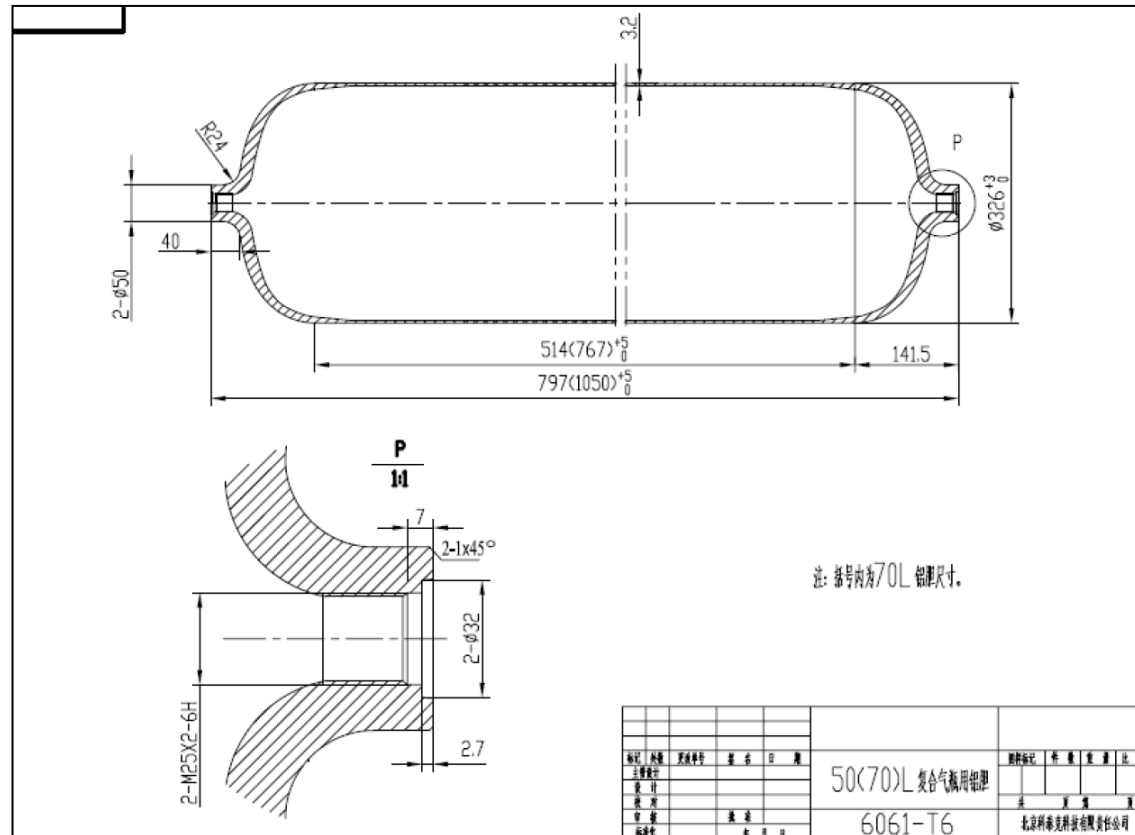
Presión de trabajo : 20 MPa

Presión de estallido: 50 MPa



RECIPIENTES BOBINADOS METAL-COMPUESTO

Liner de aluminio



Tipos y cantidad de elementos utilizados:

Líner (sección cilíndrica): 4-node shell MITC4 (12800 elementos)

Líner (casquetes): 8-node hexahedral (65000 elementos)

Laminado: 4-node laminate-shell (23400 elementos)

RECIPIENTES BOBINADOS METAL- COMPUESTO

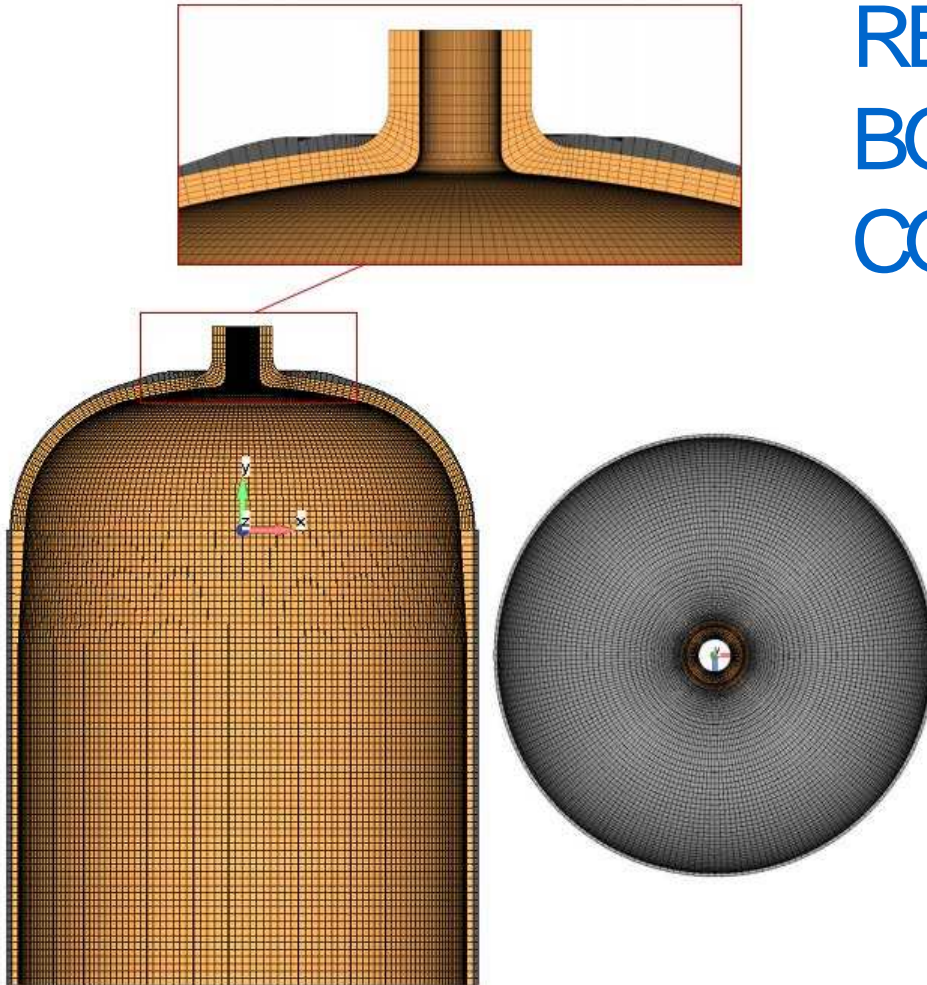


Figura 2 – Sección transversal y vista superior de la malla de elementos finitos

RECIPIENTES BOBINADOS METAL-COMPUESTO

Modelos de elementos finitos

Modelos de material para el laminado

Modelo de mono capa ortótropa	Predice tensiones /deformaciones excesivas no realistas en los cambios de sección
Modelo multicapa Matriz-fibras	Predice tensiones que fueron validadas en los experimentos de estallido

RECIPIENTES BOBINADOS METAL-COMPUESTO

Modelos de elementos finitos

Ciclado de presión interna

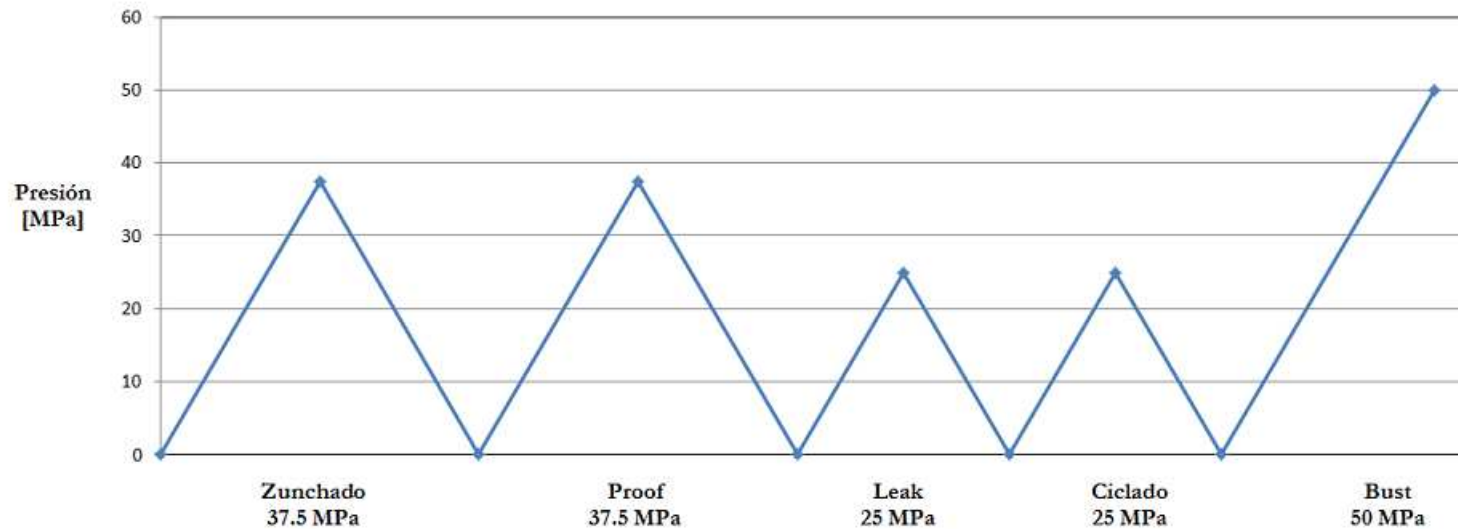


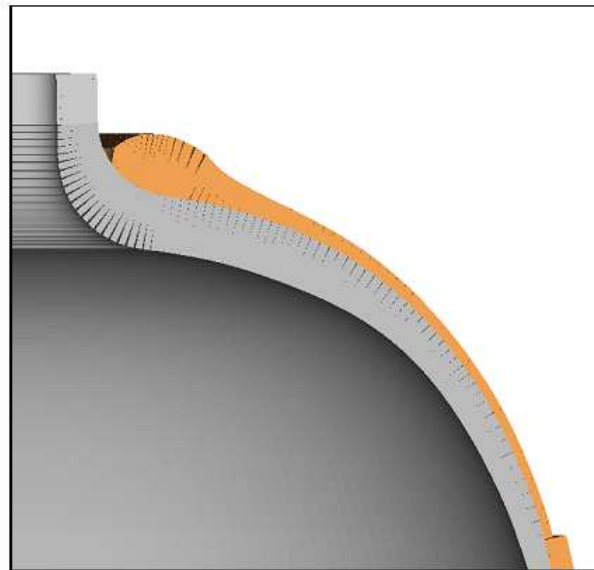
Figura 10 – Presión interior aplicada al modelo

RECIPIENTES BOBINADOS METAL-COMPUESTO

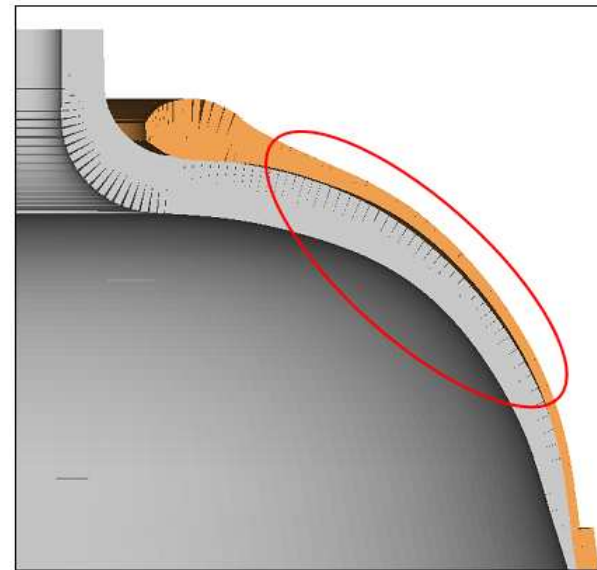
Modelos de elementos finitos

Unión liner –bobinado. Se analizaron 2 casos extremos:

- Contacto con adherencia total
- Contacto sin fricción



Deformada de casquete para condición adherido



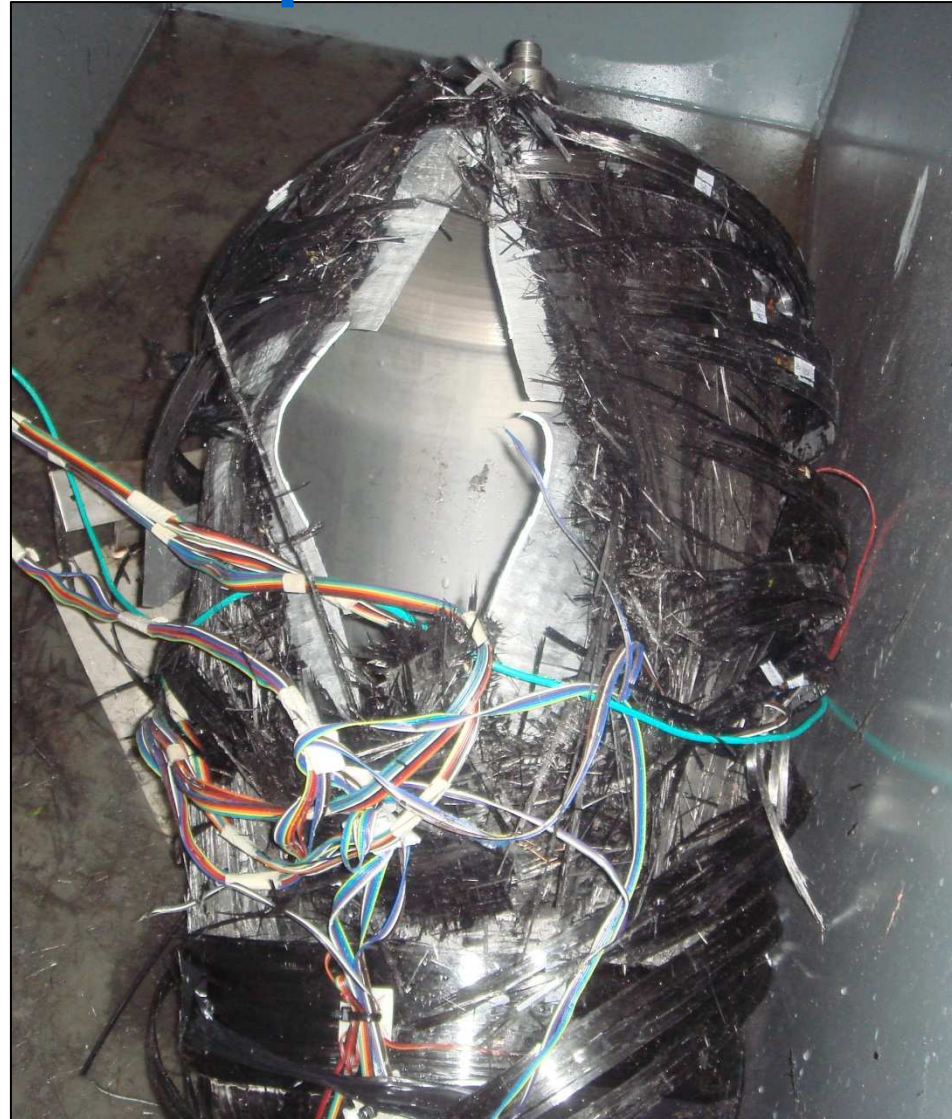
Deformada de casquete para condición de contacto

Ensayo del Recipiente de 50lts

- Ensayo realizado en la Base Aeronaval de Punta Indio
- Se realizó ensayo de Emisión Acústica (CNEA)
- Ciclo de carga: zunchado –proof –burst



