

APLICACIÓN DE OPTIMIZACIÓN DE MALLAS INSPIRADA EN LA BIOMECÁNICA EN EL MODELADO DE SOLDADURA TIPO FSSW

APPLICATION OF BIOLOGICALLY INSPIRED MESH OPTIMISATION IN FSSW WELDING MODELLING

Gustavo E. Carr^{a,b}, Nicolás Biocca^{a,b}, Santiago A. Urquiza^a y Guillermo A. Lombera^{a,b}

^a*Grupo de Ingeniería Asistida por Computación, Universidad Nacional de Mar del Plata, Av. Juan B. Justo 4302, 7608 Mar del Plata, Argentina, <http://www.fi.mdp.edu.ar/>*

^b*CONICET - Mar del Plata, Argentina, <http://mardelplata-conicet.gob.ar/>*

Palabras clave: Soldadura FSSW, BIMO, ALE, MEF, Dinámica de mallas computacional

Resumen. En el presente trabajo se presenta la aplicación de técnicas de optimización de mallas inspiradas en la mecánica arterial (BIMO) para el modelado numérico del proceso de soldadura de punto por fricción-agitación (FSSW). Durante este tipo de soldadura se produce la proyección de material de la zona de trabajado mecánico, tomando una forma tipo corona. En el modelado numérico se puede observar que al densificar la malla para aumentar el nivel de detalle, este fenómeno es también observado en los resultados. La gran variación del contorno del dominio provoca una enorme distorsión en los elementos de la zona de material eyectado, por lo cual se recurre comúnmente al remallado. En este trabajo se realiza el modelado remallando periódicamente mediante la aplicación del algoritmo de Delaunay y se compara la performance del modelo sin remallar pero aplicando el método BIMO, inspirado en la mecánica de tejido arterial. Se compara el comportamiento y los tiempos de ejecución usando ambas técnicas, de lo cual la técnica BIMO resulta la más conveniente.

Keywords: FSSW, Biologically Inspired Mesh Optimisation, Arbitrary Lagrangean Eulerian, FEM, Computational Mesh Dynamics.

Abstract. The present work introduces the application of biologically inspired mesh optimisation (BIMO) for the modelling of the friction stir spot welding (FSSW). This technique is inspired in arterial mechanics. During this joining process it can be observed that a crown shaped portion of the material is ejected from the hot working zone underneath the tool. In numerical modelling results this effect can be also observed when denser meshes are used to obtain higher levels of detail. Techniques of remeshing are commonly used to deal with the enormous distortion in the elements due the remarkable variation in the shape of the domain boundary at the ejected material zone. In the present work modelling is carried out periodically remeshing using a Delaunay algorithm and the performance of the model is compared with the application of the BIMO technique without remeshing. The behaviour of both techniques is compared from which BIMO comes out as the most convenient.

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo compara técnicas utilizadas para el cálculo de movimiento de nodos internos en el modelado numérico mediante el Método de Elementos Finitos del proceso de soldadura de punto por fricción-agitación, dado que este proceso implica grandes distorsiones del contorno del dominio. En particular, se presenta la aplicación de la técnica BIMO (Biologically Inspired Mesh Optimisation, presentada en [Biocca et al. \(2022\)](#) a un modelo de caso real reportado en el trabajo de [Gerlich et al. \(2005\)](#). Se compara este nuevo método con los utilizados anteriormente, además con el remallado mediante una implementación modificada del algoritmo de [Delaunay \(1934\)](#).

Los problemas de grandes deformaciones se pueden formular mediante tres enfoques diferentes: Lagrangiano (los nodos están fijos al cuerpo deformable y se mueven de acuerdo con el cambio de forma), Euleriano (los nodos corresponden a un volumen del espacio y se analiza el flujo de material a través de él) y Arbitrary Lagrangean-Eulerian o ALE (los nodos en la malla pueden moverse de manera arbitraria, por lo que pueden acompañar parcialmente a la deformación del material). En los casos de altas deformaciones con enfoque Lagrangiano y a veces también ALE se hace necesario remallar cuando el dominio sufre distorsiones importantes.

El remallado consta de dos pasos: asignación de nueva malla en el dominio, lo que se logra con el algoritmo de malla convencional y la transferencia de los valores de las variables de malla anterior a la nueva, comúnmente a partir de interpolación utilizando los valores nodales de la malla anterior y las funciones de forma de los elementos ([Guerdoux, 2004](#)).

1.1. Dinámica de movimiento de mallas inspirada en la biomecánica

En el campo de las aplicaciones de interacciones fluido-estructura (FSI), ([Tezduyar et al., 2017](#)) con estructuras sensibles a fuerzas viscosas, las capas límite requieren una representación precisa. Frecuentemente esta interacción involucra grandes desplazamientos.

