

MALLA ESTRUCTURADA PARA LA CURVATURA DEL CUELLO DE UNA PROBETA CILÍNDRICA SOMETIDA A TRACCIÓN AXIAL

San Luis Tolentino¹, Omar Gonzales², Jorge Meyzan², Abraham Zamudio¹ y Jorge Mírez¹

¹: Grupo de Modelamiento Matemático y Simulación Numérica, Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Lima, Perú. E-mail: sanluist@gmail.com, abraham.zamudio@uni.pe, jmirez@uni.edu.pe

²: Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional Hermilio Valdizán, Huánuco, Perú.
E-mail: kokymeyzan@hotmail.com, ogc_777@hotmail.com

Resumen: En el presente trabajo, se realizaron simulaciones numéricas de un dominio computacional 2D de una probeta cilíndrica de material de acero A-533 Grado B Clase 1 sometido a tracción axial. El dominio se dividió en dos zonas y se aplicó una tecnología de mallado, la malla se estructuró con celdas cuadriláteras y relación de espacio para la región crítica donde se forma el cuello. El dominio fue simulado utilizando el código ANSYS que aplica el método de elementos finitos; y la ecuación no lineal de la ley de endurecimiento isótropo de Voce se usó para grandes deformaciones plásticas. Se obtuvieron resultados para diferentes densidades de mallas, de las cuales, una de ellas presentó mejores resultados de curvatura bien definida en la pared del cuello con respecto a otros trabajos de otros autores que presentaban una curvatura por segmentos de líneas rectas. Se validó la curva numérica obtenida relación de radio-longitud con los datos experimentales de Norris. Además, las distribuciones de concentración de esfuerzos se obtuvieron durante la deformación plástica, donde se determinó que la tensión máxima está presente en el centro de la región del cuello, para un estado de tensión triaxial. Se concluye que la malla estructurada aplicada donde se forma la curvatura del cuello elimina la imperfección de la curvatura compuesta por segmentos de líneas rectas.

Palabras Clave: Curvatura del cuello, Ecuación de Voce, Malla estructurada, Tracción axial, Simulación numérica

STRUCTURAL MESH FOR THE NECK CURVATURE OF A CYLINDRICAL SPECIMEN SUBMITTED TO AXIAL TRACTION

Abstract: In the present work, numerical simulations of a 2D computational domain of a cylindrical specimen of steel material A-533 Grade B Class 1 subjected to axial traction were performed. The domain was divided into two zones and a meshing technology was applied, the mesh being structured with quadrilateral cells and space ratio for the critical region where the neck is formed. The domain was simulated using the ANSYS code that applies the finite element method; and the non-linear equation of the isotropic hardening law of Voce was used for large plastic deformations. Results were obtained for different mesh densities, of which, one of them presented better results of well-defined curvature in the neck wall with respect to other works of other authors that presented a curvature by segments of straight lines. We validated the numerical curve obtained radio-length relation with the experimental data of Norris. In addition, stress concentration distributions were obtained during plastic deformation, where it was determined that the maximum stress is present at the center of the neck region, for a state of triaxial stress. It is concluded that the structured mesh applied where the curvature of the neck is formed eliminates the imperfection of the curvature composed by segments of straight lines.

Key words: Curvature of the neck, Voce equation, Structured Mesh, Axial traction, Numerical simulation

I. INTRODUCCIÓN

En un ensayo experimental de tensión, los parámetros que se determinan con son: el límite proporcional, límite elástico, punto de fluencia, resistencia de fluencia, resistencia límite, y la resistencia a la ruptura. Las dos normas internacionales aplicadas para el ensayo de tracción axial de probetas cilíndricas son: ASTM E8 para unidades en pulgadas y la ASTM E8-00 para unidades en milímetros. Durante la deformación plástica, a medida que el diámetro disminuye, se produce un endurecimiento e incremento de la temperatura en la región donde se forma el cuello, en esta parte del cuello se produce un estado triaxial de tensión, que está relacionado con la tensión hidrostática y la tensión equivalente de Von Mises [1].

Las simulaciones numéricas de dominios computacionales de probetas metálicas permiten reproducir el comportamiento de las deformaciones plásticas cuando se le aplican cargas axiales en sus extremos. Y uno de los métodos comunes aplicados en las simulaciones numéricas es el método de los elementos finitos (MEF). El dominio computacional al ser deformado plásticamente hasta una elongación máxima definida previamente, dentro del límite de fluencia antes de alcanzar la rotura, se obtienen los resultados numéricos del radio mínimo en la estricción cuando se forma el cuello, la curvatura en la pared del cuello, entre otros parámetros.

Una de las contribuciones importantes en deformaciones plásticas de probetas de acero A-533 Grado B Clase 1 se debe al trabajo de Norris et al [2], quienes realizaron ensayos experimentales de probetas, donde resultados experimentales se muestran en la Figura 1, y una de las probetas deformadas se muestra en la Figura 2. Además, la geometría de la probeta fue simulada para grandes deformaciones en un dominio computacional 2D aplicando el método de diferencia finita (MDF). Sin embargo, en fecha anterior, Giroux [3] ya había simulado la misma geometría de la probeta en cuestión con el código HEMP que también aplica el MDF.

El acero A-533 Grado B Clase 1 son empleados en recipientes de presión en centrales nucleares, el cual, tienen un espesor típico de sus paredes en el rango de 20 cm-25 cm, y consecuencia de esto presentan de su proceso de fabricación una estructura no homogénea a lo largo del espesor [4]. Debido a esto, no solamente varía su microestructura sino también sus propiedades mecánicas. Además, sus propiedades varían por la radiación neutrónica consecuencia de la presencia de las barras de uranio para generar calor. La irradiación neutrónica produce la reducción de la tenacidad de fractura del acero del recipiente [5, 6].

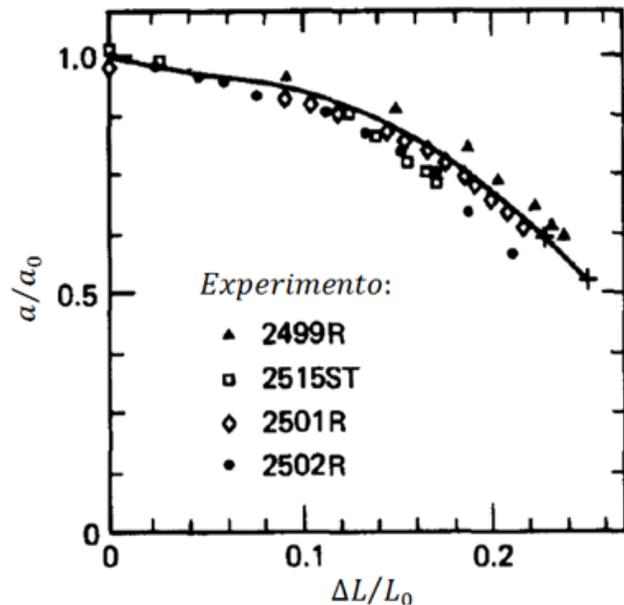


Figura 1. Resultados de ensayos experimentales de probetas realizado por Norris et al [2].

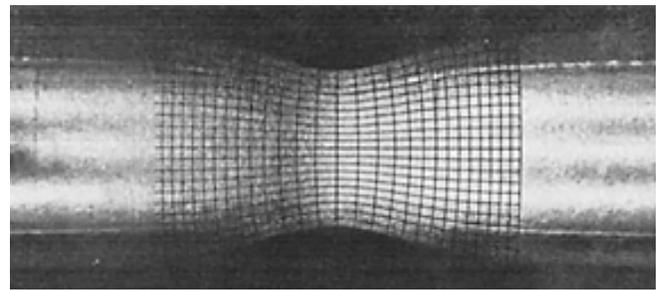


Figura 2. Imagen de la probeta deformada por tracción axial. Experimento 2499R [2].