Ensayo del Recipiente de 50lts



Ensayo del Recipiente de 50lts

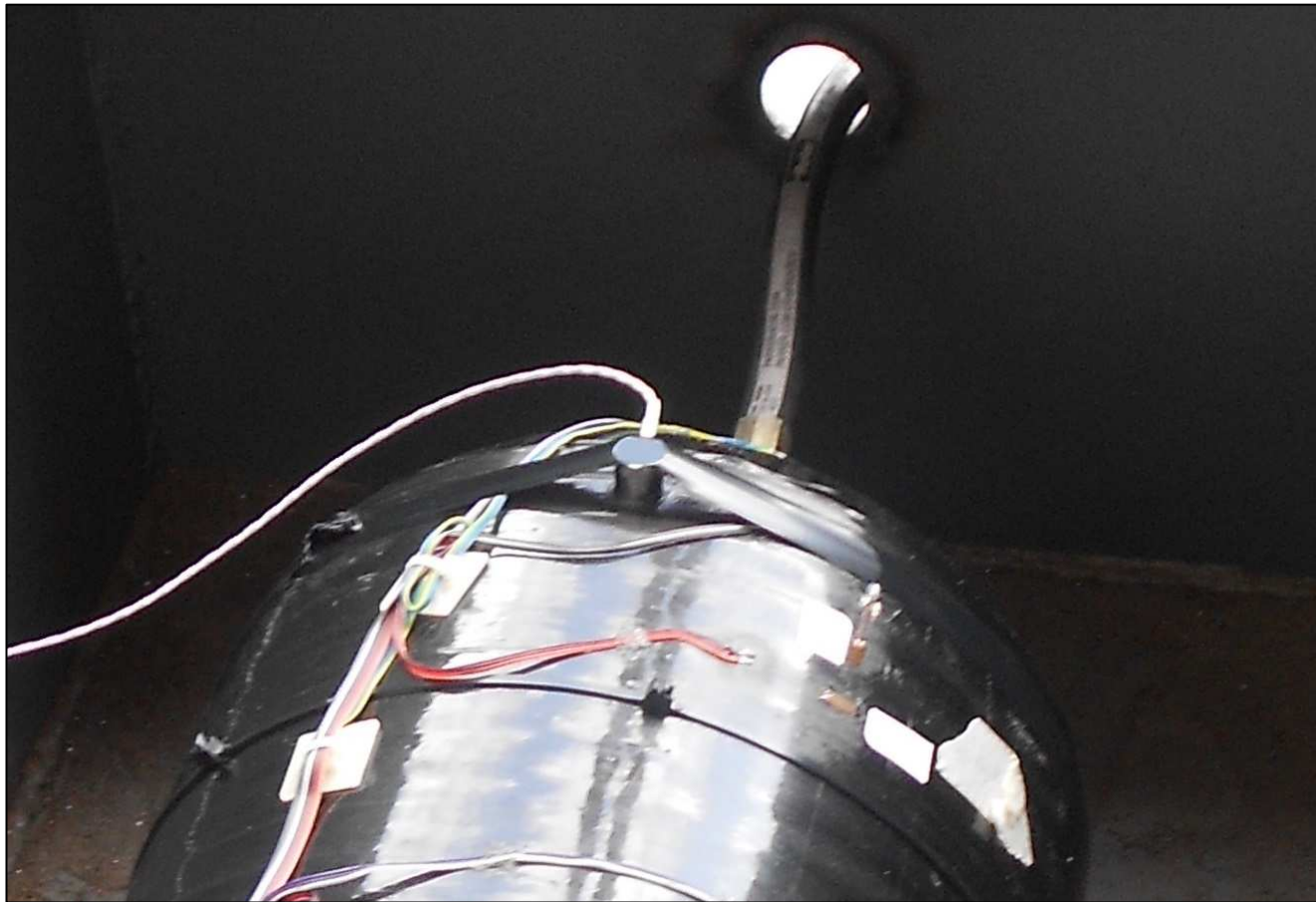
Presión de falla de ensayo = P_e = 54 MPa

Presión de falla MEF = P_{mef} = 52 MPa

P_{MEF} / P_e = 0.963

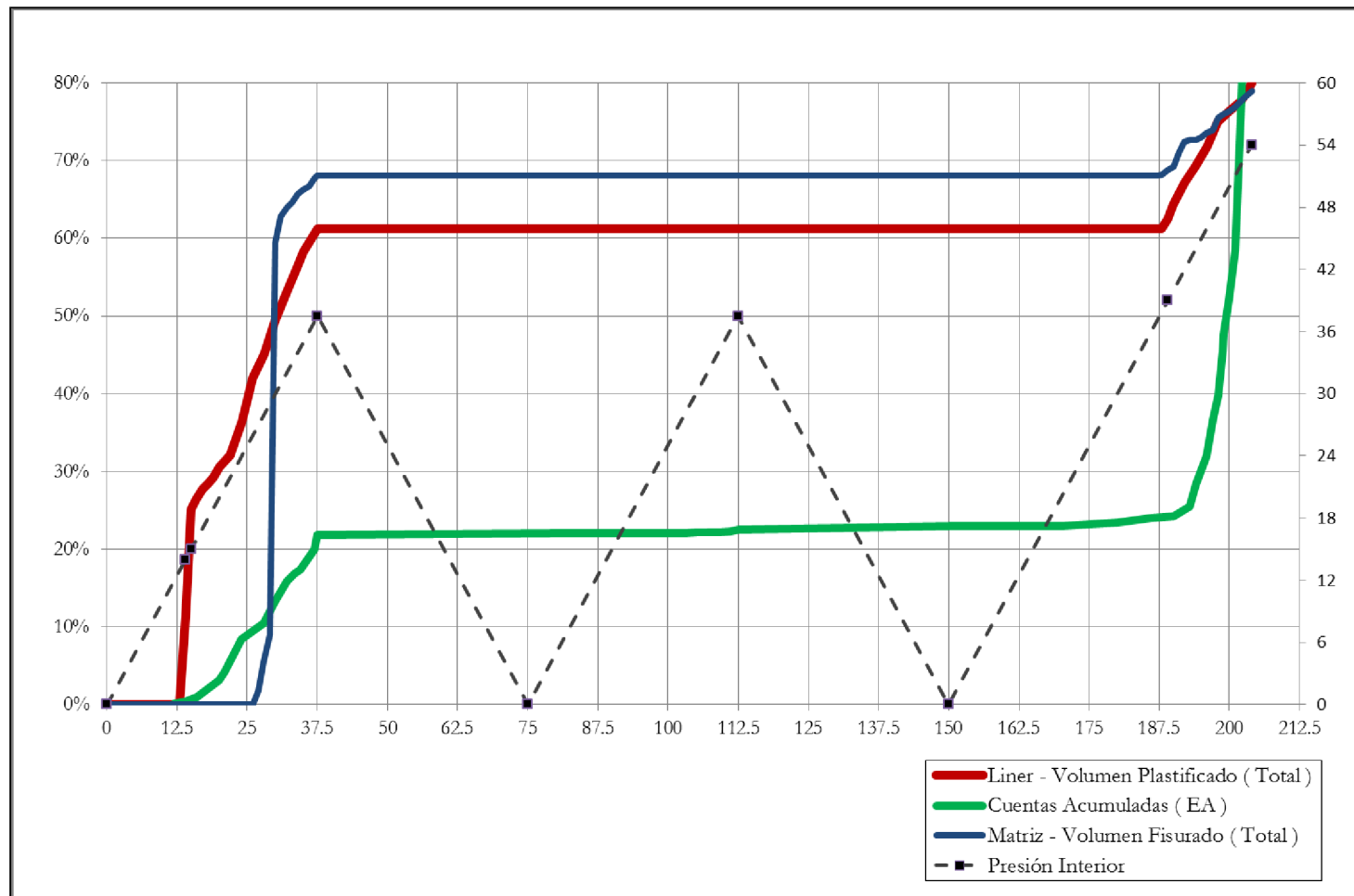
Ensayo del Recipiente de 50lts

Ensayo de Emisión Acústica – Setup



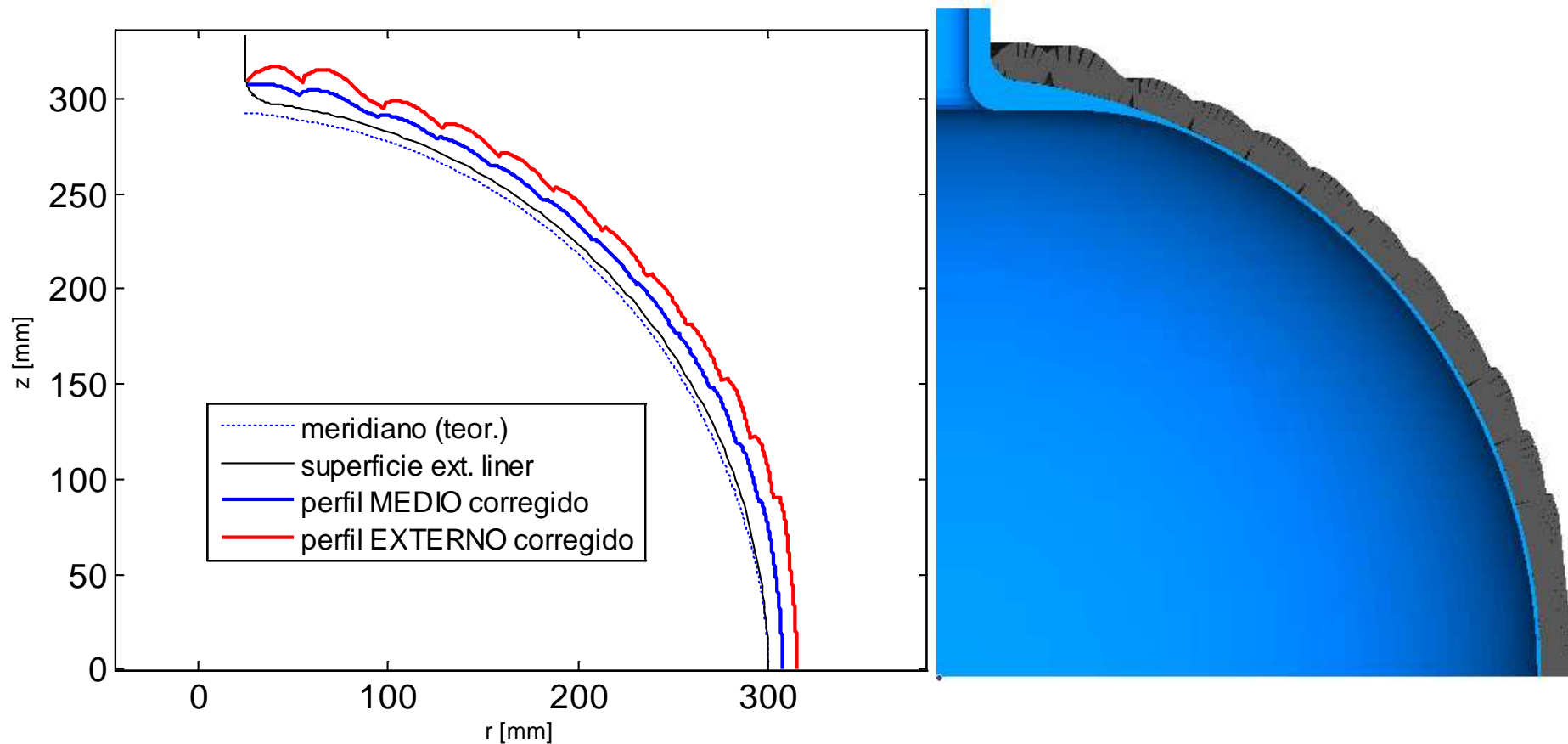
Ensayo del Recipiente de 50lts

Ensayo de Emisión Acústica - Comparación de resultados



Tanque esférico de 600mm

Geometría s/ “Composite Pressure Vessels” – V. V. Vasiliev

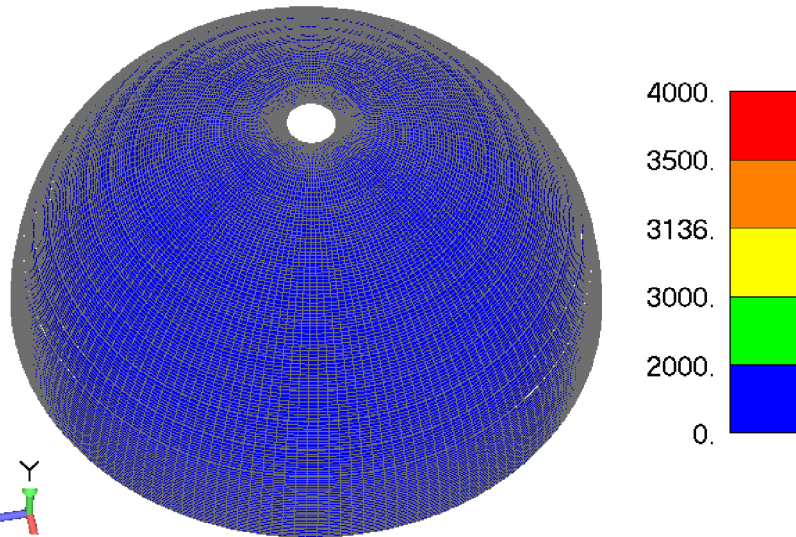


$(\pm 4.8)_4 / (\pm 10)_4 / (\pm 18)_3 / (\pm 24)_3 / (\pm 30)_3 / (\pm 36)_3 / (\pm 42)_3 / (\pm 48)_3 /$
 $(\pm 54)_3 / (\pm 60)_4 / (\pm 66)_4 / (\pm 72)_4$

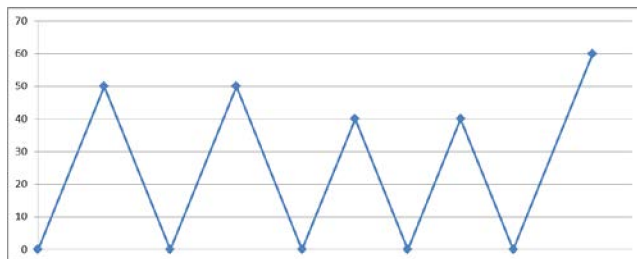
Espesor en ecuador: 15 mm

RESULTADOS - Modelo micromecánico - 600 mm - Al6061-T6 - Tensiones en fibras

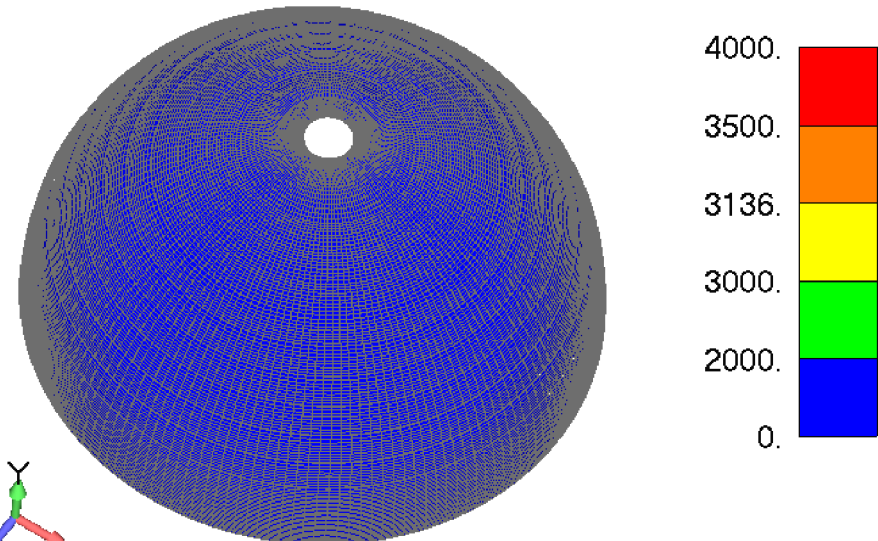
Adherencia total



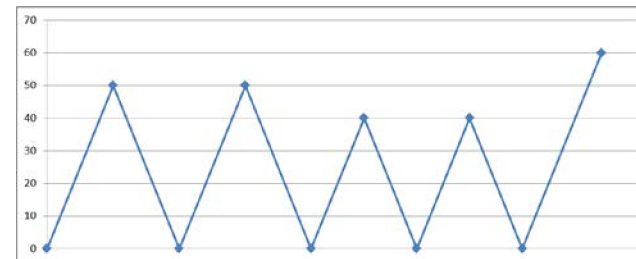
Output Set: Case 1 Time 5.
Animate(0.239/3.878): Total Translation
Elemental Contour: Lam Ply1 X Normal Stress



Sin fricción



Output Set: Case 1 Time 5.
Animate(0.252/3.342): Total Translation
Elemental Contour: Lam Ply1 X Normal Stress



Proyectos a presentar:

- Proyectos satelitales
- COPV
- Simulador de Fractura Hidráulica

Desarrollo de Simulador de Fractura Hidráulica

Cliente: YTEC S.A.