La dinámica de movimiento de mallas inspirada en la biomecánica (BIMO), ([Biocca et al., 2022](#)) se puede plantear como análogo al equilibrio mecánico de las paredes arteriales, considerando el método de movimiento de la malla ([Takizawa et al., 2020](#)) basado en hiperelasticidad reforzada por fibras y estado de cero esfuerzo optimizado (zero stress zones o ZSS, estado en las formas ideales de los elementos). Su comportamiento constitutivo corresponde al de un modelo mixto compuesto por una sustancia fundamental isotrópica (similar a la elastina en las paredes arteriales) y fibras (similar al colágeno).

La soldadura de punto por fricción agitación (Friction Stir Spot Welding o FSSW) se realiza presionando perpendicularmente una herramienta giratoria normalmente cilíndrica sobre la superficie de las planchuelas a unir. La fricción y la adherencia provocan deformación localizada en el material, el cual se calienta y fluye con alta viscosidad. El movimiento de la herramienta provoca la mezcla de ambas planchuelas (etapa de *introducción*). Luego de un tiempo del orden de segundos (etapa de *permanencia*), la herramienta es retirada verticalmente. El esquema del proceso descrito se puede apreciar en la Figura 1.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó el modelado computacional del proceso completo de soldadura FSSW utilizando el método de Elementos Finitos con técnicas ALE en un dominio axisimétrico bidimensional (Figura 2). El dominio representó a dos planchuelas de aleación AA6061 superpuestas, completando un espesor de 2,6 mm. La herramienta consistió en un hombro de 10 mm de diámetro con un pin de 4 mm de diámetro.

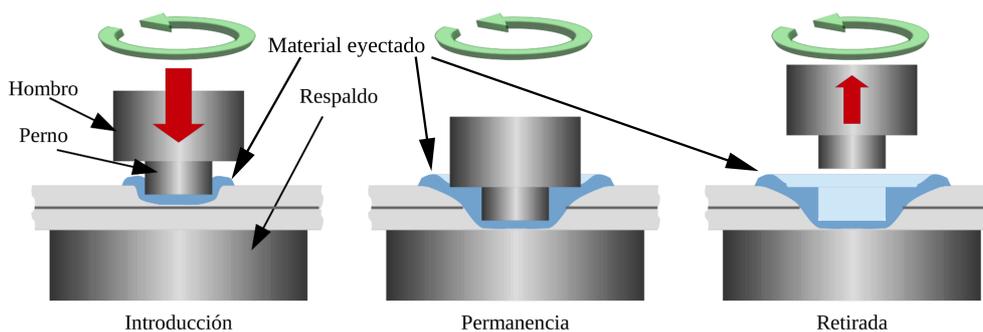


Figura 1: Esquema de las etapas del proceso de soldadura de punto por fricción - agitación. Se aprecia en color azul el material eyectado fuera de la zona de proceso.

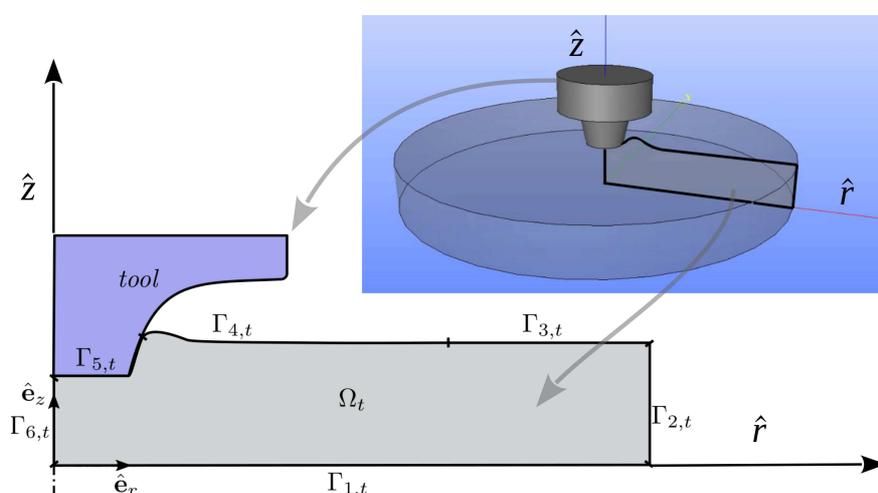


Figura 2: Dominio axisimétrico para el modelado numérico. Se pueden observar las diferentes fronteras del dominio.

La etapa de *inserción* de la herramienta transcurre en el intervalo de tiempo $0 \leq t \leq 3,1s$, a continuación la etapa de *permanencia* en el intervalo $3,1 \leq t \leq 4,1s$, luego de lo cual ocurre la etapa de *retirada*.