La geometría de la probeta de acero A-533 Grado B Clase 1 estudiada por Norris et al [2] era ligeramente cónica, con un diámetro máximo 12.826 mm en un extremo y diámetro mínimo 12.7 mm en la parte media de su longitud total para darle la conicidad, con una longitud total de 53.334 mm de extremo a extremo. Posteriormente, la misma geometría de la probeta fue estudiada con diferentes códigos computacionales por otros investigadores [7-15], quienes dividieron los dominios computacionales en dos zonas y mallaron con celdas cuadriláteras, refinando la zona donde se forma el cuello. Los resultados computacionales mostraron que: luego de aplicar la carga en los extremos del dominio de la probeta, las celdas de la malla ubicadas donde se produce la estricción se alargaron, debido a que en esa región se produjo una mayor deformación axial y radial. Las celdas cuadriláteras y alargadas formaron parte de la curvatura de la pared del cuello con segmentos rectos obteniendo una forma de “V”, para los dominios mallados con menos celdas; y una “V” más abierta para los dominios mallados

con más celdas. La aplicación del incremento de celdas en la malla donde se forma el cuello fue con la finalidad de reducir la forma de “V”, sin embargo, siempre estaba presente formando un vértice con el radio mínimo de la estricción. Por tanto, no obtuvieron una curvatura bien definida en la pared del cuello de la probeta, la cual debería ser semejante a la curva del experimento 2499R [2] (ver Figura 2). Cabe señalar, en la misma figura en la región de la probeta deformada, se observa como las divisiones marcadas están alargadas donde se forma el cuello por deformación plástica y en los extremos del radio mínimo, lo que indica que es una región crítica de mayor deformación axial y radial, por tanto, una región de mayor concentración de esfuerzos.

Resultados similares de las celdas deformadas obtenidas en los trabajos de los autores [7-15], también han sido obtenidos por otros investigadores [16,17] para los dominios computacionales de una probeta cilíndrica de aluminio HE30, donde la celda de la pared del cuello tiene una forma de “V” más abierta.

En el presente trabajo, se emplea el código ANSYS-Apdl versión 12.1 (Apdl, Lenguaje de Diseño Paramétrico de Ansys) que aplica el método de elementos finitos (MEF) para las soluciones numéricas de un dominio computacional 2D con simetría axial de una probeta de acero A-533 Grado B Clase 1, aplicando una tecnología de mallado distinto a los empleados por otros investigadores [7-17]. En la sección II se presenta el fundamento matemático de la ecuación constitutiva empleada para grandes deformaciones, se exponen los resultados obtenidos de la evolución de las curvaturas del cuello para diferentes densidades de mallas, las deformaciones radiales y axiales, así como las distribuciones de concentraciones de esfuerzos de Von Mises. En la sección III se exponen las conclusiones del análisis realizado.

II. DESARROLLO

2.1. Fundamento Matemático

La ecuación constitutiva empleada para la deformación plástica del dominio computacional, es una ecuación no lineal de la ley de endurecimiento isótropo de Voce [18], y se expresa como

$$\sigma = \sigma_0 + H\epsilon^p + (\sigma_\infty - \sigma_0)(1 - e^{-b\epsilon^p}) \quad (1)$$

Donde, σ es el esfuerzo, σ_0 el esfuerzo de fluencia inicial límite elástico, H el coeficiente de endurecimiento lineal, ϵ^p la deformación plástica equivalente, σ_∞ el esfuerzo de fluencia residual, y b el exponente de saturación.

Las magnitudes de los parámetros del acero A-533

Grado B Clase 1 [7, 8, 9], el módulo de elasticidad E y la relación de poisson ν , se muestran en la Tabla I.

Tabla I. Parámetros empleados en la ecuación no lineal de ley de endurecimiento isótropo de Voce

Constante	Valores
σ_0	450 MPa
H	129.24 MPa
σ_∞	715 MPa
b	16.93
E	206.9 GPa
ν	0.29

La ecuación constitutiva no lineal de endurecimiento isótropo, está basada en los siguientes principios: el criterio de fluencia de Von Mises, regla de flujo, regla por trabajo de endurecimiento isótropo, y respuesta de material no lineal.

La regla de flujo está determinada como

$$\{de^p\} = \lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} \quad (2)$$

Siendo la deformación plástica e^p , el multiplicador plástico λ , la condición de la función de esfuerzo del potencial plástico Q , el esfuerzo σ , y el vector $\{ \}$.

El criterio de fluencia F , se expresa del siguiente modo para $F=0$

$$F = \left[\frac{3}{2} \{S\}^T [M] \{S\} \right]^{\frac{1}{2}} - \sigma = 0 \quad (3)$$

Donde, el esfuerzo desviador es $\{S\}$, y de la matriz es $[M]$.

$$[M] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

Asimismo, el incremento de la deformación plástica se expresa como

$$\{\Delta e^p\} = \lambda \left\{ \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \right\} = \lambda \left\{ \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right\} = \frac{2}{3} \lambda \frac{\{S\}}{\sigma_e} \quad (4)$$

Donde, el esfuerzo equivalente se expresa como σ_e , y el incremento de la deformación plástica equivalente e^p

$$\Delta \hat{e}^p = \sqrt{\frac{2}{3} \{\Delta e^p\}^T [M] \{\Delta e^p\}} = \lambda \quad (5)$$

Donde, la deformación plástica equivalente acumulada, se expresa como

$$e^p = \sum \Delta \hat{e}^p \quad (6)$$

2.2. Procedimiento

A) Dominio de la probeta

La dimensión de longitud total de la probeta cilíndrica de acero A-533 Grado B Clase 1 [2, 8-10] es $2L_0=53.334$ mm, diámetro mayor $D_L=12.826$ mm, y diámetro menor $D_0=12.70$ mm en la mitad de la longitud de la probeta. Por la simetría que tiene la probeta, se establece el dominio una cuarta parte del mismo, el cual, es un dominio 2D con simetría axial con respecto a un eje proyectado en el plano ry (ver Figura 3). Se construyeron dos dominios computacionales 2D con simetría axial, las cuales se dividieron en dos zonas para su posterior mallado (ver Figura 4).

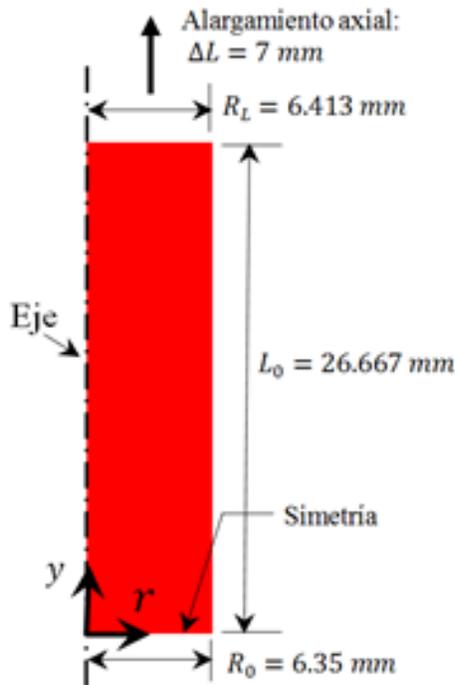


Figura 3. Dominio 2D con simetría axial.

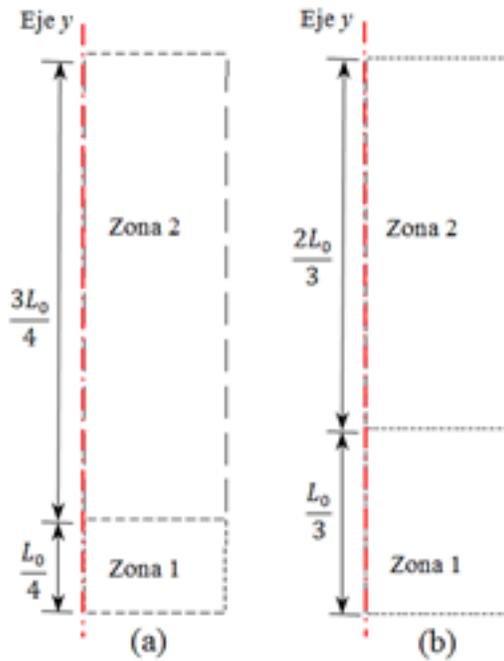


Figura 4. Dominios divididos en dos zonas.