Desarrollo de un simulador de fractura hidráulica

Grupo de Desarrollo

YTEC
+
SIM&TEC
+
Para-Sim (MIT spin off – Raúl Radovitzky)

Desarrollo de un simulador de fractura hidráulica

Requisitos:

- Incorporación de los criterios fractomecánicos
- Escalabilidad

- Modelo acoplado fluido –sólido
- Formulación del modelo de sólido: Discontinuous Galerkin
- Formulación del modelo de fluido: Continuous Galerkin

Desarrollo de un simulador de fractura hidráulica

Discontinuous Galerkin

INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING

Int. J. Numer. Meth. Engng 2006; **68**:64–97

Published online 30 March 2006 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/nme.1699

A general discontinuous Galerkin method for finite hyperelasticity. Formulation and numerical applications

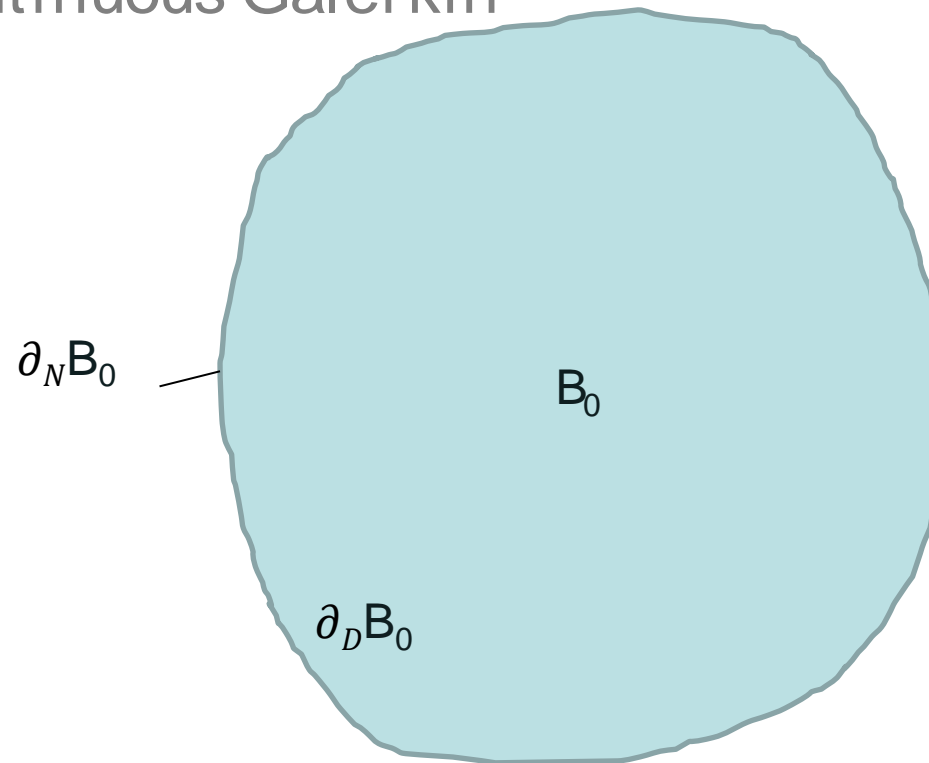
L. Noels^{1,2,‡} and R. Radovitzky^{1,*,†}

¹*Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Ave, Cambridge, MA 02139-4307, U.S.A.*

²*University of Liège, LTAS-Milieux Continus and Thermomécanique, Chemin des Chevreuils 1, B-4000 Liège, Belgium*

Desarrollo de un simulador de fractura hidráulica

Discontinuous Galerkin



$$\nabla_0 \mathbf{P} + \rho_0 \mathbf{B} = \mathbf{0} \quad \text{in } B_0$$

$$\varphi = \bar{\varphi} \quad \text{on } \partial_D B_0$$

$$\mathbf{P} \cdot \mathbf{N} = \bar{\mathbf{T}} \quad \text{on } \partial_N B_0$$

B_0 es la configuración de referencia ($t=0$) o configuración material

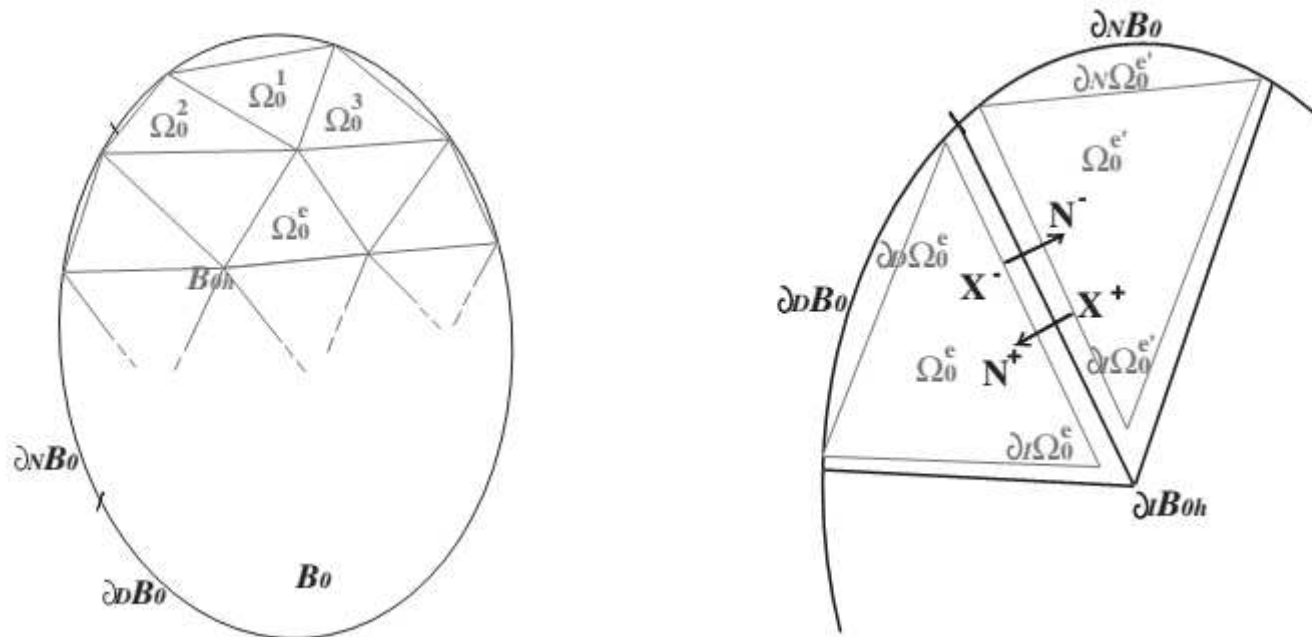
Formulación Variacional Hu – Washizu - deVeubeke

Discontinuous Galerkin

$$I(\boldsymbol{\varphi}, \mathbf{F}, \mathbf{P}) = \int_{B_0} [W(\mathbf{F}) - \rho_0 \mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\varphi} + \mathbf{P} : (\nabla_0 \boldsymbol{\varphi} - \mathbf{F})] dV_0 \\ - \int_{\partial_D B_0} (\boldsymbol{\varphi} - \bar{\boldsymbol{\varphi}}) \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{N} dS_0 - \int_{\partial_N B_0} \bar{\mathbf{T}} \cdot \boldsymbol{\varphi} dS_0$$

Discretización

Discontinuous Galerkin



Discretización

Discontinuous Galerkin

$$I_h(\boldsymbol{\varphi}_h, \mathbf{F}_h, \mathbf{P}_h) = \sum_e^E I_h^e(\boldsymbol{\varphi}_h^e, \mathbf{F}_h^e, \mathbf{P}_h^e)$$

$$\begin{aligned} I_h^e(\boldsymbol{\varphi}_h^e, \mathbf{F}_h^e, \mathbf{P}_h^e) = & \int_{\Omega_0^e} [W(\mathbf{C}_h^e) + \mathbf{P}_h^e : (\nabla_0 \boldsymbol{\varphi}_h^e - \mathbf{F}_h^e) - \rho_0 \mathbf{B}_0 \cdot \boldsymbol{\varphi}_h^e] dV_0 \\ & - \int_{\partial_D \Omega_0^e} (\boldsymbol{\varphi}_h^e - \bar{\boldsymbol{\varphi}}_h) \cdot \mathbf{P}_h^e \cdot \mathbf{N} dS_0 - \int_{\partial_N \Omega_0^e} \bar{\mathbf{T}} \cdot \boldsymbol{\varphi}_h^e dS_0 \\ & - \frac{1}{2} \int_{\partial_I \Omega_0^e} (\boldsymbol{\varphi}_h^e - \boldsymbol{\varphi}_h^{\text{ext}}) \cdot \mathbf{P}_h^e \cdot \mathbf{N} dS_0 \end{aligned}$$

Discretización + Estabilización

Discontinuous Galerkin

$$\begin{aligned}
 & \int_{B_{0h}} (\rho_0 \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_h \cdot \delta \boldsymbol{\varphi}_h + \mathbf{P}_h : \nabla_0 \delta \boldsymbol{\varphi}_h) dV + \int_{\partial_I B_{0h}} [[\delta \boldsymbol{\varphi}_h]] \cdot \langle \mathbf{P}_h \rangle \cdot \mathbf{N}^- dS \\
 & + \int_{\partial_I B_{0h}} \left\{ [[\delta \boldsymbol{\varphi}_h]] \otimes \mathbf{N}^- : \left\langle \frac{\beta_s}{h_s} \mathbf{C} \right\rangle : [[\boldsymbol{\varphi}_h]] \otimes \mathbf{N}^- \right\} dS \\
 & = \int_{B_{0h}} \rho_0 \mathbf{B} \cdot \delta \boldsymbol{\varphi}_h dV + \int_{\partial_N B_{0h}} \delta \boldsymbol{\varphi}_h \cdot \bar{\mathbf{T}} dS,
 \end{aligned}$$

Leyes cohesivas

Discontinuous Galerkin

$$\begin{aligned} & \int_{B_{Oh}} (\rho_0 \ddot{\boldsymbol{\varphi}}_h \cdot \delta \boldsymbol{\varphi}_h + \mathbf{P}_h : \nabla_0 \delta \boldsymbol{\varphi}_h) dV + \int_{\partial_I B_{Oh}} \alpha \mathbf{T}([\boldsymbol{\varphi}_h]) \cdot [\delta \boldsymbol{\varphi}_h] dS \\ & + \int_{\partial_I B_{Oh}} (1 - \alpha) [\delta \boldsymbol{\varphi}_h] \cdot \langle \mathbf{P}_h \rangle \cdot \mathbf{N}^- dS + \int_{\partial_I B_{Oh}} (1 - \alpha) [\delta \boldsymbol{\varphi}_h] \otimes \mathbf{N}^- \\ & : \left\langle \frac{\beta_s}{h_s} \mathbf{C} \right\rangle : [\boldsymbol{\varphi}_h] \otimes \mathbf{N}^- dS = \int_{B_{Oh}} \rho_0 \mathbf{B} \cdot \delta \boldsymbol{\varphi}_h dV + \int_{\partial_N B_{Oh}} \delta \boldsymbol{\varphi}_h \cdot \bar{\mathbf{T}} dS. \end{aligned}$$

	α
Antes de detectar fractura en la interfase	0
Después de la fractura de interfase	1

Leyes cohesivas

Discontinuous Galerkin

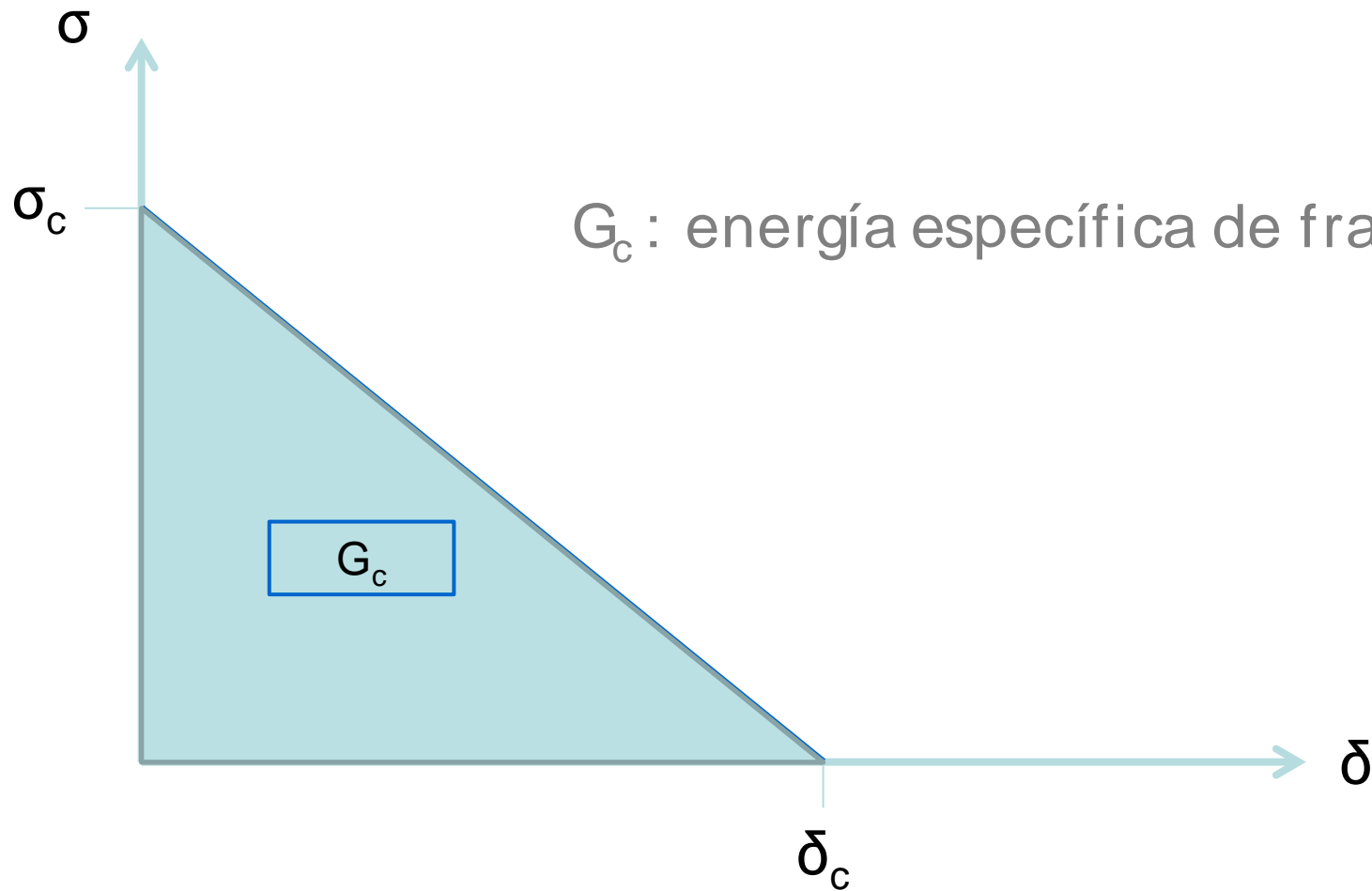
$$\delta = \sqrt{\gamma^2 \Delta_m^2 + \Delta_n^2}$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}(\delta, \mathbf{q})$$

$$\mathbf{T} = \frac{T}{\delta} (\gamma^2 \Delta_m \mathbf{m} + \Delta_n \mathbf{n})$$