La malla estuvo compuesta por 1520 elementos triangulares tipo P1 y 859 nodos. Se implementó un esquema tipo Picard para la linealización. La formulación variacional fue estabilizada mediante las técnicas Streamline Upwind/Petrov-Galerkin (SUPG), (Brooks A.N., 1982) y Pressure Stabilising/Petrov-Galerkin (PSPG), (Tezduyar, 1991).

El campo de desplazamientos en las fronteras (ver Figura 2) $\Gamma_{1,t}$, $\Gamma_{2,t}$, $\Gamma_{3,t}$, and $\Gamma_{6,t}$ son prescritos nulos en la dirección del versor normal, o sea las direcciones \hat{e}_r y \hat{e}_r . Por otra parte, los campos de desplazamientos en las fronteras $\Gamma_{4,t}$ y $\Gamma_{5,t}$ corresponden al movimiento de superficie libre y contacto con la herramienta, respectivamente. En el caso de la frontera $\Gamma_{4,t}$ el campo de desplazamiento nodal se setea perpendicular a la velocidad multiplicado por el intervalo de tiempo entre subpasos de cálculo. El contacto con la herramienta se determina mediante una función vector bidimensional relacionada con las coordenadas actuales $\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{x}_t, t) \forall \mathbf{x}_t \in \Gamma_{5,t}$. Este contacto se calculó utilizando un algoritmo especial que involucra el sobremuestreo de los elementos de superficie en las fronteras $\Gamma_{4,t}$ y $\Gamma_{5,t}$ como una cadena de segmentos ordenados.

Se resolvieron, para cada paso de tiempo, tres sub-pasos de manera escalonada: 1) las ecua-

ciones de movimiento de mallas considerando el contacto impuesto y ocasional así como también el de la superficie libre debida al flujo de material eyectado, 2) las ecuaciones de Navier – Stokes para flujo incompresible y 3) las ecuaciones de balance de calor. La convergencia a la solución se aseguró a través de iteraciones no lineales (método de Krylov) de los tres substeps antes de avanzar al siguiente paso de tiempo.

Las propiedades térmicas y mecánicas del material fueron calculadas para cada iteración dentro de cada subpaso de tiempo como función de la temperatura y las tasas de velocidades de deformación en cada punto de Gauss de los elementos.

El problema tal cual se lo plantea, presenta numerosas fuentes de no linealidad, lo cual hace mucho más difícil la convergencia numérica.

Las ecuaciones, sus formulaciones y métodos de resolución de los substeps 2 y 3 se mantuvieron constantes para todos los modelos de este trabajo. Los demás parámetros y características físicas del problema se pueden encontrar en el trabajo realizado por Carr et al. (2021).

Se utilizó un framework propio escrito en lenguaje Fortran (Urquiza y Vénere, 2002) el cual resuelve un sistema de ecuaciones lineales que se obtienen luego de aplicar el Método de Elementos Finitos a formulaciones variacionales de las ecuaciones diferenciales que describen el problema físico.

Se implementaron dos técnicas diferentes de movimiento de mallas: pseudo-elasticidad (presentada en la sección 2.1) y dinámica inspirada en la biomecánica (presentada en la sección 1.1 y desarrollada en la sección 2.2). A estas dos técnicas se le implementó un tipo de remallado sin interpolación basado en el algoritmo de Delaunay para evitar los inconvenientes mencionados anteriormente (sección 2.3).

2.1. Cálculo del movimiento de malla usando ecuaciones de equilibrio pseudo elástico

Este método, denominado SEMMT (Solid Extension Mesh Moving Technique), (Stein et al., 2003) utiliza ecuaciones de equilibrio elástico para calcular el movimiento de los nodos en base a los tamaños de los elementos y un parámetro χ que tiene en cuenta los modos de deformación relacionados con los cambios de volumen y forma a través del jacobiano, J^e , de cada elemento, rigidizando proporcionalmente a $(J^e)^{-\chi}$. El método queda reducido a elasticidad convencional cuando es $\chi = 0$. En este trabajo se eligió un valor de $\chi = 1$ para todo el dominio en los casos en que el movimiento de mallas se calculó mediante SEMMT.