B) Límites de desplazamiento

Los límites de desplazamiento se establecen como: en la dirección radial UX, y en la dirección axial UY.

La condición de borde en $y=0$, se define como

$$UX(0,y)=0$$

$$UY(R,0)=0$$

La deformación plástica en la estricción de la probeta en la dirección radial R se establece $\frac{R}{R_0} \leq 1$; para $R \leq 6.350$ mm.

La condición de borde en $y=L_0$, se define como

$$UX(R,L_0)=0$$

$$UY(R,L_0)=\Delta L$$

Donde, el desplazamiento axial ΔL durante la aplicación de la carga está en el rango $0 \leq \Delta L \leq 7$ mm, para $\Delta L=0,1,2,\dots,6,7$ mm.

Simo y Hughes [9] simularon numéricamente la probeta en cuestión de Norris et al [2], siendo el diámetro 12.826 mm y la longitud 53.334 mm. De estas medidas simularon la cuarta parte por la simetría geométrica, siendo la sección a simular con radio $R_0=6.413$ mm y longitud $L_0=26.667$ mm, para un alargamiento $\Delta L=7$ mm en un solo extremo donde se aplica la carga.

Cabe destacar, que Elguedj y Hughes [11] emplearon la geometría de la probeta ligeramente cónica de los trabajos de Norris et al [2], para un primer caso 2D

con simetría axial, y un segundo caso 3D, donde, las dimensiones geométricas del diámetro $D_0=12.826$ mm y la longitud total $L_0=53.334$ mm se mantuvieron constante, sólo que, para darle la conicidad de la probeta en su trabajo, le redujeron el diámetro en la parte media de la probeta en 1.8 por ciento con respecto al diámetro de los extremos, y considerando para el caso de simetría axial un alargamiento axial de $\Delta L=5$ mm, y el caso volumétrico $\Delta L=9$ mm, respectivamente.

C) Método de solución computacional y equipo

Para la simulación numérica en el código ANSYS se establecieron las siguientes consideraciones: tipo de elemento PLANE 183, grandes deformaciones plásticas, método iterativo de Newton-Rapson, dominio 2D con simetría con respecto a un eje, y sin efecto del fenómeno térmico cuando la probeta se deforma.

Para el procesamiento de datos se utilizó un equipo con las siguientes características: Laptop marca Síragon, modelo M54R, Intel Core 2 Duo, dos procesadores de 1.8 GHz, y memoria RAM de 3 GB.

2.3. Resultados y discusión

2.3.1 Tecnología de mallado

A) Primer caso: evolución de la curvatura del cuello para cada dominio mallado con 50, 200, 400, 800 y 1600 celdas

Los cinco dominios mallados a ser estudiados se muestran en la Figura 5, donde cada dominio está dividido en dos zonas. Las zonas 1 y 2 de los dominios con mallas estructuradas están compuesto por: 50, 200, 400, 800 y 1600 celdas, respectivamente. Los dominios mallados de la Figuras 5.a-b corresponden al dominio de la Figura 4.a, y de la Figura 5.c-e al dominio de la Figura 4.b.

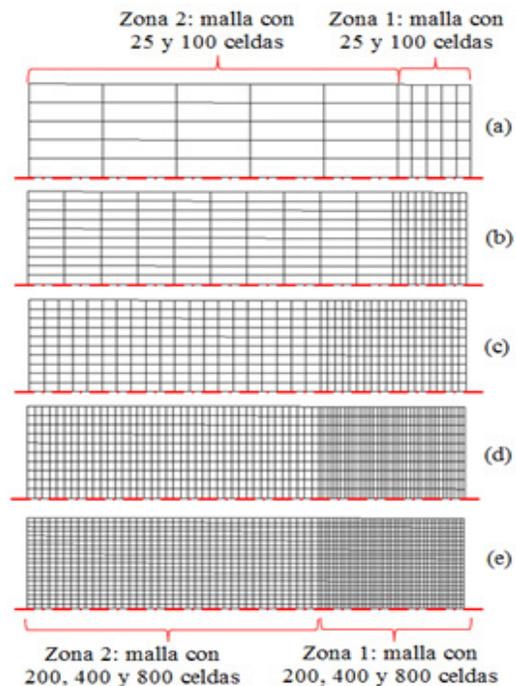


Figura 5. Distribución de las celdas en cada malla de los dominios: (a) 50 celdas, (b) 200 celdas, (c) 400 celdas, (d) 800 celdas y (e) 1600 celdas.

Cabe señalar, Simo [8, 9] y Ponthot [10] simularon el dominio de la probeta del trabajo de Norris [2], el cual se muestra en la Figura 3; donde Simo [8, 9] consideró constante el radio de 6.413 mm a lo largo de todo el dominio y con mallas de 50, 200 y 400 celdas y con las mismas características de las distribuciones de las zonas malladas que se muestran en la Figura 5.a-c. Sin embargo, Ponthot [10] consideró en su trabajo las mismas dimensiones del dominio mostrado en la Figura 3, con mallas de 50, 200, 400, 800 y 1600 celdas, y con las mismas características de las zonas malladas que se muestran en la Figuras 5.

Los dominios deformados luego de aplicar la carga por tracción axial para una elongación $\Delta L=7$ mm se muestran en la Figura 6, donde, en el extremo derecho se aprecian la evolución de las curvaturas en la pared del cuello. El comportamiento de la distribución de las celdas deformadas son distintos uno con respecto al otro a medida que se incrementan las celdas en las mallas. En la zona 1, en el extremo derecho donde se produce la estricción, en el radio mínimo, las celdas quedan estiradas y la malla en esa región tiene menor densidad de celdas, mientras que, en el extremo izquierdo de la misma zona 1, las celdas se deforman poco y la malla tiene mayor densidad de celdas.

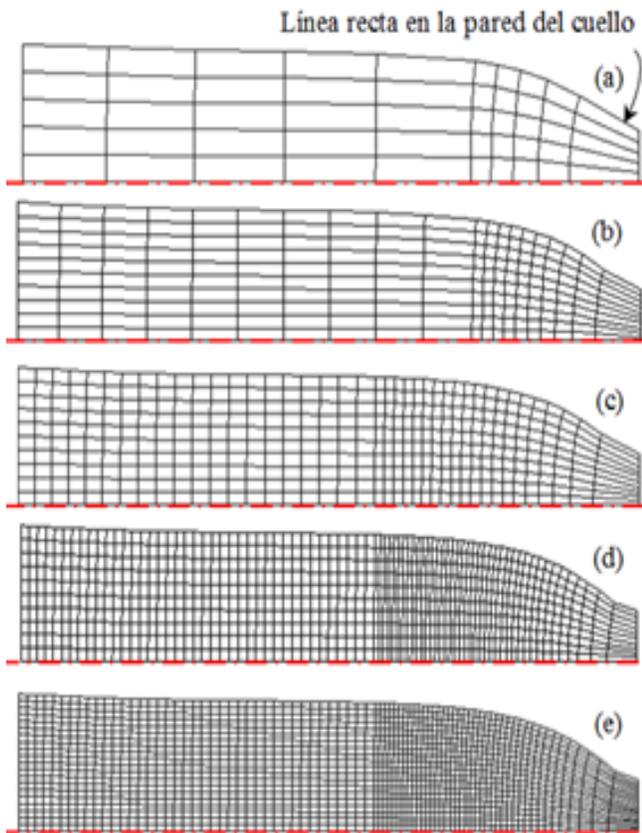


Figura 6. Efecto de la distribución de las celdas en las mallas: (a) 50 celdas, (b) 200 celdas, (c) 400 celdas, (d) 800 celdas y (e) 1600 celdas.