Leyes cohesivas

Discontinuous Galerkin



Integración temporal explícita

Discontinuous Galerkin

$$\Delta t < \Delta t_{\text{crit}} = \frac{h_s}{\sqrt{\beta_s c}},$$

$$\varphi_h(\mathbf{X}) = N_a(\mathbf{X})\mathbf{x}_a, \quad \delta\varphi_h(\mathbf{X}) = N_a(\mathbf{X})\delta\mathbf{x}_a, \quad \ddot{\varphi}_h(\mathbf{X}) = N_a(\mathbf{X})\ddot{\mathbf{x}}_a,$$

$$M_{ab}\ddot{\mathbf{x}}_b + \mathbf{f}_a^i(\mathbf{x}) + \mathbf{f}_a^s(\mathbf{x}) = \mathbf{f}_a^e,$$

$$M_{ab}\ddot{\mathbf{x}}_b = \int_{B_{0h}} \rho_0 N_a N_b dV \ddot{\mathbf{x}}_b,$$

$$\mathbf{f}_a^i = \int_{B_{0h}} \mathbf{P} : \nabla_0 N_a dV,$$

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{a^\pm}^s = & \pm \int_{\partial_1 B_{0h}} (1 - \alpha) \langle \mathbf{P} \rangle \cdot \mathbf{N}^- N_a^S dS \\ & \pm \int_{\partial_1 B_{0h}} (1 - \alpha) \left[\left\langle \frac{\beta_s}{h_s} \mathbf{C} \right\rangle : [\mathbf{x}_b] \otimes \mathbf{N}^- \right] \cdot \mathbf{N}^- N_a^S N_b^S dS \\ & \pm \int_{\partial_1 B_{0h}} \alpha \mathbf{T}([\mathbf{x}]) N_a^S dS, \end{aligned}$$

$$\mathbf{f}_a^e = \int_{B_{0h}} \rho_0 \mathbf{B} N_a dV + \int_{\partial_N B_{0h}} \bar{\mathbf{T}} N_a^S dS,$$

Verificación del simulador

Discontinuous Galerkin

Probeta “Comahue”

NOTAS:

- Material bulk: elástico
- Variable graficada: tensiones Sigma_{yy}
- Desplazamientos: aumentados 10 veces en el gráfico

Probetas

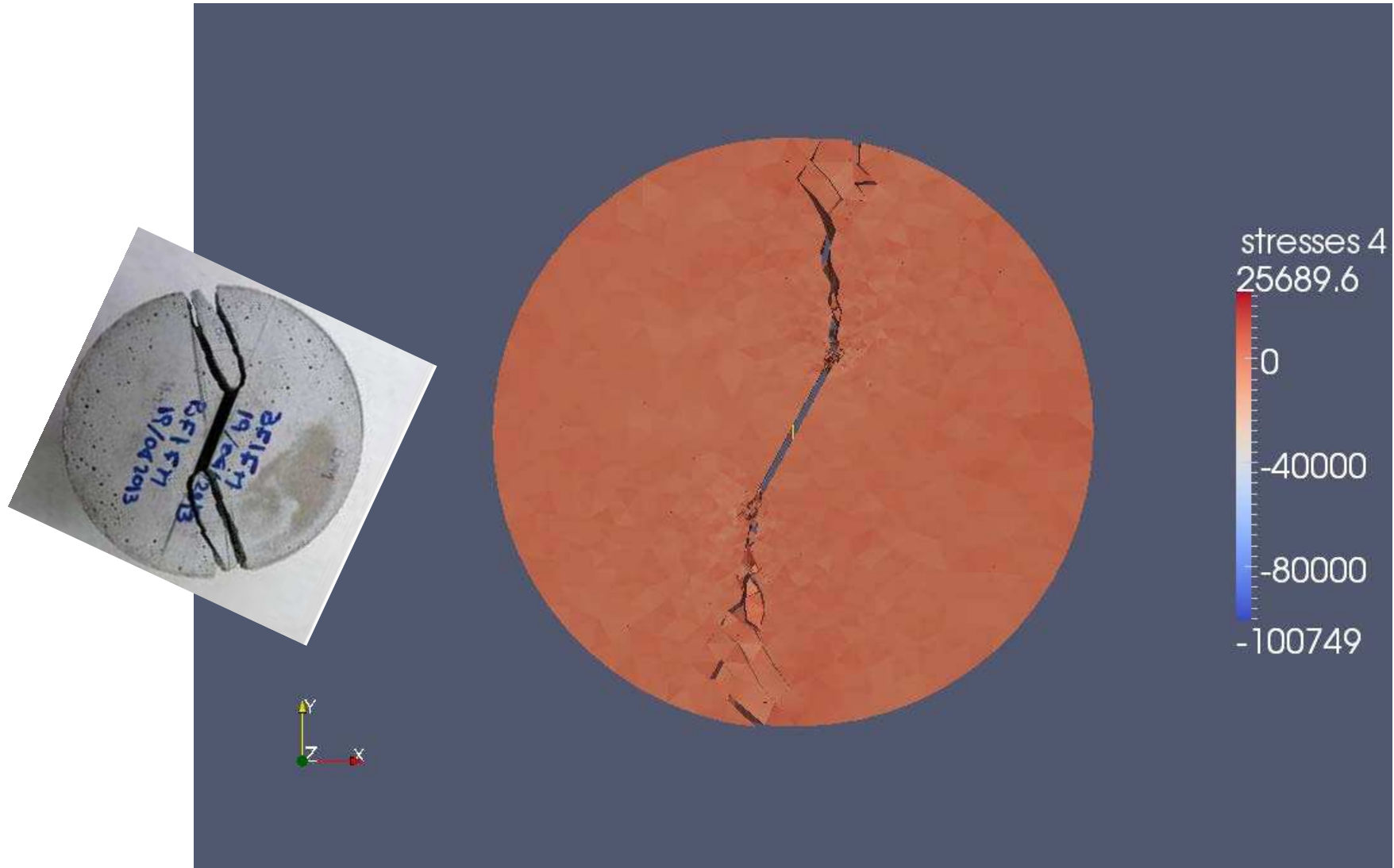
Modo I: $0.34 < K_{IC} < 0.6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$



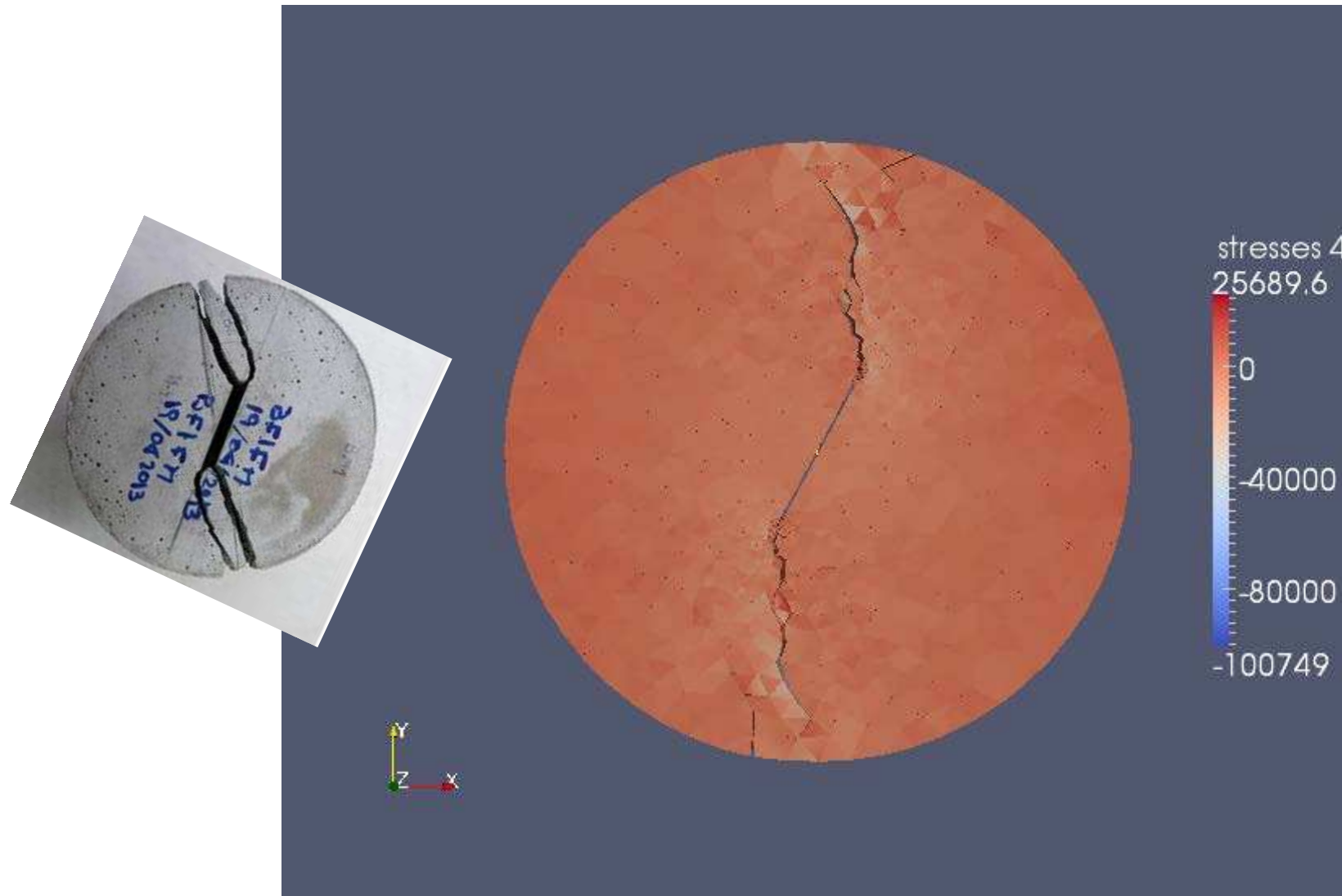
Modo II: $0.52 < K_{IIc} < 0.72 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}$