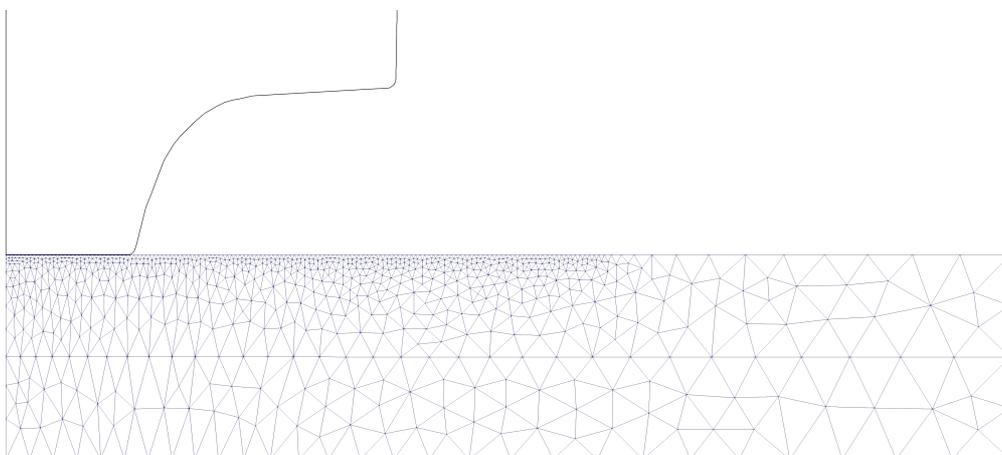


Figura 3: Vista de la malla inicial para las corridas de este trabajo y perfil de la herramienta.

2.2. Cálculo del movimiento de malla con método inspirado en la biomecánica (BIMO)

El método BIMO se basa en la optimización de una teselación en el espacio euclideo usando una representación de la malla mediante un pseudo material reforzado con fibras. La configuración virtual óptima Ω_v (con coordenadas \mathbf{x}_v), libre de esfuerzos internos, de los elementos es la de triángulos equiláteros desvinculados entre sí. Al encontrarse la malla en la configuración de su estado inicial, Ω_0 , las fibras del pseudo material desarrollan tensiones que tienden recuperar la forma óptima. La configuración virtual Ω_v sirve como un estado libre de esfuerzos (Zero Stress State, ZSS) para el refuerzo de fibra pseudomaterial. En consecuencia, el constituyente de la fibra presenta un cierto nivel de deformación en la configuración inicial de la malla, Ω_0 , que se caracteriza en cada punto del material por el tensor \mathbf{F}^v que corresponde a la deformación previa a la deformación inicial. La configuración espacial Ω_s (con coordenadas \mathbf{x}_s) es la configuración de autoequilibrio optimizada. El tensor \mathbf{F}^u caracteriza la deformación espacial en cada punto material de tal manera que cada segmento infinitesimal de material está relacionado con su contraparte de referencia por:

$$d\mathbf{x}_s = \mathbf{F}^u d\mathbf{x}_0 \quad (1)$$

Las coordenadas del material en estas tres configuraciones están relacionadas a través de los campos de desplazamiento \mathbf{u} y \mathbf{v} de la siguiente manera:

$$\mathbf{x}_s = \mathbf{x}_0 + \mathbf{u}(\mathbf{x}_0); \quad \mathbf{x}_0 = \mathbf{x}_v + \mathbf{v}(\mathbf{x}_0) \quad (2)$$

donde el desplazamiento virtual \mathbf{v} es un campo discontinuo, ya que transforma una configuración cinemáticamente incompatible en una compatible, es decir, Ω_v en Ω_0 . Nótese también que el tensor \mathbf{F}^{uv} caracteriza la deformación total que presenta el constituyente reforzado con fibras y admite la descomposición $\mathbf{F}^{uv} = \mathbf{F}^u \mathbf{F}^v$.

La formulación variacional que caracteriza el equilibrio mecánico interno (estado estacionario libre de fuerzas externas) para la configuración espacial Ω_s es:

Encontrar $\mathbf{u} \in \mathcal{U}_s$ tal que:

$$\int_{\Omega_s} (\boldsymbol{\sigma}_g^u + \boldsymbol{\sigma}_f^{v+u}) \cdot \boldsymbol{\varepsilon}(\hat{\mathbf{u}}) d\Omega_s = 0 \quad \forall \hat{\mathbf{u}} \in \mathcal{V}_s \quad (3)$$

donde $\boldsymbol{\varepsilon}(\hat{\mathbf{u}}) = \frac{1}{2} (\nabla \hat{\mathbf{u}} + \nabla \hat{\mathbf{u}}^T)$ es el tensor tasa de deformación, con ∇ como gradiente respecto de las coordenadas \mathbf{x}_s , $\mathcal{U}_s = \{\mathbf{u} \in \mathbf{H}^1(\Omega_s)\}$ es el espacio topológico lineal (manifold) asociado con los desplazamientos cinemáticamente admisibles y $\mathcal{V}_s = \{\hat{\mathbf{u}} \in \mathbf{H}^1(\Omega_s)\}$ es el espacio de los movimientos cinemáticamente admisibles. Los desplazamientos \mathbf{u} y $\hat{\mathbf{u}}$ satisfacen las condiciones de contorno esenciales. El estado de tensiones del material base es $\boldsymbol{\sigma}_g^u$, que es función del segundo tensor de Piola-Kirchhoff \mathbf{S}_g a través de funciones de energía de deformación hiperelástica definidas más adelante. Por su parte, el estado tensional asociado a las fibras es $\boldsymbol{\sigma}_f^{u+v}$ a su vez función del segundo tensor de Piola-Kirchhoff \mathbf{S}_f vía su ecuación constitutiva asociada con el campo de desplazamientos $\mathbf{u} + \mathbf{v}$.