Las secciones del mallado donde se forma el cuello (ver Figura 6.a-e) son similares a las mallas obtenidas por Ponthot [10], y solamente para las tres primeras (ver Figura 6.a-c) por Simo [8, 9]. Otros investigadores también obtuvieron resultados similares con la celda alargada, con línea recta en la pared donde se forma el cuello, tal es el caso de Wriggers [14] quien simuló el dominio con una malla de 200 celdas, siendo el resultado similar a la Figura 6.b; Dvorkin [15] con malla de 50 y 200 celdas con resultados similares a la Figura 6.a-b; y Glaser [16] con malla de 200 celdas obteniendo distorsiones en las celdas donde se forma el cuello. Además, Voyiadjis [17] simuló el dominio con una sola zona con mallas de 50, 200, 400 y 800 celdas, respectivamente, siendo un caso particular, la cual es muy distinto a los dominios mallados que se muestran en la Figura 5.

En la Figura 7 el primer dominio mallado tiene una forma de “V” bien pronunciada, y a medida que se incrementan las celdas en las mallas el cuello tiende a curvarse por medio de líneas segmentadas; donde las líneas segmentadas están unidas por vértices. Se observa en el último dominio mallado, que a pesar que la malla tiene más celdas siempre está presente el cuello con forma

de “V”, aunque menos pronunciada con respecto a las otras mallas anteriores.

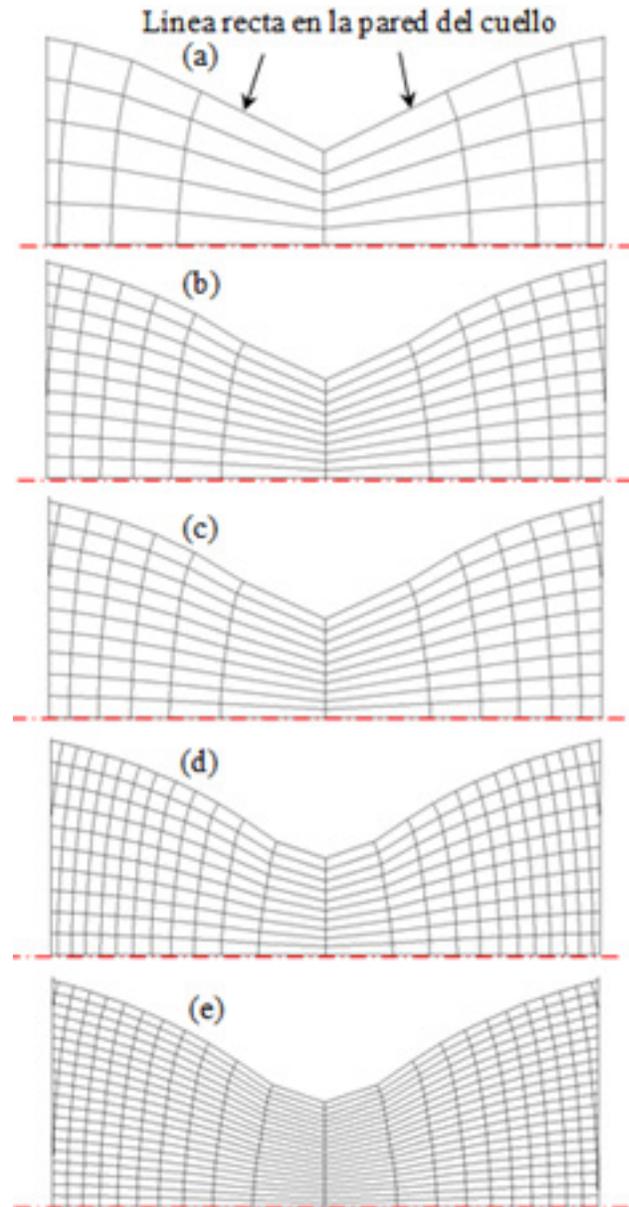


Figura 7. Secciones ampliadas de las estricciones reflejadas, correspondiente a la Figura 6.

Cabe señalar, que a medida que se le aplica una carga por tracción axial al dominio, éste se deforma plásticamente, dando inicio a la formación del radio de la curvatura del cuello, y las celdas tienden a estirarse en la dirección axial y a encogerse en la dirección radial producto del comportamiento mecánico del material y de un estado tridimensional de tensiones. Por tanto, las mallas deformadas quedan con mayor densidad de celdas hacia los extremos de la estricción. De los resultados de las mallas mostrados en la figura, no hay manera de medir la curvatura del cuello debido a que los bordes de las paredes

de las celdas deformadas son segmentos de líneas rectas, por lo tanto no se produce ninguna curvatura bien definida.

En estas condiciones de la curvatura segmentada del cuello, no es satisfactorio realizar comparaciones con las curvaturas del cuello de probetas cilíndricas ensayadas experimentalmente, ya que las mismas tienen curvaturas suaves en las secciones donde se produce la estricción. Para evitar este comportamiento anómalo de curvaturas compuestas por segmentos de líneas rectas, se debe considerar una aplicación de tecnología de mallado distinto a lo aplicado en los dominios de este primer caso. Cabe señalar, resultados similares de las curvaturas de los cuellos con segmentos de líneas rectas como la mostrada en la Figura 7, aunque con segmentos de menor longitud, han sido obtenidos para dominios computacionales para una probeta cilíndrica de aluminio HE30 [16, 17].

B) Segundo caso: evolución de la curvatura del cuello para un dominio mallado con 400 celdas

Los dominios mallados que se muestran en la Figura 8, en la zona 1, para la misma cantidad de 200 celdas se le ha aplicado una tecnología de mallado, la cual consiste en refinar con una relación de espacio no uniforme hacia el extremo derecho donde se va a producir la estricción, manteniendo la estructura de celdas cuadriláteras.

Se observa que al aplicar una relación de espacio no uniforme, los elementos se van agrupando hacia el extremo derecho formando una malla con mayor densidad de celdas en ese extremo, tal como se aprecia en la Figura 8.e. Cabe señalar, las celdas en las mallas no se ha incrementado, sólo que se ha aplicado una tecnología de mallado con relación de espacio, lo cual es distinto a las mallas presentadas en el primer caso.

El propósito de distribuir las celdas y que estas estén aglomeradas en la sección crítica, es para que cuando se le aplique la carga al dominio, las celdas de la malla donde se forma el cuello queden bien distribuidas, y así obtener en la pared del cuello una curvatura bien definida.

Cabe señalar que, el dominio mallado que se muestra en la Figura 8.a es el mismo dominio mallado que se muestra en la Figura 5.c, que tiene 200 celdas en la zona 1 y en la zona 2, para un total de 400 celdas, respectivamente. Recordando que, este mismo dominio mallado con 400 celdas, también ha sido estudiado por Simo [8, 9] y Ponthot [10].

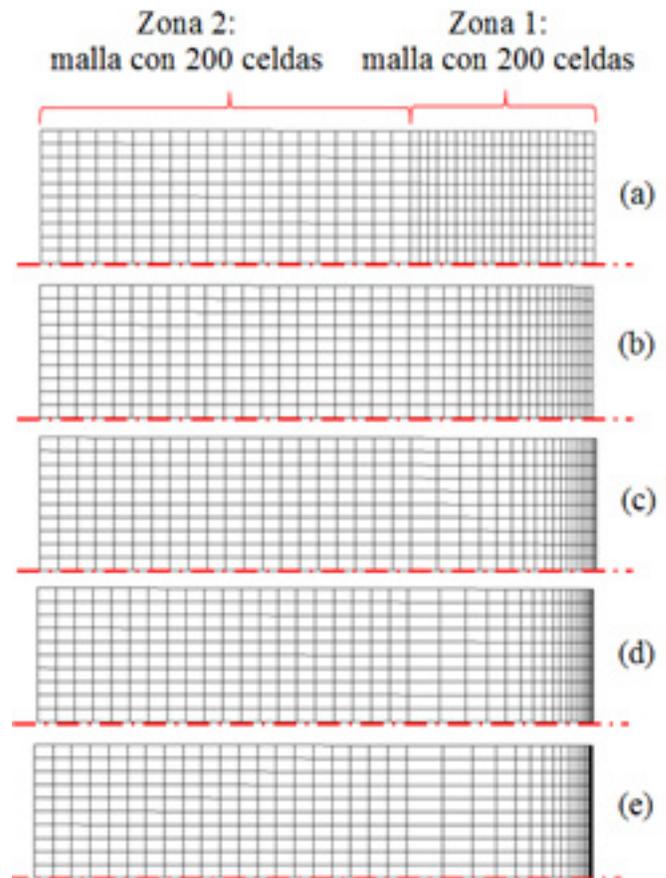


Figura 8. Distribución de las celdas con diferentes relaciones de espacio en la zona 1, para los cinco dominios mallados.