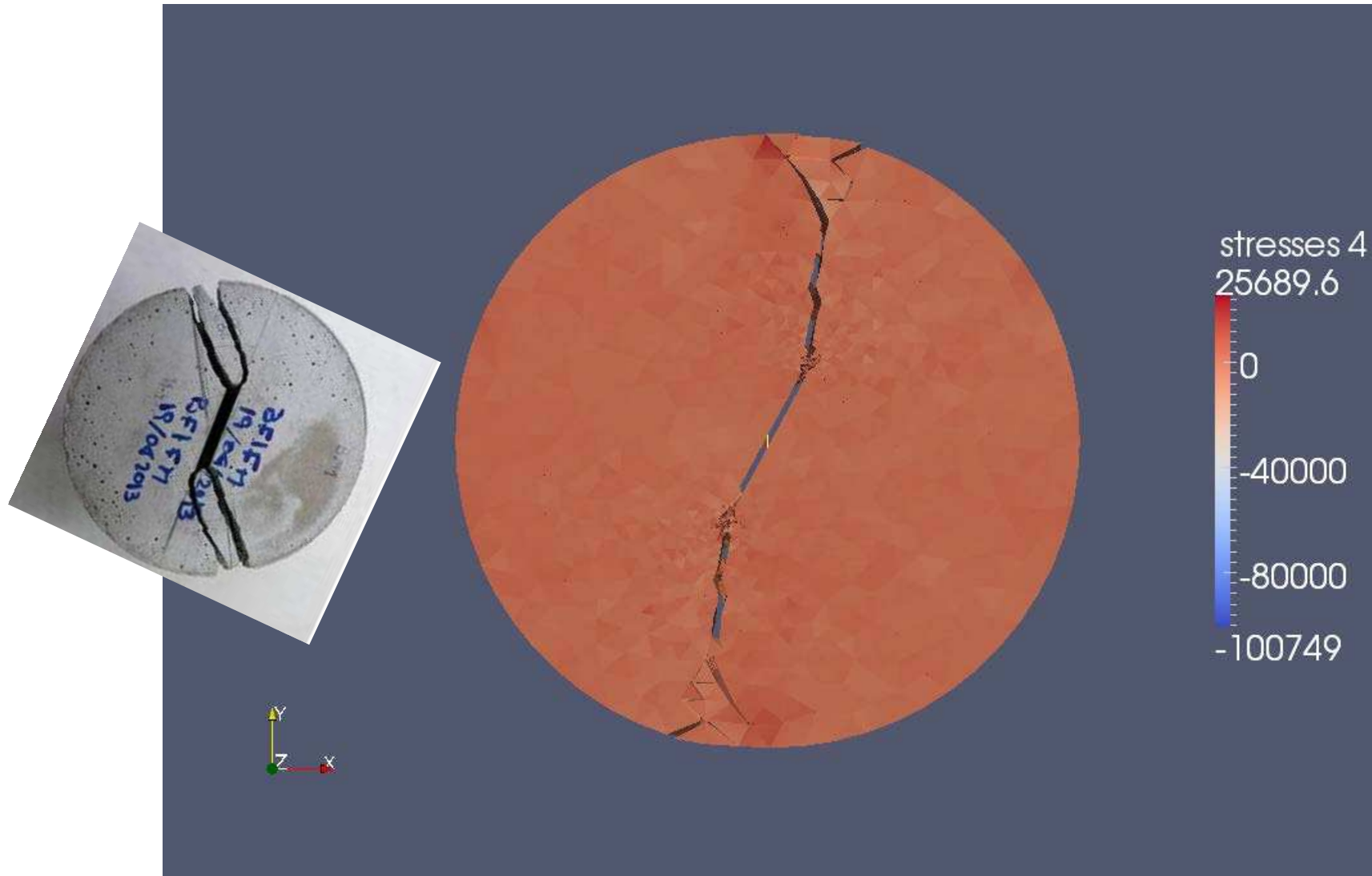
Ley cohesiva: Mohr Coulomb



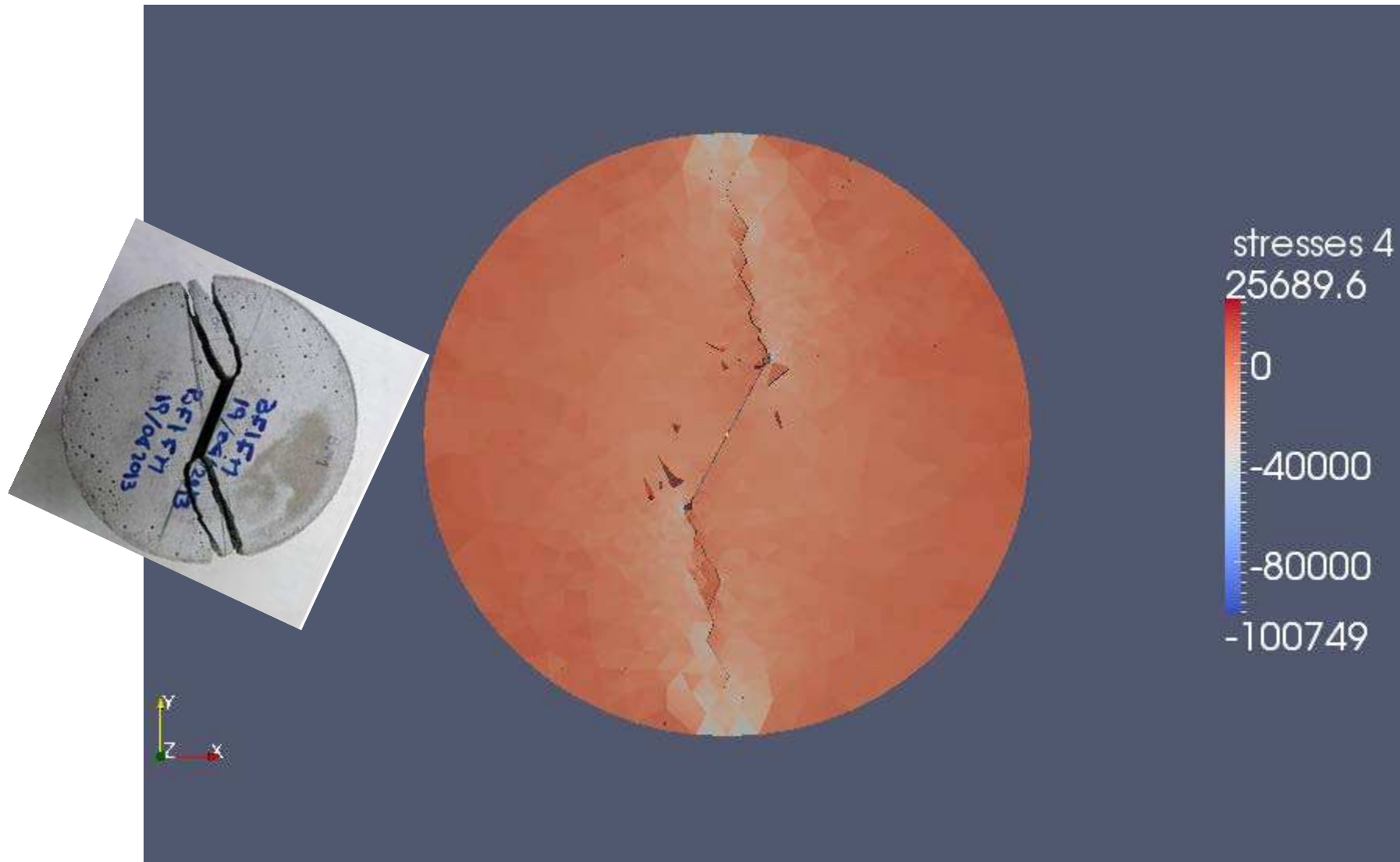
Ley cohesiva: Drucker Prager (outter)



Ley cohesiva: Drucker Prager (inner)

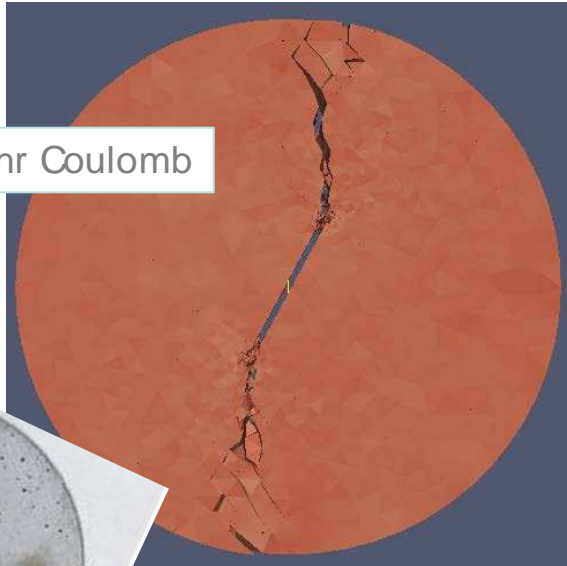


Ley cohesiva: Máxima Tensión

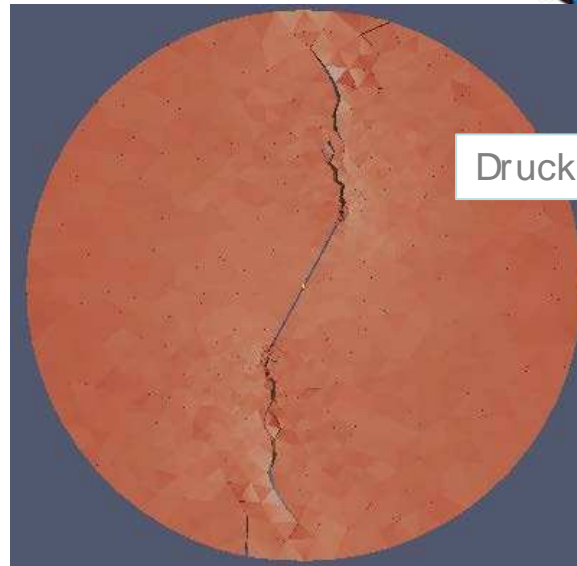


Comparación de resultados

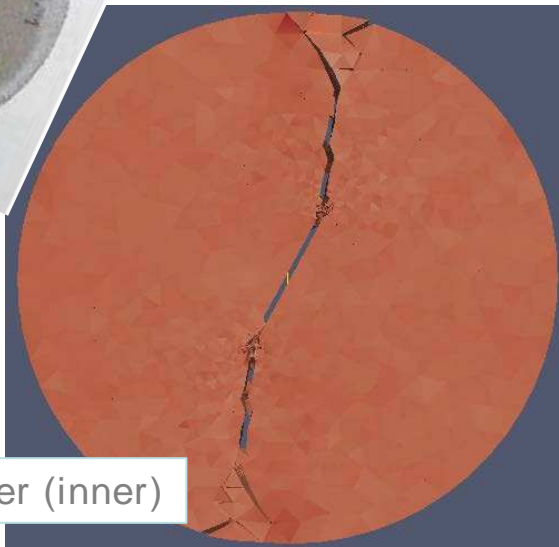
Mohr Coulomb



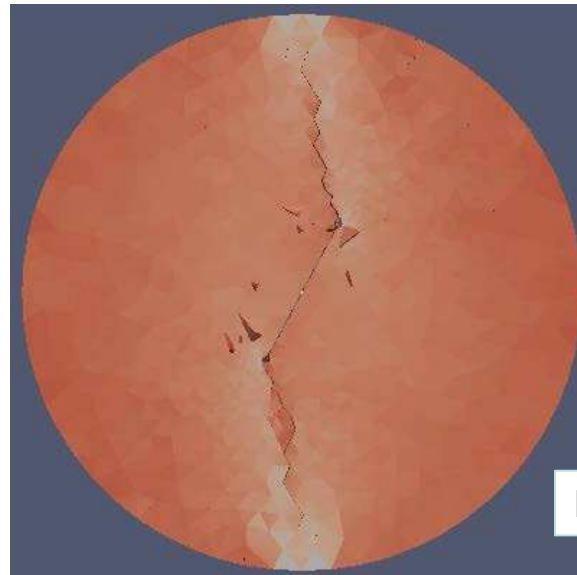
Drucker Prager (outer)



Drucker Prager (inner)



Máxima tensión



Verificación del simulador

Discontinuous Galerkin

COMENTARIOS

En las figuras anteriores se observa que el ángulo de orientación de la fractura que se aproxima mejor al de la probeta ensayada es el obtenido con la Ley Cohesiva de Tensión Máxima

Desarrollo de un simulador de fractura hidráulica

Modelo acoplado para la simulación de fractura hidráulica

Utilizamos un acoplamiento “*staggered*” entre el modelo del flujo del fluido de perforación y el modelo que simula el comportamiento del estrato de shale. Este acoplamiento requiere la utilización de dos escalas de tiempo.

MODELO DESARROLLADO: LAS ESCALAS DE TIEMPO

Tiempo reloj

$$\Delta t_r = \frac{\Delta V_f}{q_{fp}}$$

$$t_r = t_r + \Delta t_r$$

ΔV_f : incremento de volumen fracturado en el instante t_r ;

q_{fp} : flujo de entrada en el instante t_r según el frac-plan.

Desarrollo de un simulador de fractura hidráulica

Tiempo en la integración de las ecuaciones del modelo sólido (int. temporal explícita): estabilidad

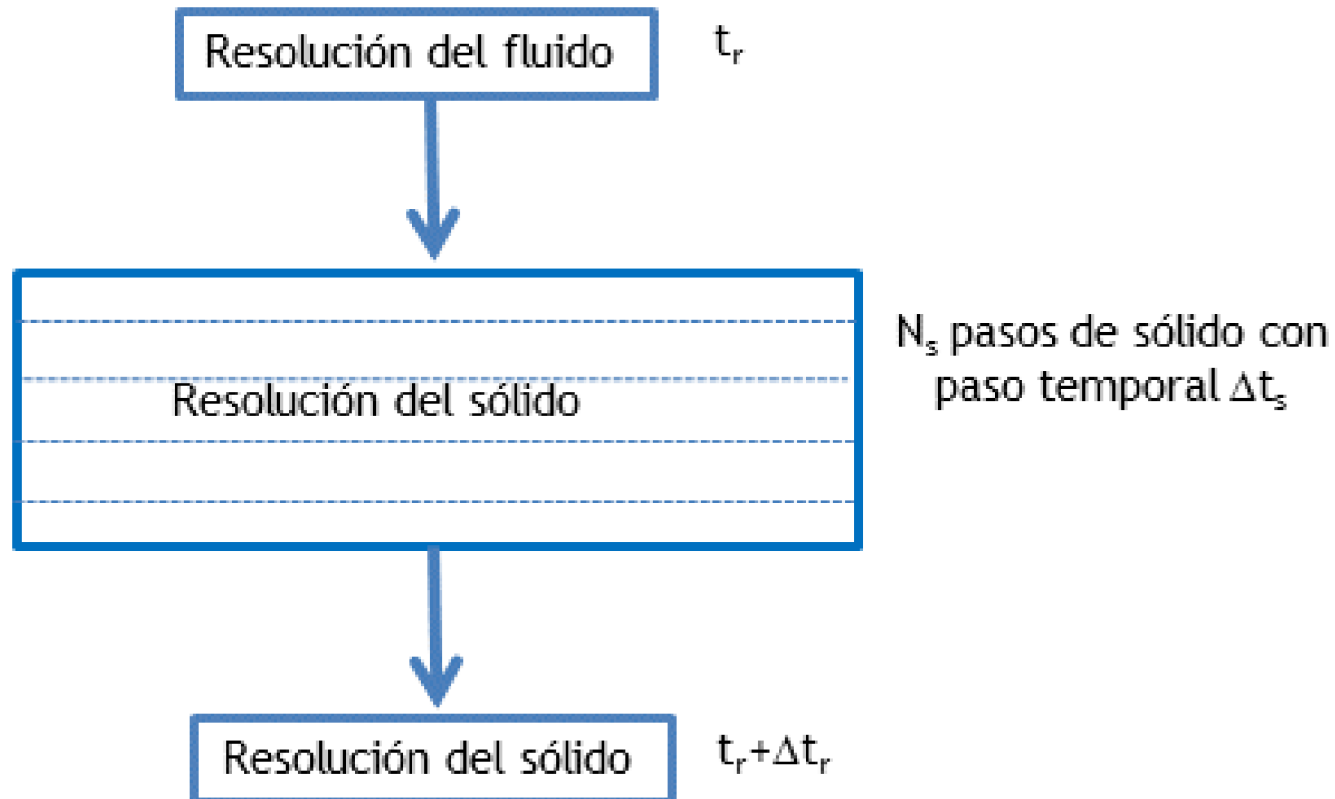
$$\Delta t = h_{min}/c$$

Desarrollo de un simulador de fractura hidráulica

Modelo de fluido (régimen estacionario)
Continuous Galerkin

$$\nabla \cdot \left[\frac{\rho h^3}{12 \mu} \nabla p \right] = \frac{\partial(\rho h)}{\partial t}$$

Acoplamiento staggered



Acoplamiento staggered

El modelo de fluido le pasa al de sólido las presiones
menos la presión polar

Condiciones de borde del modelo de fluido

- En la entrada la CB es de flujo impuesto (Neumann). Este valor es el que fija el fracplan
- En los extremos de la fisura la condición de borde es Dirichlet $p = p_{pral}$
- No hay pérdida de fluido a través de las paredes de la fractura y el término $\frac{\partial(\rho h)}{\partial t}$ es el encargado (dentro de la aproximación numérica utilizada) de impedir el flujo a través de los extremos de las fisuras.

Modelo del sólido

$$N_s = \frac{l_c}{c \Delta t_s}$$

Número de pasos del algoritmo de sólido en cada paso acoplado

$$l_c = \frac{EG_c}{\sigma_R^2}$$

Longitud cohesiva

$$c = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}}$$

Velocidad de propagación de ondas de presión

Condiciones de borde del modelo de sólido

Condiciones de Dirichlet

Las mínimas necesarias para suprimir los desplazamientos rígidos.