Se asumió al material base que contiene las fibras de cada elemento, a un modelo Neo-Hookeano de material a través del potencial elástico Ψ_g y y para las fibras de refuerzo del pseudo material se consideró un modelo de N fibras anisotrópico dado por el potencial Ψ_f :

$$\Psi_g = \frac{k_g}{2} (\mathbf{I}_1^u - 3); \quad \Psi_f = \sum_{i=1}^N \frac{k_1^i}{2k_2^i} \left(e^{k_2^i ((\bar{\lambda}_e^i)^2)} - 1 \right) \quad (4)$$

siendo k_g el parámetro que caracteriza la rigidez del material base y I_1^u es la traza del tensor Cauchy-Green derecho $\mathbf{C} = \mathbf{F}^{uT} \mathbf{F}^u$; por otro lado, k_1^i y k_2^i son propiedades del material para la familia i -ésima de fibras y $\bar{\lambda}_e^i$ es el stretch elástico real para la familia i -ésima que puede ser expresado como $\bar{\lambda}_e^i = \bar{\lambda}^i / \bar{\lambda}_R^i$, $i = 1, \dots, N$, siendo $\bar{\lambda}_R^i$ el stretch de reclutamiento y $\bar{\lambda}^i$ el stretch de la i -ésima familia de fibras $\bar{\lambda}^i = \sqrt{\mathbf{a}_v^i \cdot \bar{\mathbf{C}}^{uv} \mathbf{a}_v^i}$, $i = 1, \dots, N$, siendo $\bar{\mathbf{C}}^{uv} = \det(\mathbf{F}^{uv})^{-2/3} \mathbf{C}^{uv}$, el tensor isocórico de Cauchy-Green derecho y $\mathbf{C}^{uv} = \mathbf{F}^{uvT} \mathbf{F}^{uv}$, el tensor derecho de Cauchy-Green relacionado con el tensor gradiente de deformación \mathbf{F}^{uv} .

Las funciones de energía de deformación hiperelástica definidas en las ecuaciones 4 se relacionan con los tensores \mathbf{S}_g y \mathbf{S}_f mencionados anteriormente a través de:

$$\mathbf{S}_g = \left. \frac{\partial \Psi_g}{\partial \mathbf{E}} \right|_{\mathbf{E}=\mathbf{E}^u}; \quad \mathbf{S}_f = \left. \frac{\partial \Psi_f}{\partial \mathbf{E}} \right|_{\mathbf{E}=\mathbf{E}^{uv}} \quad (5)$$

La ecuación de equilibrio interno 3 fue reformulada para tener en cuenta la relajación del pseudo material y expresada en la configuración actual conocida. Luego fue linealizada mediante el procedimiento de Newton-Raphson y discretizada mediante elementos finitos lineales (Biocca et al., 2022) obteniendo un sistema de ecuaciones lineales mediante las cuales se pudo obtener la configuración en cada paso de tiempo.

2.3. Remallado mediante algoritmo de Delaunay modificado

El algoritmo de remallado, adaptado en base a código escrito por Devilliers (2006) del algoritmo de Delaunay (1934) consiste en utilizar los mismos nodos de la malla anterior y actualizar la conectividad definiendo los elementos de la malla nueva mediante dicho algoritmo.

Esta implementación cumplió sus funciones mediante los siguientes pasos:

- Lanzar la primera corrida del framework (Urquiza y Vénere, 2002) a partir del paso de tiempo inicial, $t=0$ s.
- Importar los parámetros de cada corrida y los datos de salida del resolutor antes de cada etapa de remallado.
- Ejecutar el algoritmo de Delaunay con los nodos pertenecientes al grupo de elementos de interés para remallar.
- Conservar, de la conectividad obtenida, los elementos pertenecientes al grupo de interés.
- Escribir los nuevos archivos de entrada (parámetros y valores nodales) y de nueva conectividad para lanzar la ejecución de resolución del problema continuando a partir del paso de tiempo siguiente.

La etapa anterior y posterior de este remallado se puede apreciar conceptualmente, para un caso de distorsión excesiva, en la Figura 4. En el ejemplo que se muestra se realizó el proceso con el algoritmo aplicado solamente al grupo de elementos sub superficiales.