El efecto de la relación de espacio en la evolución de la curvatura en la pared del cuello se muestran en la Figura 9, luego de aplicar la carga por tracción axial para una elongación $\Delta L=7$ mm en un extremo de cada dominio, donde la malla del dominio de la Figura 9.e muestra una curvatura más definida que las mallas deformadas de los dominios anteriores.

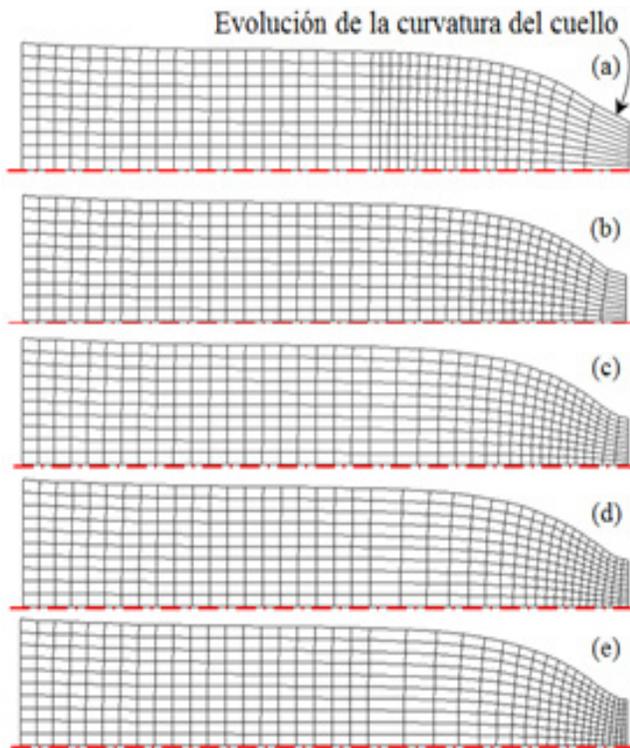


Figura 9. Efecto de la relación de espacio de las celdas distribuidas en la malla durante la evolución de la curvatura de la pared del cuello.

Las secciones ampliadas de las estricciones y reflejadas hacia la derecha se muestran en la Figura 10, y se observa la evolución de la curvatura de la pared del cuello. A medida que se incrementa la relación de espacio, los segmentos de las líneas rectas donde se forma el cuello se reducen progresivamente, dando lugar a que la curvatura de la pared sea cada vez más definida, como se muestra en la Figura 10.e, y esta curvatura es producto de la aplicación de la relación de espacio con celdas más aglomeradas donde se produce la estricción.

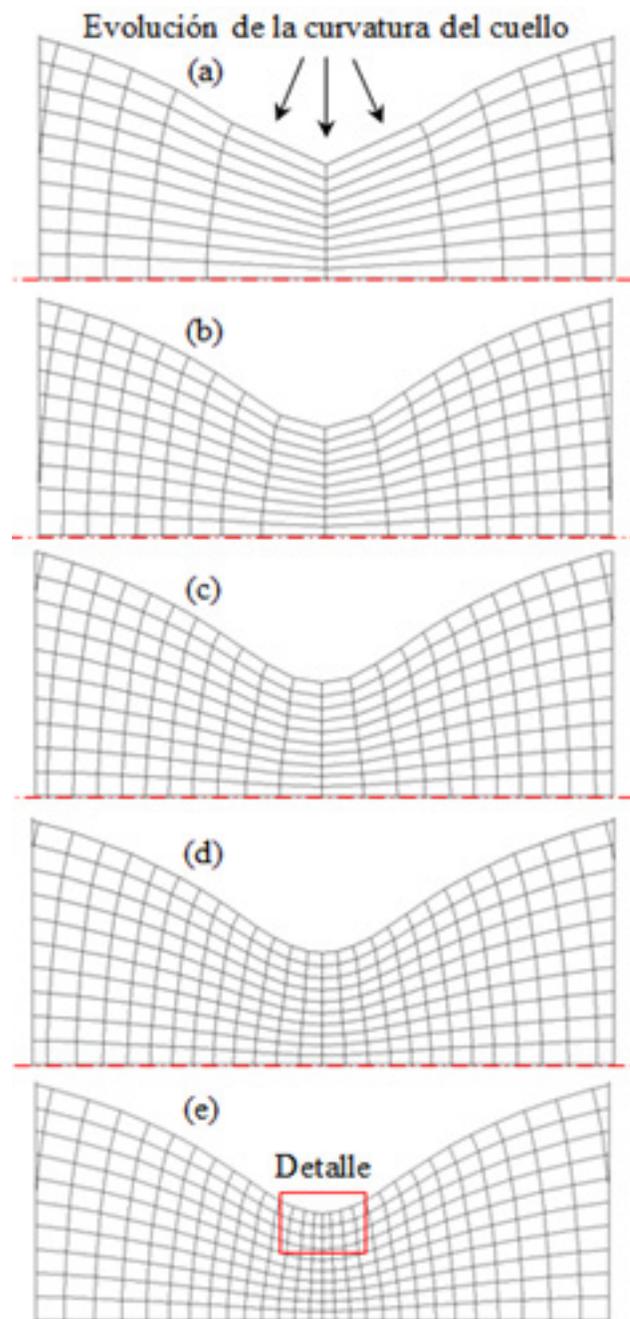


Figura 10. Secciones ampliadas de las estricciones reflejadas, correspondiente a la Figura 9.

La amplificación de la sección ampliada de la Figura 10.e se muestra la Figura 11, donde se observa que aún existen líneas segmentadas en la pared del cuello y en las direcciones radiales con respecto al eje del dominio. Se podría dar por aceptado que estas condiciones son aceptables en el caso de que no se requiera de una rigurosidad en las soluciones numéricas del dominio computacional deformado. Sin embargo, se considera que se debe incrementar la cantidad de celdas en la malla en la zona 1 para reducir los errores numéricos a la mínima

expresión, y así obtener una convergencia numérica que satisfaga con los resultados experimentales, cuando así se requiera.

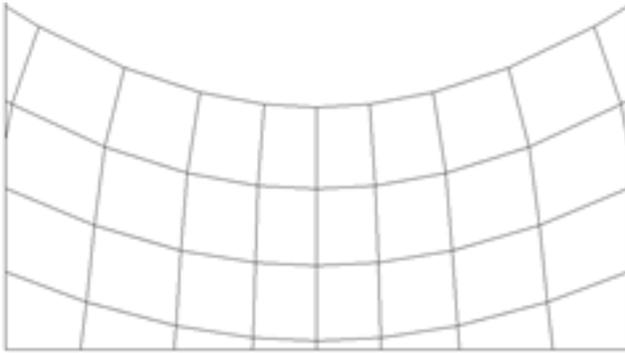


Figura 11. Detalle: curvatura del cuello que aún está compuesto por líneas rectas segmentadas.

C) Tercer caso: curvatura del cuello para un dominio mallaado con 2400 celdas

Para reducir los errores numéricos de la curvatura de la pared del cuello de las probetas deformadas por tracción axial, se refinan las mallas del dominio estudiado (ver Figura 8.e), donde la zona 1 se ha incrementado a 400 celdas y la zona 2 a 2000 celdas y manteniendo la misma relación de espacio. El dominio con malla refinada en su estado inicial y el mismo dominio deformado se muestra en la Figura 12.