Condiciones de Neumann

Sobre todas las caras del paralelepípedo modelado,

Es importante remarcar que se utilizan como condiciones de borde las presiones efectivas que actúan normalmente a las caras. Según Terzaghi.

$$\sigma_{ij}^{eff} = \sigma_{ij} - \delta_{ij} p_{poral}$$

En posteriores actualizaciones se adaptará más el modelo al caso del shale y en lugar de la tensión efectiva definida arriba se utilizará la definida por Nur y Byerlee¹

Ejemplo Numérico: convergencia

Tensiones efectivas:

- Vertical 25.95 Mpa
- Horizontal 38 Mpa

Tensión rotura: $\sigma_{rot}=4$ Mpa

Caudal másico: 160 kg/seg

Energía de fractura $G=150$ N/m

$E=21500$ Mpa

Densidad roca: 2500 kg/m³

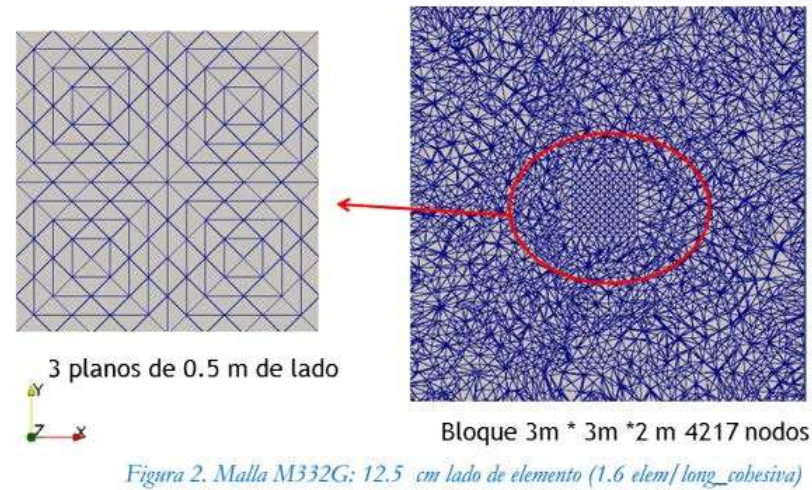
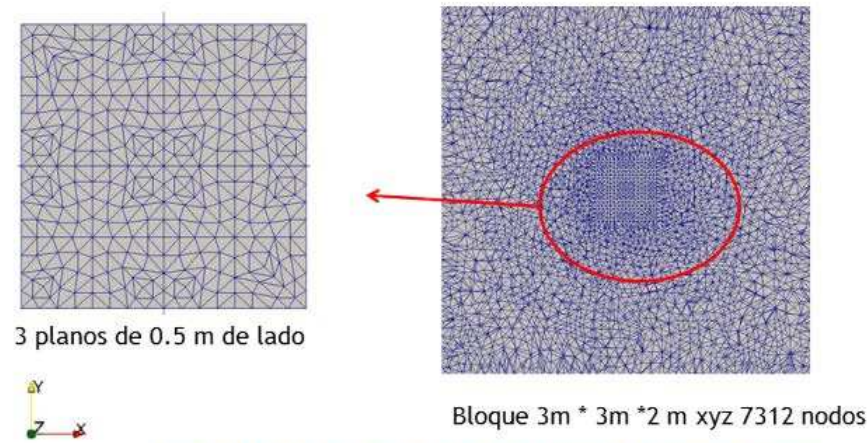
Densidad del fluido: 1000 kg/m³

Presión poral: 50 MPa

Malla	n° elem/long_cohesiva en zona plano inicial de fractura	Lado de los elementos en plano inicial de fractura [cm]	Superficie plano de fractura inicial	Dimensiones bloque modelado	Cantidad de nodos	Cantidad de elementos
M332F	3.2	6.25	0.5*0.5	3m*3m*2m	7312	35967
M332G	1.6	12.5	0.5*0.5	3m*3m*2m	4217	18957
M222F	2.4	8.33	0.5*0.5	2m*2m*2m	4631	21308
M222G	2	10	0.4*0.4	2m*2m*2m	2313	10252

Tabla I. Características de las mallas analizadas.

Ejemplo Numérico: convergencia



Ejemplo Numérico: convergencia

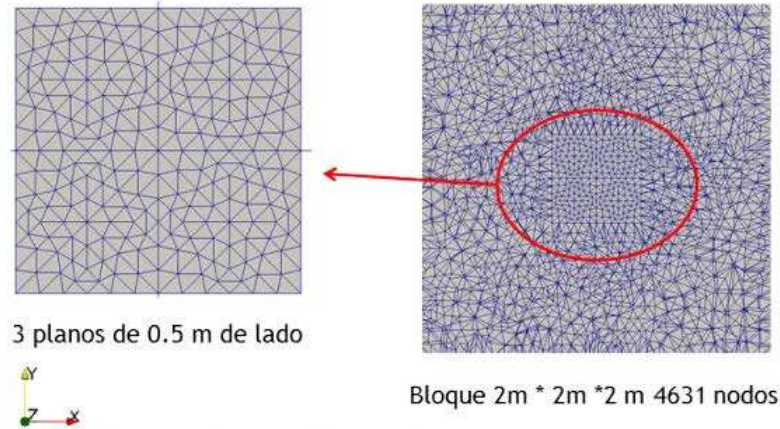


Figura 3. Malla M222F: 8.33 cm lado de elemento (2.4 elem/long_cobesiva)

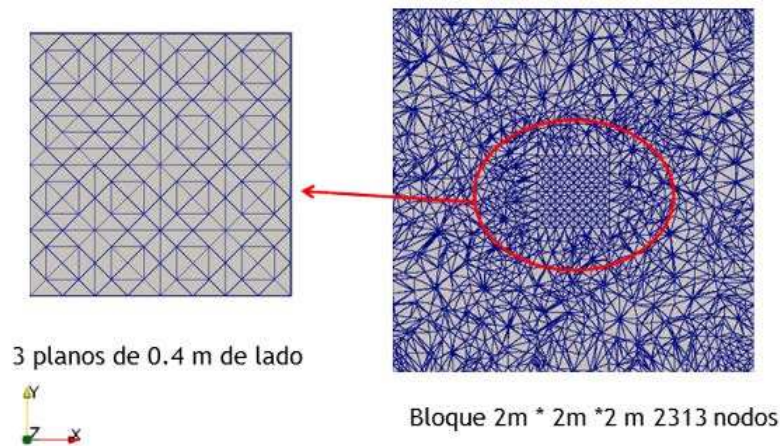


Figura 4. Malla M222G: 10 cm lado de elemento (2. elem/long_cobesiva)

Ejemplo Numérico: convergencia

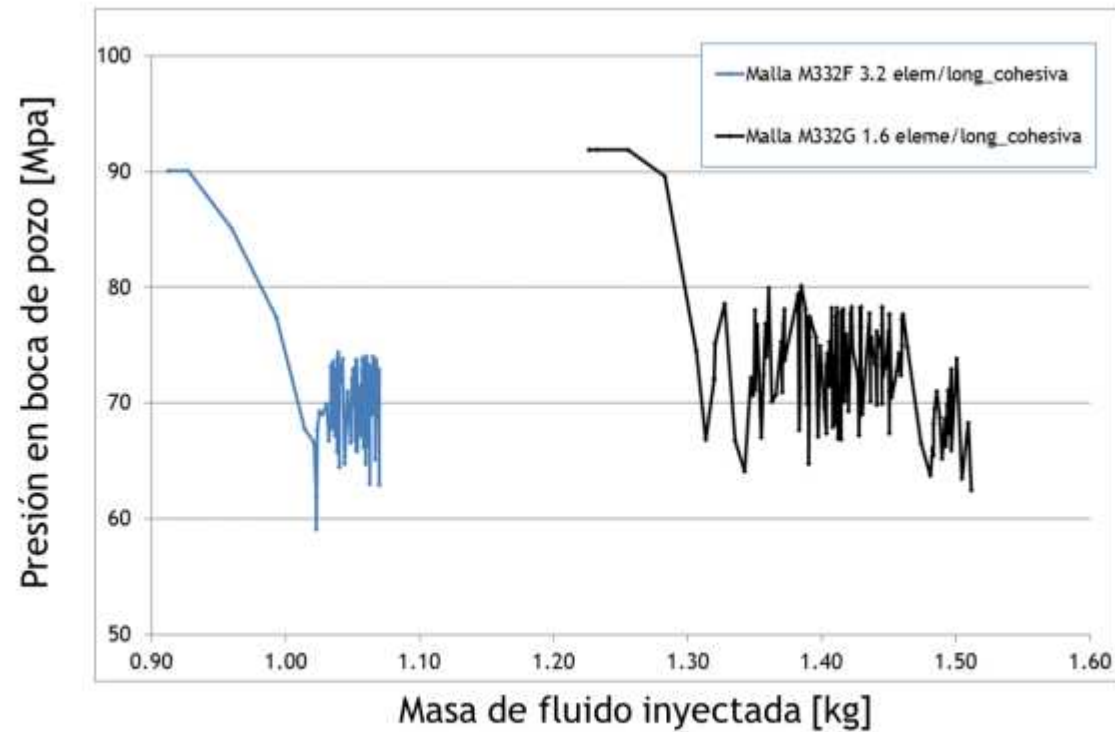


Figura 5. Presión en Boca de Pozo vs. Masa de fluido inyectada

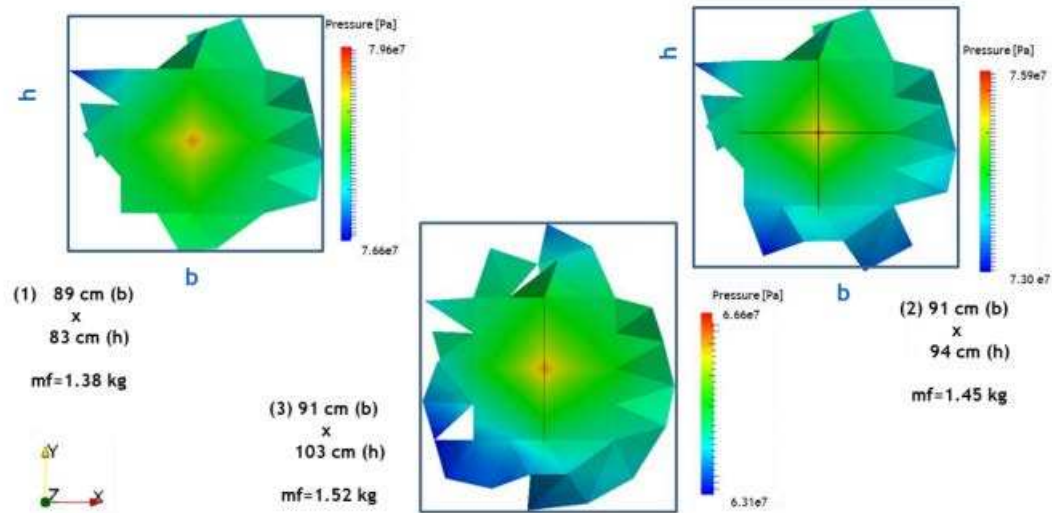


Figura 8. Malla M332G: Evolución de la fractura en el plano horizontal.

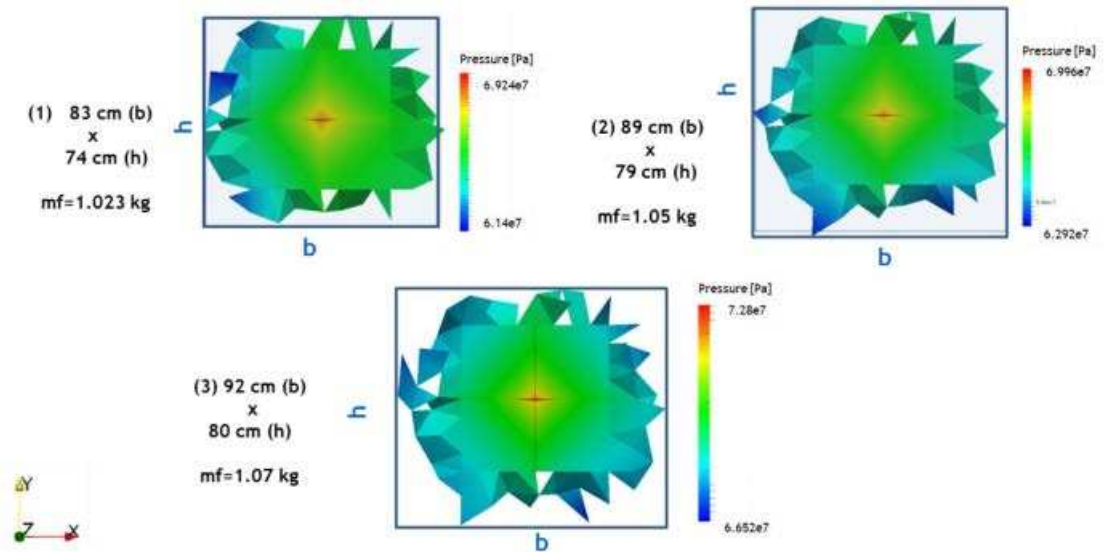
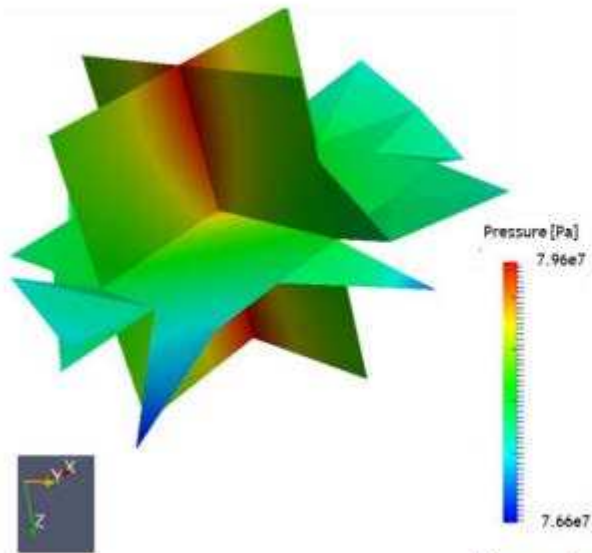


Figura 6. Malla M332F: Evolución de la fractura en el plano horizontal.

(1) mf=1.38 kg



(3) mf=1.52 kg

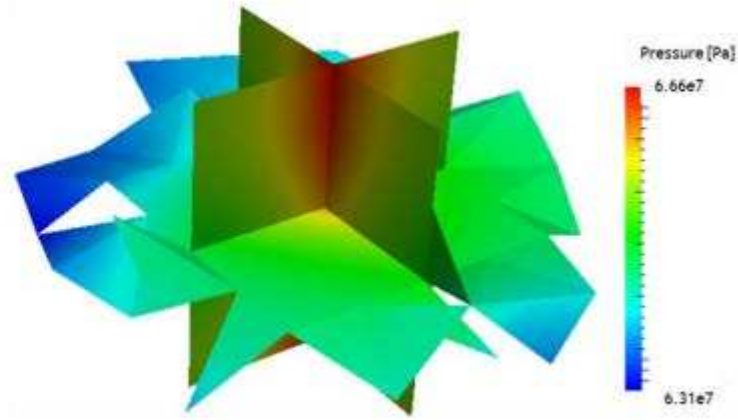
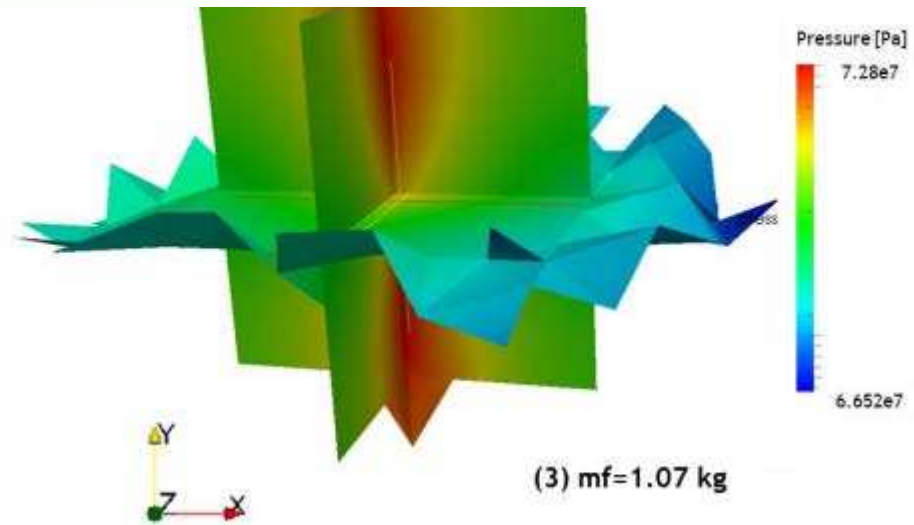