2.4. Diagramación de las corridas de cálculo computacional

Se realizaron cuatro corridas, mostradas en la Tabla 1, utilizando el mismo caso físico y el mismo dominio (Figura 3) con las características particulares respecto del movimiento de nodos y remallado y resolución numérica del sistema de ecuaciones resultante.

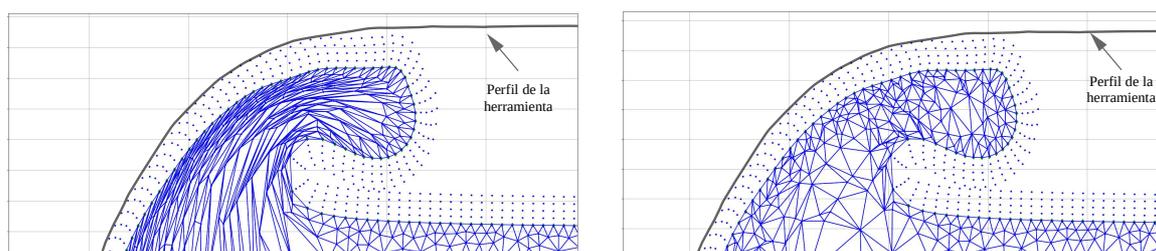


Figura 4: Detalle de los estados anterior (izquierda) y posterior (derecha) al remallado del grupo de elementos interés utilizando el algoritmo basado en el de Delaunay. Se muestran sólo los elementos del grupo remallado y se omiten las aristas de los elementos de los demás grupos.

Dinámica de mallas	Método de Resolución sist. ecuaciones lineales	Remallado Delaunay modificado ($t = t_i$)
SEMMT-D	GMRES	0.75s, 1.0s, 1.20s, 1.35s, 1.55s, 1.75s, 2.0s
BIMO-L	GMRES	No
BIMO-LD	GMRES	1.0s, 1.2s, 1.35s, 1.55s, 1.75s, 2.0s
BIMO-N	Iterativo (Krylov), no lineal	No

Tabla 1: Corridas para el presente trabajo y técnicas aplicadas.

El criterio para determinar los tiempos de remallado fue la observación de corridas anteriores. La técnica BIMO mantuvo la distorsión suficientemente baja como para prescindir del remallado en $t = 0,75s$.

Se tomaron dos factores como métricas de la distorsión de los elementos a lo largo de los pasos de tiempo:

- Q : Factor de falta de calidad definido como el doble del cociente entre el radio del círculo inscrito en los lados del elemento y el radio del círculo en el que se inscribe el mismo (el valor óptimo es $Q = 1$).
- ϕ : Factor de forma definido según la distancia topológica al triángulo equilátero (el valor óptimo es $\phi = 1$, siendo $0 \leq \phi \leq 1$).

Otros factores que han sido tenidos en cuenta en el análisis de desempeño de las técnicas fueron el tiempo de ejecución y procesamiento y la influencia en la variación de los campos escalares luego de los remallados.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se puede apreciar en la Figura 5 (derecha) la variación de los factores de calidad mínimos y promedio para toda la malla y para las cuatro corridas. Los valores máximos de factor de calidad resultaron muy cercanos a la unidad en todas las corridas. Esto se debe a que existen elementos que presentan buen aspecto y no sufren modificación de su forma a lo largo de todas las corridas. Es por esa razón que no se muestran en el gráfico. Son para destacar las variaciones abruptas en los valores mínimos de este factor para los casos SEMMT-D y BIMO-LD, las cuales coinciden con los instantes de remallado.