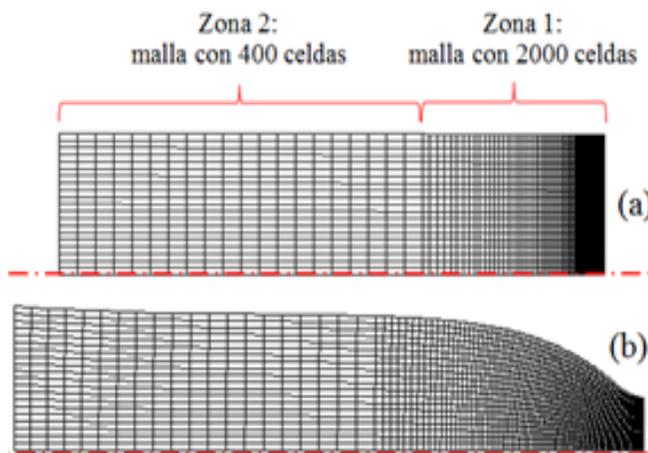


Figura 12. Dominio mallaado y refinado con mayor densidad de celdas en la zona 1 y en la zona 2.

Donde se forma el cuello, Figura 13, se observa la curvatura de la pared bien definida, el cual, es mucho mejor el resultado con respecto a las curvaturas que se muestran en la Figura 10.e y en la Figura 7.e, respectivamente.

Un detalle de la ampliación de la estricción se muestra en la Figura 14, donde se observa el trazo de un arco con el radio de la curvatura R_c [21] de forma simbólica sobre

la pared del cuello deformado, así como, otra sección del mismo se muestra en un detalle ampliado, donde se observa la curvatura bien definido en la región de la pared del cuello.

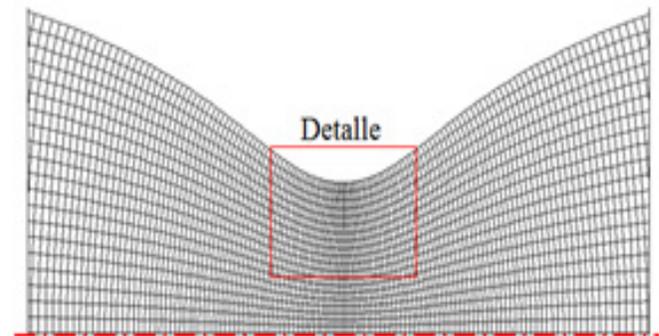


Figura 13. Sección ampliada y reflejada de la formación del cuello, correspondiente a la Figura 12.

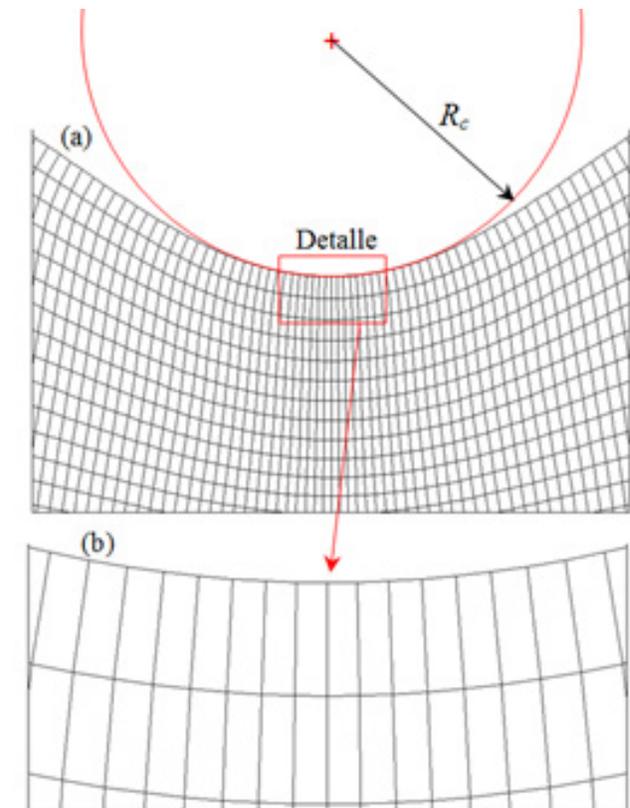


Figura 14. Detalle: (a) estricción ampliada con radio de curvatura del cuello, y (b) ampliación donde se muestra la curvatura del cuello bien definido.

Resultados similares a lo mostrado en la Figura 14 fue obtenido por Tolentino [19, 20], para la curvatura del cuello de una probeta de aluminio HE30. Cabe señalar, durante la deformación plástica en un dominio computacional, están sujetas a los tipos de materiales, ya que las mismas tienen sus respectivas ecuaciones constitutivas.

2.3.2 Deformación radial y axial, y concentración de esfuerzos de Von Mises

En esta sección, todas las soluciones numéricas corresponden para el dominio mallado con 2400 celdas que se presenta en la Figura 12.

A) Deformación radial y axial

La deformación plástica del dominio computacional de la probeta de acero A-533 Grado B Clase 1 se muestra en la Figura 15. Cabe señalar, por defecto, en el código ANSYS se ha establecido en el eje x como la dirección radial r. Se muestran en la figura, el desplazamiento de la deformación plástica en la dirección radial r, en la dirección axial y, y en el plano ry. Las magnitudes de las distribuciones de la deformación se muestran en las barras de colores, donde el color rojo es de mayor magnitud y el azul de menor magnitud, siendo las unidades en milímetros.

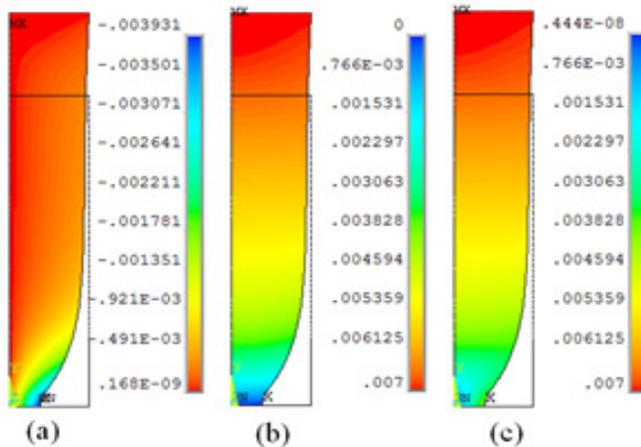


Figura 15. Dominio deformado para la carga axial aplicada $\Delta L=7$ mm: (a) deformación en la dirección del radio r, (b) deformación en la dirección del eje y, y (c) deformación en ry.

El comportamiento de la trayectoria de la curva de la disminución del radio en la estricción a medida que se aplica la carga se muestra en la Figura 16, donde inicialmente, para $y=0$ mm se tiene el radio $R=6.35$ mm y al final de la carga aplicada se tiene un radio mínimo de $R=2.4189$ mm. Se observa que a medida que se le aplica la carga por tracción axial hasta la elongación $\Delta L=2.8$ mm el radio disminuye lentamente, luego de este valor disminuye con mayor intensidad.

Al comparar los resultados numéricos de la relación de radio contra la relación de longitud (Figura 17) para los dominios mallados y deformados con 50, 200, 400, 800, 1600 y 2400 celdas, se observa que todas las curvas quedan superpuestas, lo que indica que los radios mínimos obtenidos son coincidentes, a pesar de que la cantidad de celdas en la malla son distintos para

cada dominio y de no tener una curvatura definida en la pared del cuello, tal como se muestran en la Figura 7 para las secciones de los cuellos mostrados para los dominios con mallas de 50, 200, 400, 800, 1600 celdas, y para el dominio mallado con 400 celdas la cual se muestra en la Figura 10, excluyendo el dominio mallado con 2400 celdas (Figura 13) la cual tiene una curvatura en la pared del cuello bien definido, con respecto a los otros dominios simulados numéricamente.

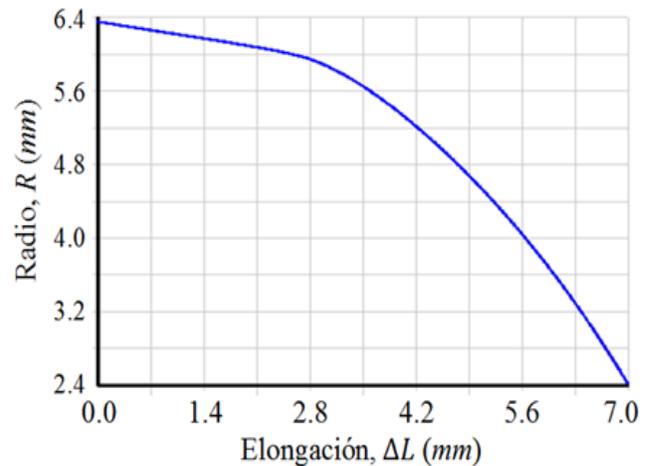


Figura 16. Perfil de Radio-Elongación.