Figura 9. Malla M332G: vista 3D



(3) mf=1.07 kg

Figura 7. Malla M332F: vista 3D

Ejemplo Numérico: convergencia

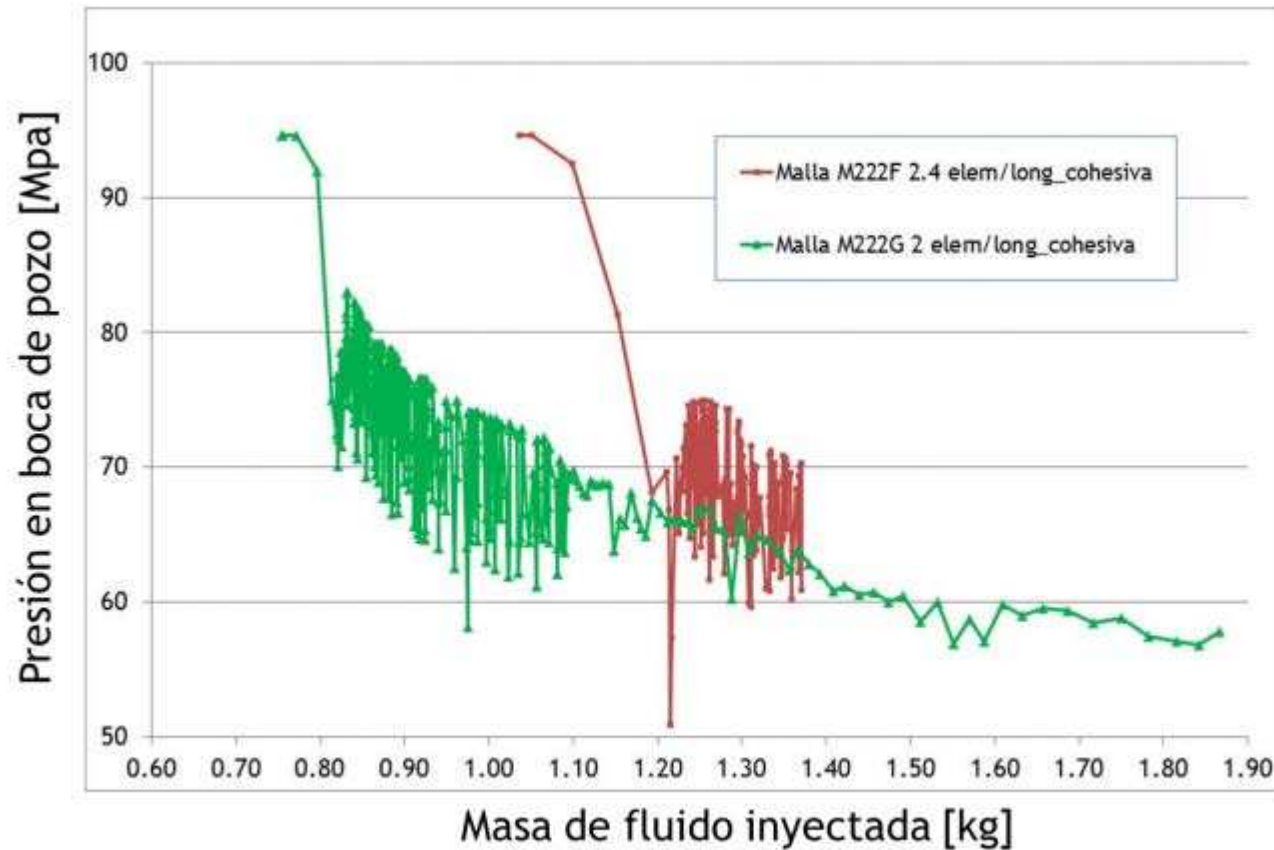


Figura 10. Presión en Boca de Pozo vs. Masa de fluido inyectada

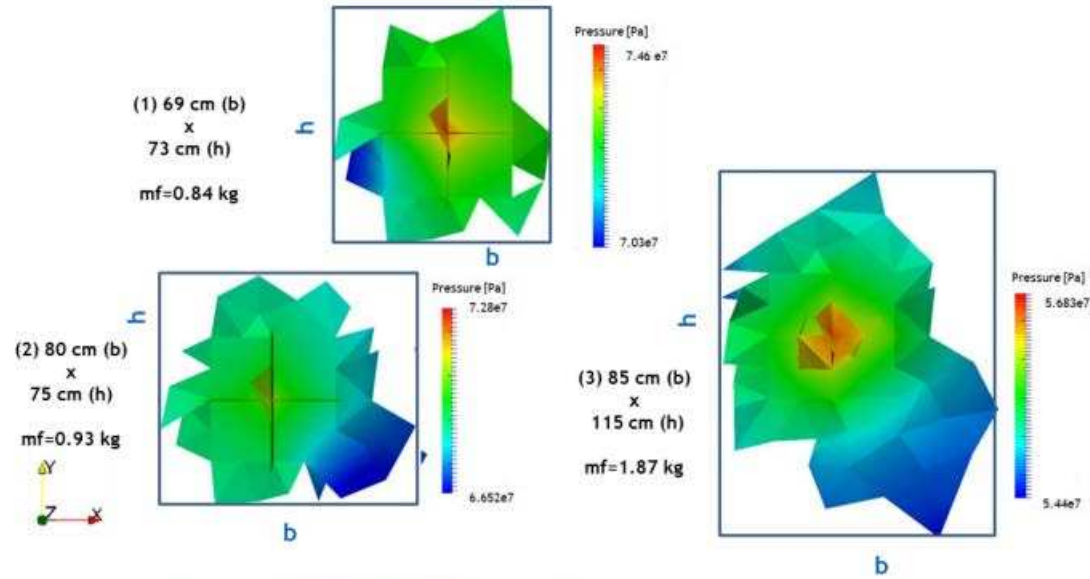


Figura 13. Malla M222G: Evolución de la fractura en el plano horizontal.

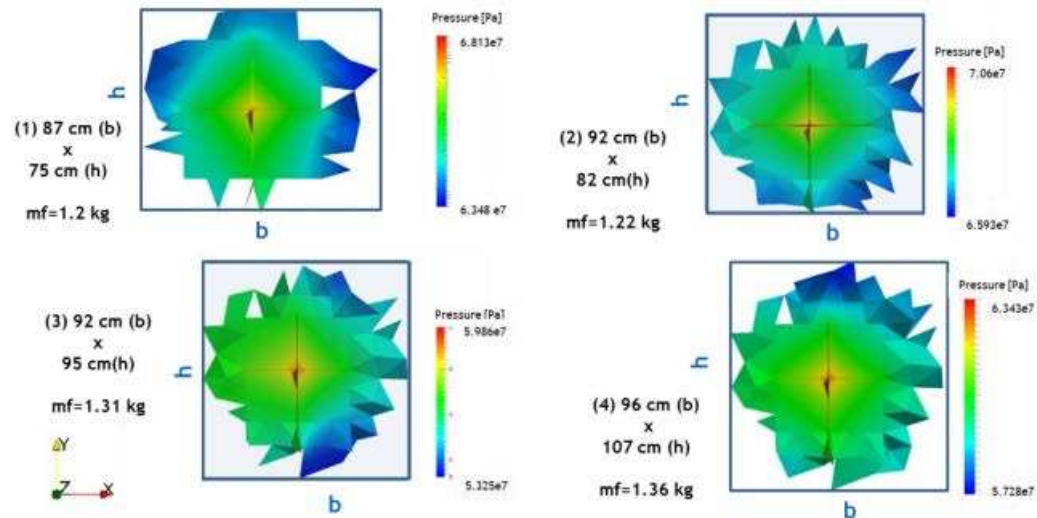


Figura 11. Malla M222F: Evolución de la fractura en el plano horizontal.

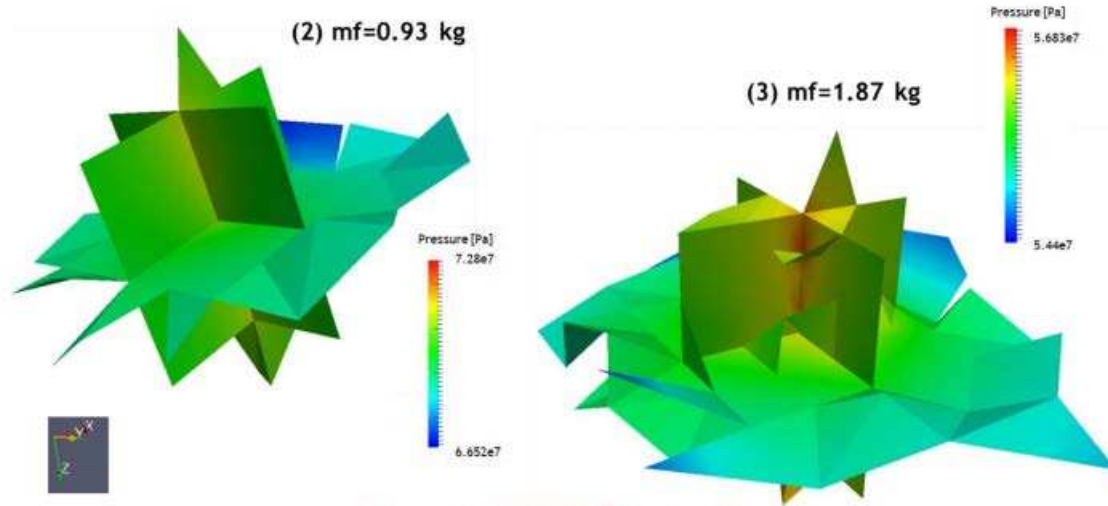


Figura 14. Malla M222G: vista 3D

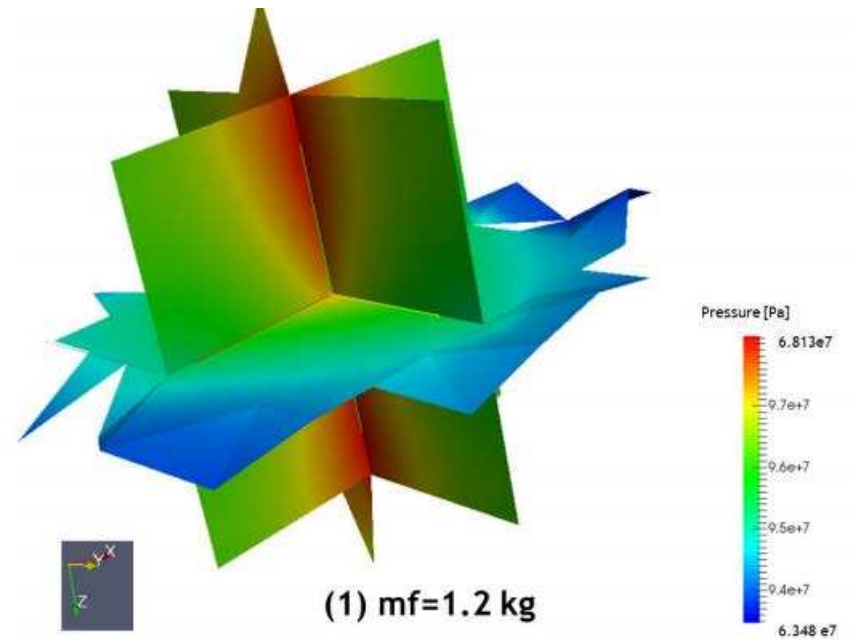
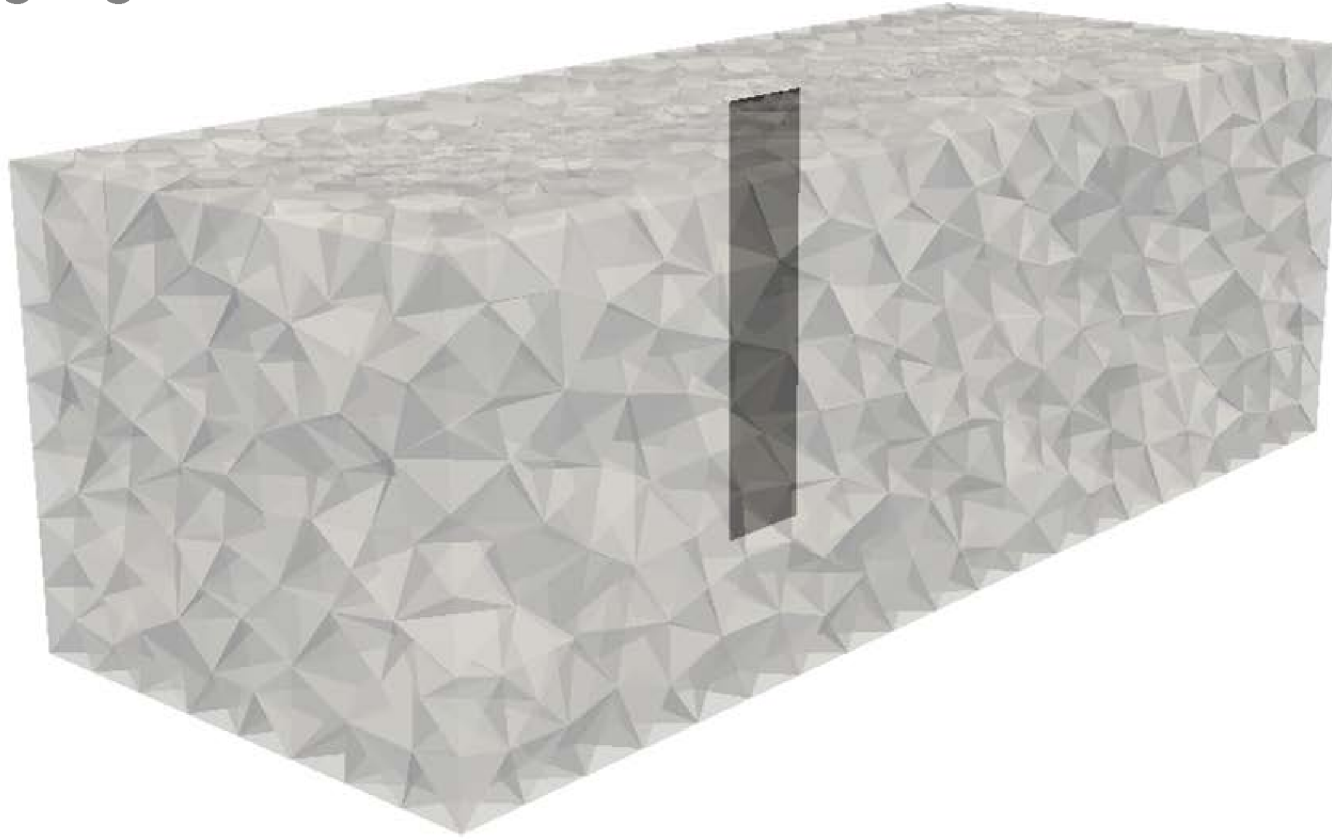