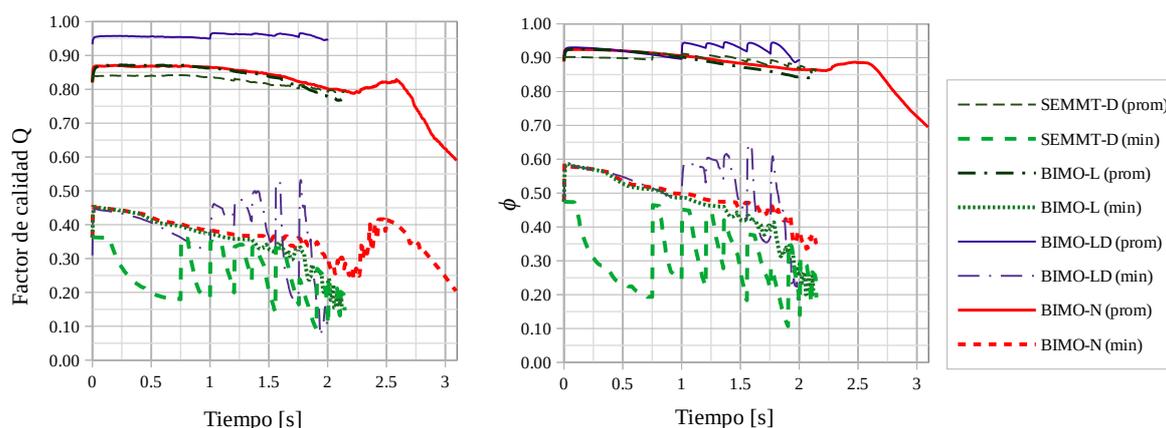


Figura 5: Resultados de factores de calidad y de forma ϕ mínimos y promedio. Izquierda: Valores promedio y mínimos del factor Q de calidad de elementos en función del tiempo. Derecha: Factores de forma ϕ mínimos y promedio de elementos en función del tiempo.

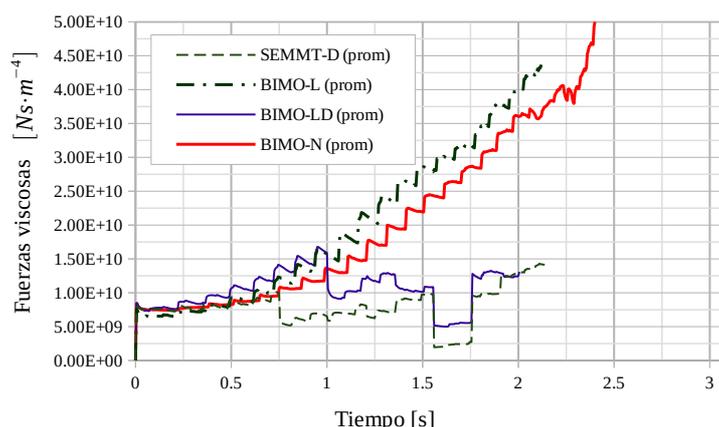


Figura 6: Fuerzas viscosas promedio en función del tiempo.

En la Figura 5 se puede observar los valores mínimos y promedio del factor de forma ϕ para toda la malla en cada caso. Se puede apreciar que el factor de calidad Q y el factor ϕ variaron de forma significativa y abrupta en las corridas SEMMT-D y BIMO-LD. Dichos cambios abruptos se corresponden con los instantes del remallado detallados en la tabla 1. Las corridas BIMO-L y BIMO-N mostraron una variación más suave de valores del factor de forma. Por otra parte, la corrida BIMO-LD pareciera mostrar una mucho mayor calidad promedio que el resto, aún a pesar de los cambios de pendiente observados. Se observa también que el método SEMMT-D obtuvo los peores valores de calidad. Esto último pone en evidencia que el método BIMO contribuye a una mejor calidad de malla desde los primeros pasos de tiempo. Esto se puede observar en el aumento rápido del factor Q al inicio, mientras que la distorsión de la malla y el desplazamiento de material paulatinamente disminuyen su calidad en el caso de SEMMT. Esto hace necesario el remallado en este caso.

En la Figura 6 se muestran los valores de fuerzas viscosas promedio para todos los elementos en cada corrida. Es necesario destacar que en todos los casos las fuerzas viscosas tienen una

variación escalonada debido a la discretización de la frontera de contacto con la herramienta y el contacto sucesivo de nodos de la superficie con la geometría de la herramienta a través del tiempo. Si bien las condiciones oblicuas son aplicadas mediante penalización, los rangos en los que ésta actúa no pueden ser comparables con el lado del elemento frontera del dominio ya que resultaría en un contacto amortiguado y por lo tanto, alejado de la realidad. Esto tiene como consecuencia lo que se observa en la Figura 6, que el aumento de las fuerzas viscosas se da por efecto del incremento de las tensiones de corte debidas a la velocidad tangencial impuesta por la de adherencia entre herramienta y material. No obstante, nuevamente se pueden apreciar las variaciones bruscas en este campo escalar debidas al remallado en los casos correspondientes. Este procesamiento influye directamente en el calor aportado al material, por lo cual queda claro que si bien el remallado trae como consecuencia una mejora en la calidad de la malla y en la forma de los elementos, esto trae aparejada una modificación de los gradientes locales de los campos de velocidades de deformación.

En la Tabla 2 se pueden apreciar los tiempos de ejecución y el estado final del modelado.

Corrida	Tiempo de ejecución [s] hasta $t = 2s$	Convergencia exitosa
SEMMT-D	5760	No
BIMO-L	6960	No
BIMO-LD	7500	No
BIMO-N	15540	Sí

Tabla 2: Resultados cuantitativos de las corridas realizadas.