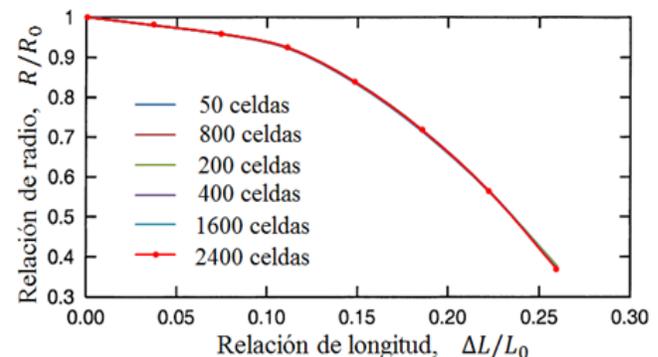


Figura 17. Perfiles de Relación de radio-Relación de longitud.

El perfil mostrado en la Figura 17, para el dominio mallado con 2400 celdas, e identificado ahora como ANSYS, se compara con los datos experimentales [2], tal como se muestra en la Figura 18.

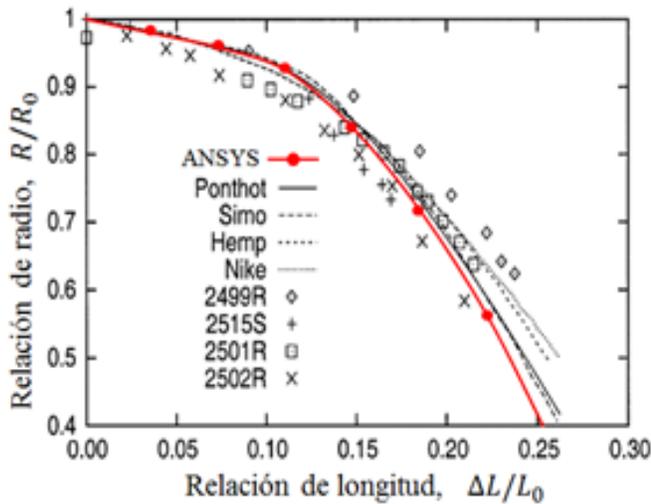


Figura 18. Perfil de la curva numérica ANSYS comparada con datos experimentales [2].

En la misma figura, existen otras curvas numéricas [3, 7, 8-10], y se observa que la curva numérica ANSYS se encuentra dentro de los datos experimentales [2], el cual, sigue una trayectoria adyacente a la del experimento 2499R hasta cierto tramo, luego se desvía, se intercepta y sigue adyacente a la trayectoria 2501R, por lo tanto, se correlaciona. Además, queda superpuesta sobre las curvas numéricas de Simo [8, 9] y Ponthot [10], con una ligera separación antes de llegar al final de su recorrido. Mientras que, las otras curvas, de Giroux [3] identificado como Hemp y de Hallquist [7] por Nike, quedan alejados de la curva ANSYS, excepto para para ciertos tramos muy corto donde se interceptan entre todas la curvas.

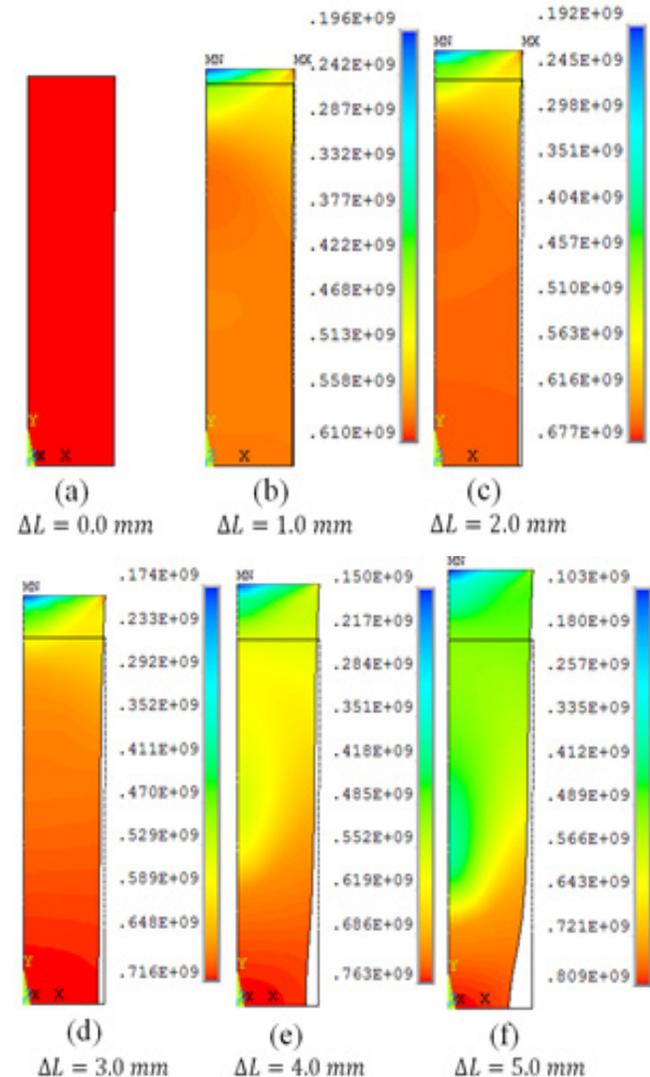
B) Concentración de esfuerzos de Von Mises

Inicialmente, tal como se muestra en la Figura 19, cuando no se aplica la carga el esfuerzo es igual en todo el dominio, y cuando se aplica la carga en un extremo del dominio de la probeta en la dirección axial, para cada incremento $\Delta L=1.0$ mm hasta llegar a $\Delta L=7.0$ mm, la concentración de esfuerzos Von Mises se incrementa progresivamente en ciertas regiones del dominio, siendo mayor la magnitud en el centro que en las paredes donde se produce la curvatura del cuello, así como las regiones alejadas del cuello, por tanto el estado tensional homogéneo pasa a ser un estado triaxial de tensiones. A partir de $\Delta L=4.0$ mm, la formación del cuello es más notable, y en referencia al eje y, se inicia la formación de un núcleo de concentración de esfuerzos de menor magnitud en un extremo donde se tiene el radio mínimo. Para la carga final aplicada de $\Delta L=7.0$ mm, se observa el núcleo de concentración de esfuerzos de Von Mises

con mayor magnitud donde se tiene el radio mínimo, y en el extremo del radio mínimo otro núcleo de concentración de esfuerzos de Von Mises de menor magnitud.

La deformación en 3D de la probeta para cada incremento $\Delta L=1.0$ mm desde $\Delta L=0$ mm hasta llegar a $\Delta L=7.0$ mm se muestran en la Figura 20. Se observa la distribución de los esfuerzos de Von Mises en la pared, donde el esfuerzo con mayor magnitud se tiene donde se forma el cuello, y de menor magnitud en sus alrededores.

Además, se ha incrementado la imagen para su mejor apreciación, donde el detalle 2D de la estricción (ver Figura 21) muestra en el centro un núcleo de concentración de esfuerzos de Von Mises con mayor magnitud con respecto a sus regiones adyacentes. Y, el detalle 3D (ver Figura 22) muestra en la superficie de la pared del cuello la distribución de concentración de esfuerzos de Von Mises, respectivamente.