Figura 12. Malla M222F: vista 3D

Ejemplo Numérico: PKN

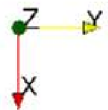
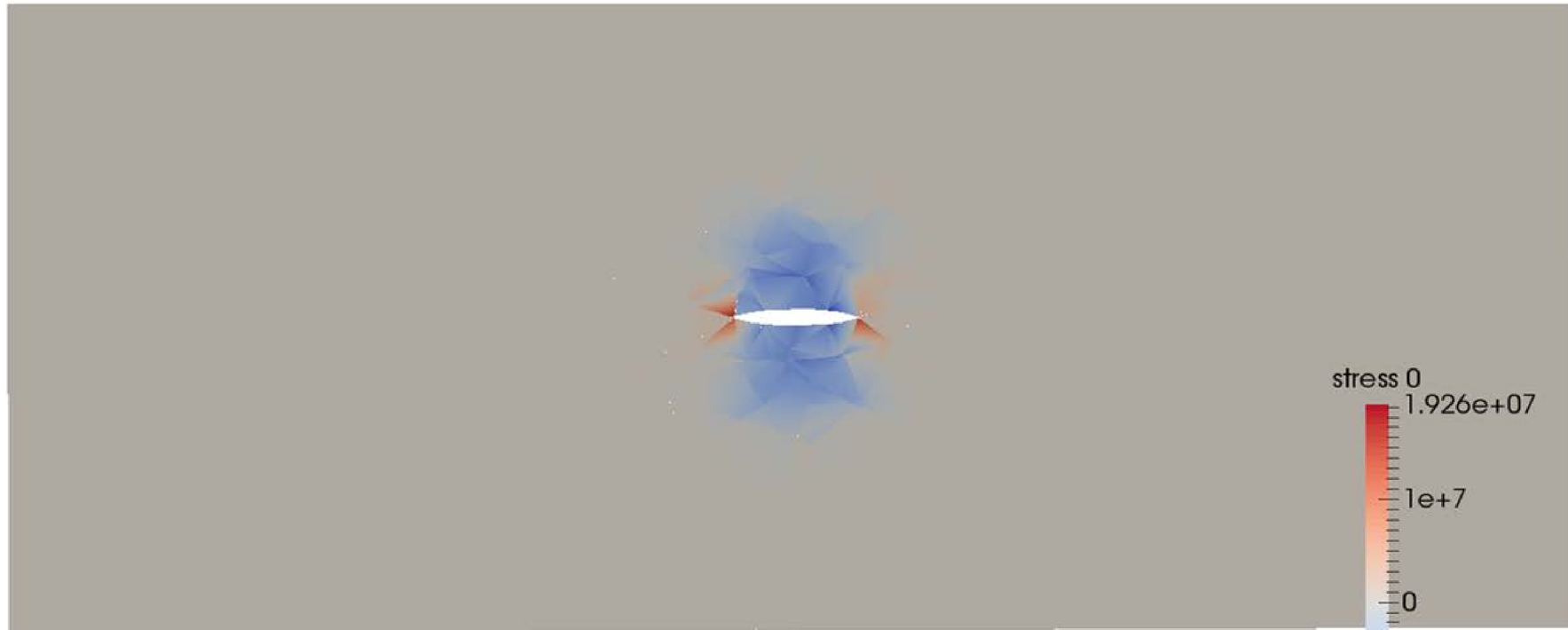
$Q=140$ kg/seg



$t=0$

PKN

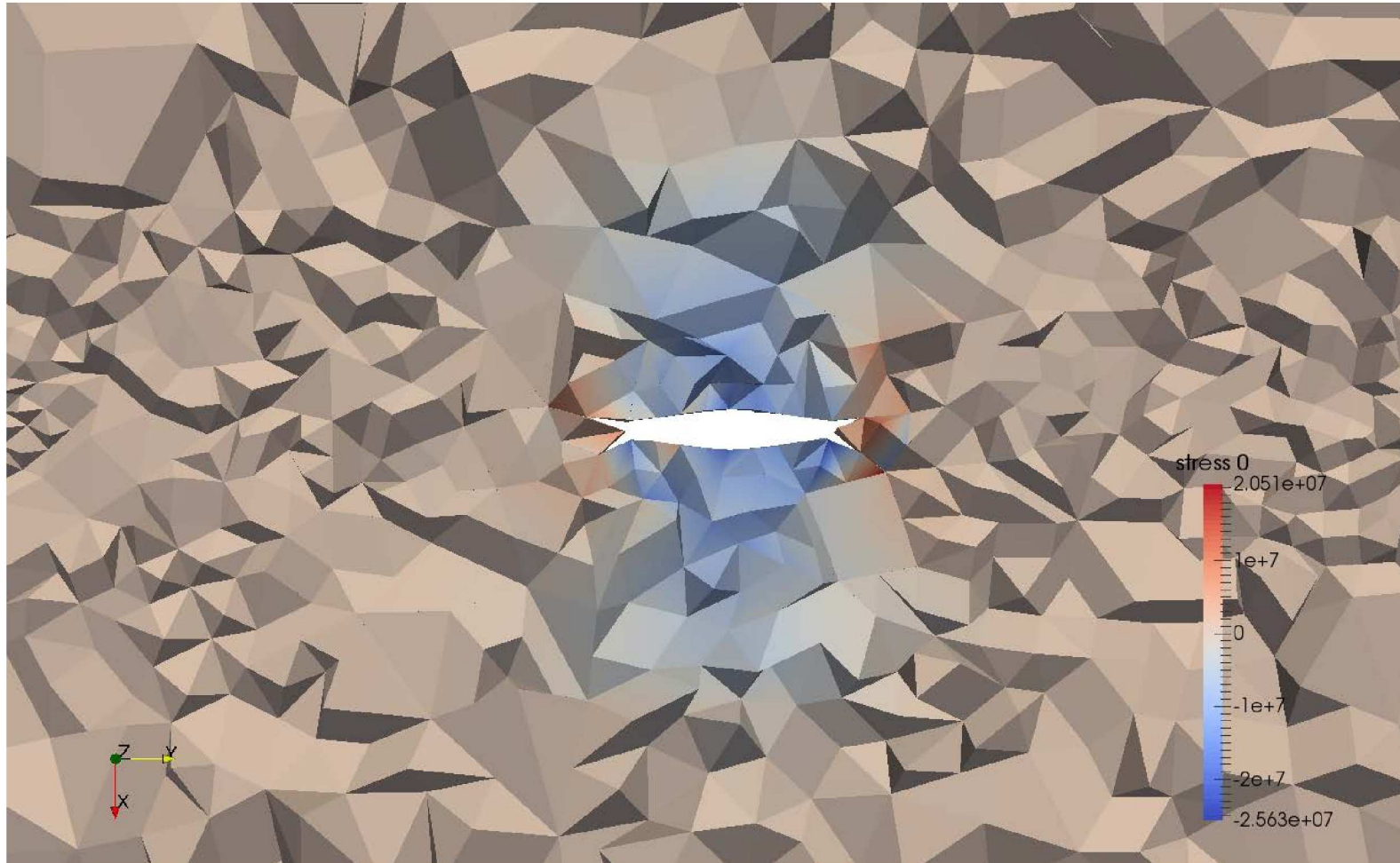
$Q=140$ kg/seg



$z = 25$ m
 $t = 25.85$ s
 $V = 3.62$ m³

PKN

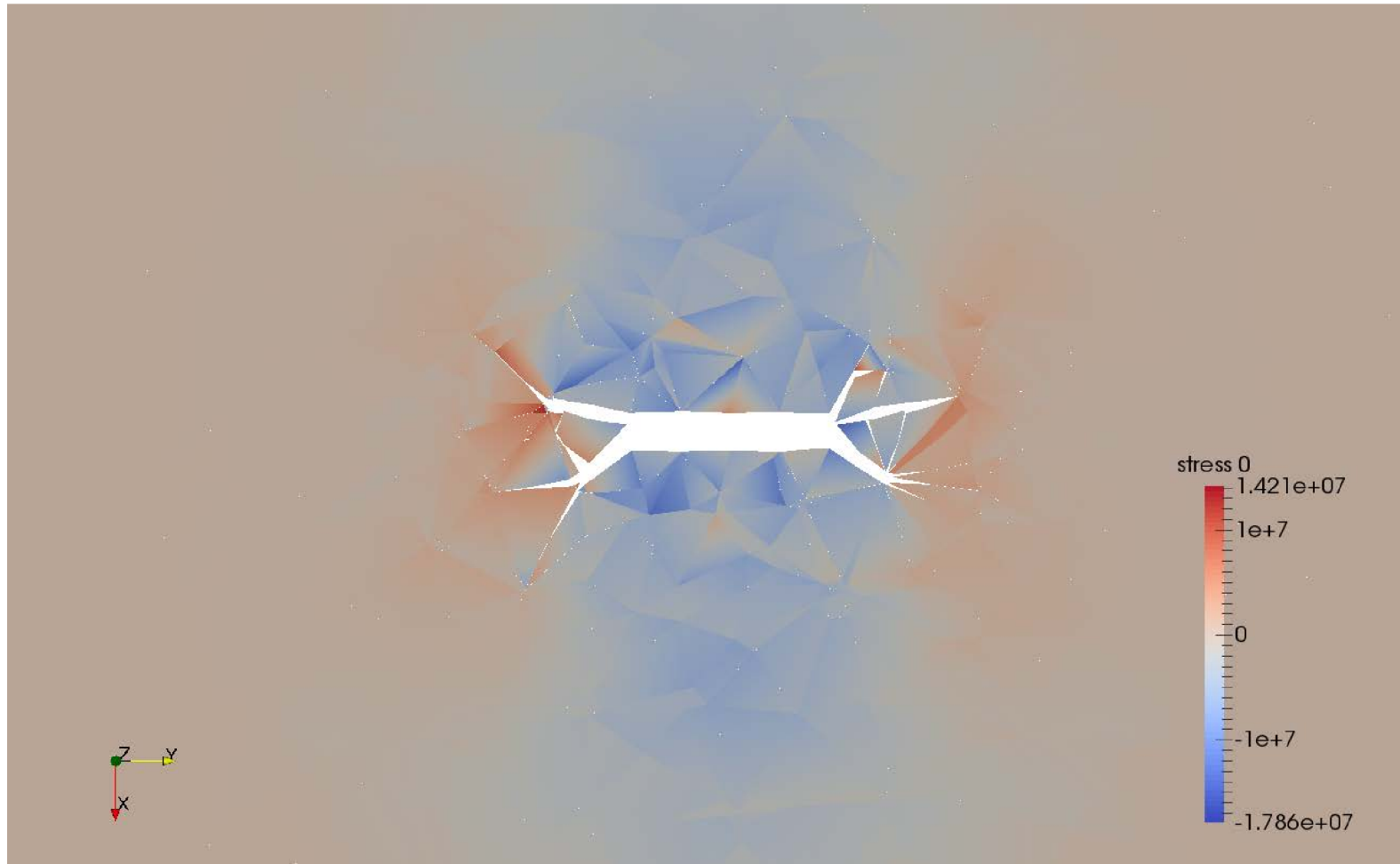
$Q=140 \text{ kg/seg}$



$z = 25 \text{ m}$
 $t = 41.71 \text{ s}$
 $V = 5.84 \text{ m}^3$

PKN

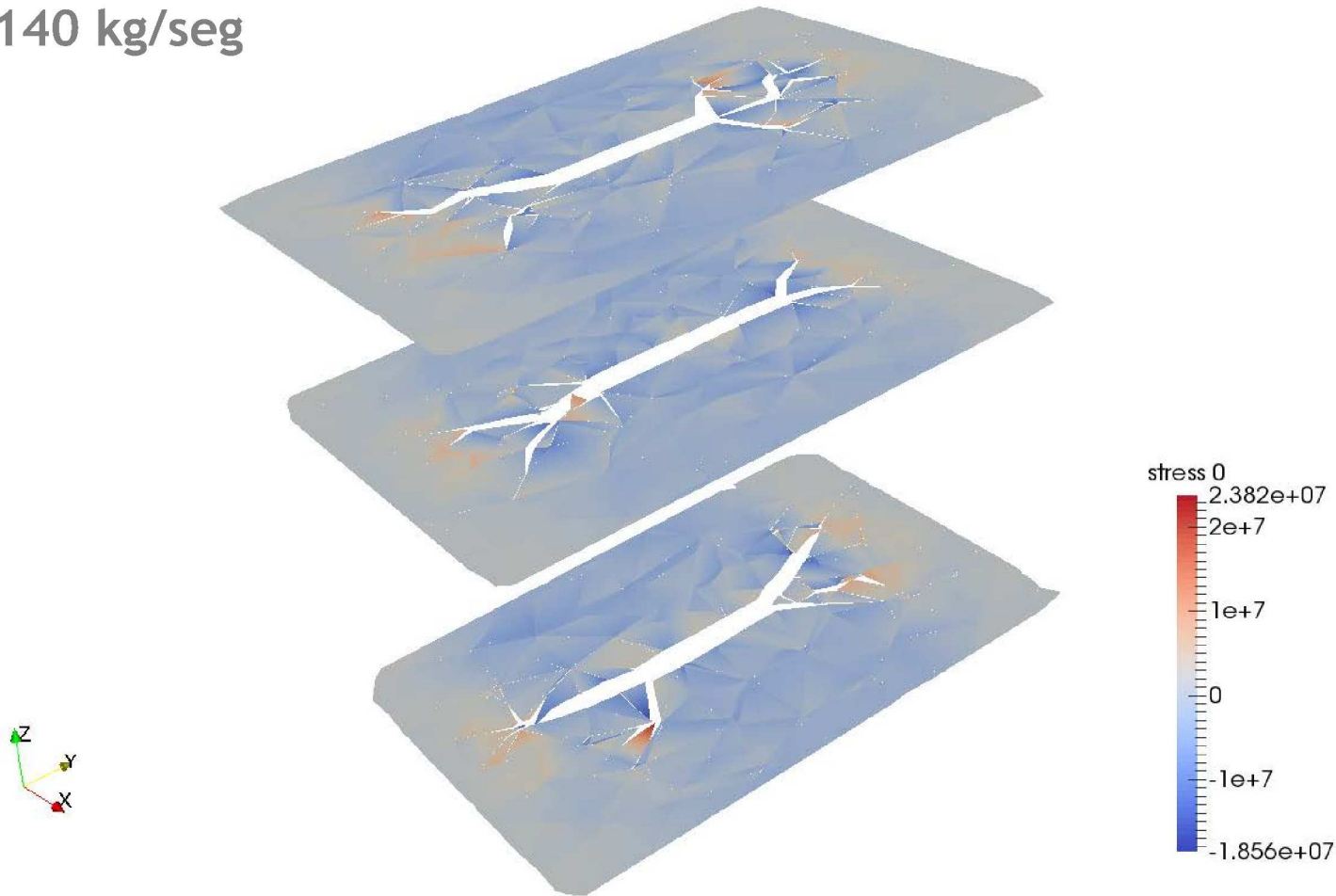
$Q=140 \text{ kg/seg}$



$z = 25 \text{ m}$
 $t = 94.12 \text{ s}$
 $V = 13.29 \text{ m}^3$

PKN

Q=140 kg/seg



Planos $z = 5 \text{ m}$, $z = 30 \text{ m}$, $z = 45 \text{ m}$
 $t = 131.62 \text{ s}$
 $V = 18.42 \text{ m}^3$



TUPAC

Proyecto FONARSEC ONDAS

Socios del CAPP

Sistema Público I+D	CONICET
Universidades Nacionales	UNLP UNC UNSJ UNRN
Empresas del Estado	INVAP S.E. YTEC S.A.
Empresas Privadas	SIM&TEC S.A.

Proyecto ONDAS

Temática científica	Modelado computacional de la propagación de ondas mecánicas y electromagnéticas en medios complejos
Aplicaciones tecnológicas	Ondas mecánicas: sonar y sísmica petrolera
	Ondas electromagnéticas: radar

DÓNDE SE UBICA:

En el Centro de Simulación Computacional (CSC)
emplazado en el Polo Científico Tecnológico.





Principales características de TUPAC

- 4096 núcleos de CPU AMD Opteron, 16384 núcleos de GPU NVidia,
- 8192 GB de memoria RAM,
- Redes Infiniband,
- Sistemas redundantes de enfriamiento con agua de 80 Kw y UPS para unidades críticas.

Principales características de TUPAC

Dr. Esteban Mocskos

Se ha desarrollado en el país un
Estilo Tecnológico (O. Varsavsky)
que impulsa el desarrollo nacional de tecnología

- Empresas del estado encabezando grandes proyectos
- Centros del SNC&T y Universidades
 - Pymes (en particular PBT)

El Estilo es exitoso