En cuanto a los tiempos de ejecución, sin duda el método BIMO-N mostró ser el más costoso. De todas maneras, los resultados indicaron que es un costo aceptable ya que las variaciones relativamente suaves de los campos vectoriales y escalares y la convergencia simultánea de las variables en cada paso de tiempo tienen como resultado el éxito de la simulación. Por otra parte, el remallado mediante el método de Delaunay modificado no implica un mayor costo computacional apreciable, pero implica tiempo adicional de postprocesamiento de los datos de salida y esto sí es un costo adicional en tiempo de usuario.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se comparó el resultado de la implementación de dos técnicas de cálculo de dinámica de mallas para resolver el problema de la gran distorsión del dominio al momento de modelar la soldadura de punto por fricción agitación.

Se compararon las técnicas Solid Extension Mesh Moving Technique y remallado con el algoritmo de Delaunay modificado (SEMMT-D), con el método de optimización de mallas inspirada en la biomecánica con y sin remallado (BIMO-LD, BIMO-L). Por otra parte, en el caso de la técnica BIMO sin remallado (BIMO-N), se comparó la resolución del sistema de ecuaciones de mediante el algoritmo GMRES e iterativa (método Krylov)

Se propusieron dos métricas para evaluar la distorsión de la malla en cada corrida.

Se pudo establecer que el mejor desempeño lo logró la técnica BIMO con resolución no lineal (corrida BIMO-N). La técnica de remallado mediante el algoritmo de Delaunay modificado significó la alteración brusca de los campos escalares y vectoriales que se cree, tuvieron gran influencia en la no convergencia del modelado en las corridas SEMMT-D y BIMO-LD.

La gran cantidad de fuentes de no linealidades en el problema estudiado hacen necesaria la implementación de técnicas de resolución iterativas.

Se puede concluir que el método BIMO con resolución no lineal es la técnica más adecuada de las estudiadas en este trabajo.

A futuro queda estudiar la opción de densificar aún más la malla y analizar la variación de parámetros internos del método en particular para este tipo de procesos de unión de materiales.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONICET) y a través de los proyectos “Simulación Computacional de Sistemas Mecánicos No-Lineales” (15/G497) y “Modelización Computacional de Problemas Multifísica” de la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP), Argentina.

El apoyo de estas instituciones es gratamente reconocido.

REFERENCIAS

- Biocca N., Blanco P.J., Caballero D.E., Gimenez J.M., Carr G.E., y Urquiza S.A. A biologically-inspired mesh optimizer based on pseudo-material remodeling. *Computational Mechanics*, 69(2):505–525, 2022. ISSN 1432-0924. doi:10.1007/s00466-021-02101-6.
- Brooks A.N. H.T. Streamline upwind petrov–galerkin formulations for convection dominated flows with particular emphasis on the incompressible navier–stokes equations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 32:199–259, 1982.
- Carr G., Biocca N., Urquiza S.A., y Lombera G.A. Modelado por elementos finitos del proceso de soldadura fssw considerando la inserción de la herramienta. *Mecánica Computacional*, XXXVIII:43–456, 2021. ISSN 2591-3522.
- Delaunay B. Sur la sphère vide. a la mémoire de georges voronoï. *Bulletin de l'Académie des Sciences de l'URSS. Classe des sciences mathématiques et naturelles*, (6):793–800, 1934.
- Devilliers O. Geompack, robust and efficient implementation of the delaunay tree: <https://www-sop.inria.fr/prisme/logiciel/index.html>. 2006.
- Gerlich A., Su P., y North T. Tool penetration during friction stir spot welding of al and mg alloys. *Journal of Material Science*, 40:6473–6481, 2005.
- Guerdoux S. Numerical simulation of the friction stir welding process using both lagrangian and arbitrary lagrangian eulerian formulations. *AIP*, 712:1259–1264, 2004. doi:10.1063/1.1766702.
- Stein K., Tezduyar T., y Benney R. Mesh moving techniques for fluid-structure interactions with large displacements. *Journal of Applied Mechanics*, 70(1):58–63, 2003. doi:doi:10.1115/1.1530635.
- Takizawa K., Tezduyar T.E., y Avsar R. A low-distortion mesh moving method based on fiber-reinforced hyperelasticity and optimized zero-stress state. *Computational Mechanics*, 2020. doi:10.1007/s00466-020-01835-z.
- Tezduyar T. Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations. En *Advances in Applied Mechanics*, páginas 1–44. Elsevier, 1991. doi:10.1016/s0065-2156(08)70153-4.
- Tezduyar T.E., Takizawa K., y Bazilevs Y. *Fluid–Structure Interaction and Flows with Moving Boundaries and Interfaces*, páginas 1–53. American Cancer Society, 2017. ISBN 9781119176817. doi:10.1002/9781119176817.ecm2069.
- Urquiza S. y Vénere M. An application framework architecture for fem and other related solvers. *Mecánica Computacional*, XXI:3099–3109, 2002.