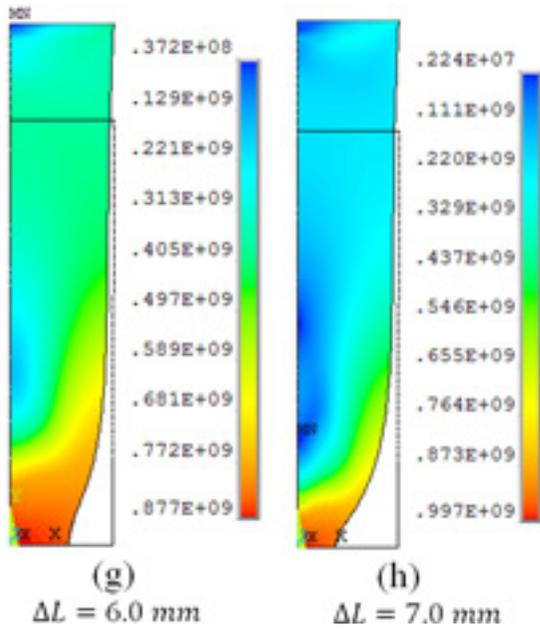


Figura 19. Dominio 2D. Esfuerzos de Von Mises en el plano, para cada desplazamiento desde $\Delta L=0.0-7.0$ mm.

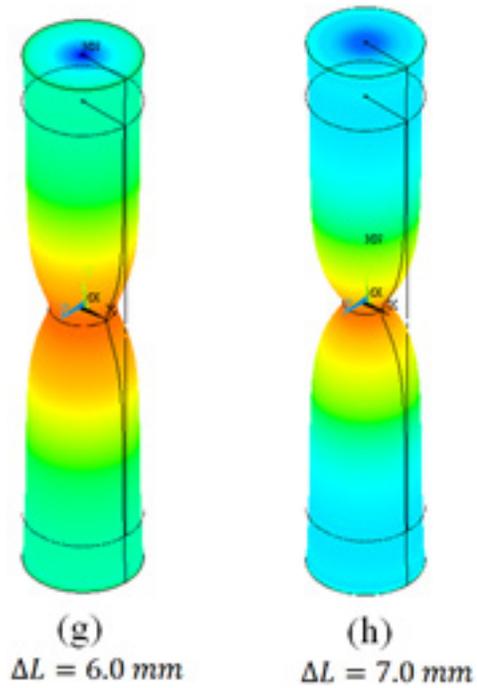


Figura 20. Dominio 3D. Esfuerzos de Von Mises, para

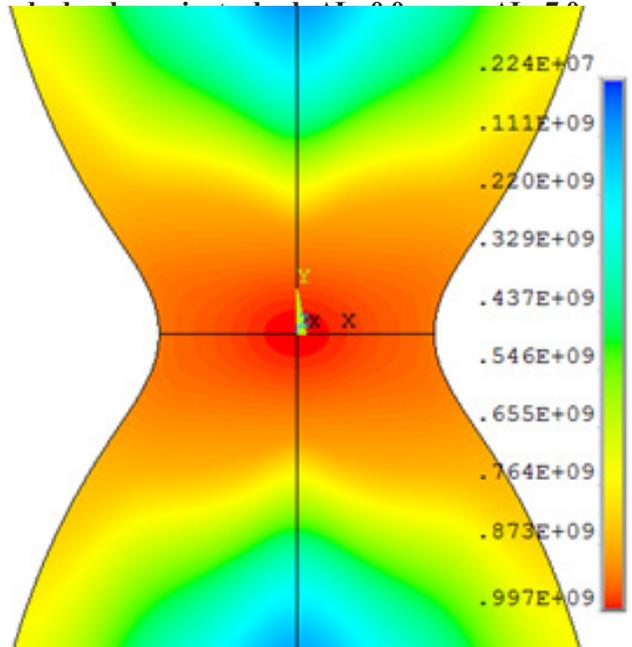
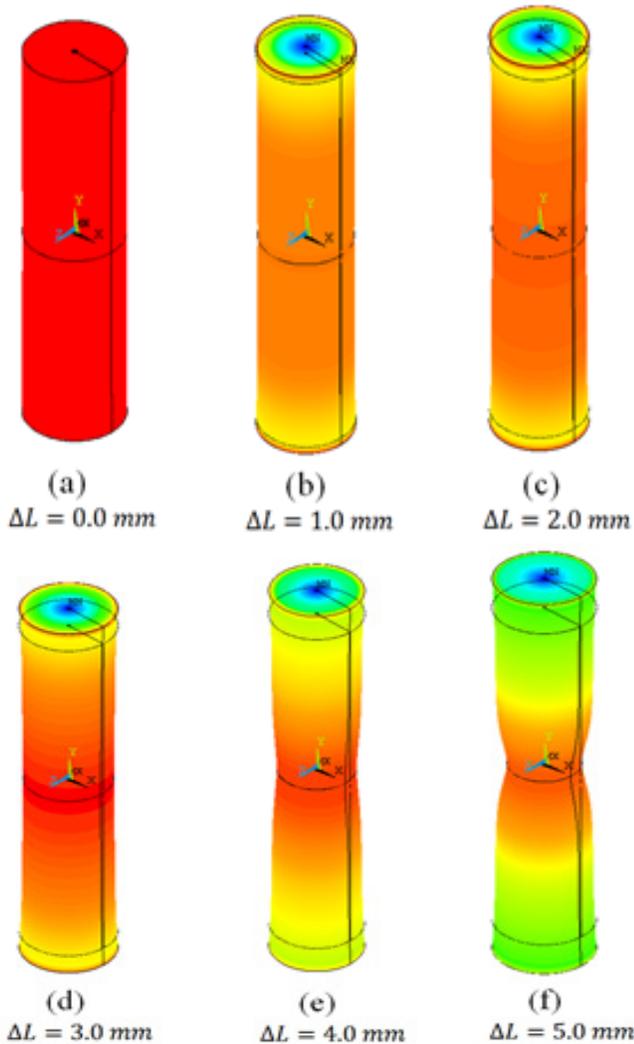


Figura 21. Detalle 2D de la estricción. Distribución de concentración de esfuerzos de Von Mises, para $\Delta L=7.0$ mm.

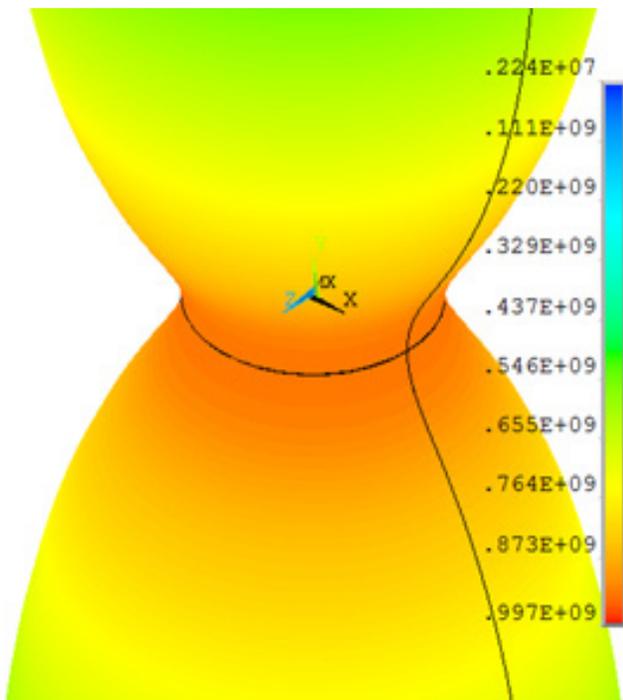


Figura 22. Detalle 3D de la estricción. Distribución en la pared de concentración de esfuerzos de Von Mises, para $\Delta L=7.0$ mm.

El incremento de la concentración de esfuerzos promedio de Von Mises evaluada con la ecuación no lineal de la ley de endurecimiento isótropo de Voce [18] se muestra en la Figura 23. Donde los resultados de las trayectorias de los perfiles del esfuerzo promedio fueron obtenidos para los puntos locales, en el núcleo ($R=0; y=0$) y en la pared ($R=2,4189$ mm; $y=0$), donde se observa cómo aumenta el esfuerzo promedio hasta un valor máximo a medida que se incrementa la carga aplicada para el rango de $\Delta L=0.0-7.0$ mm.

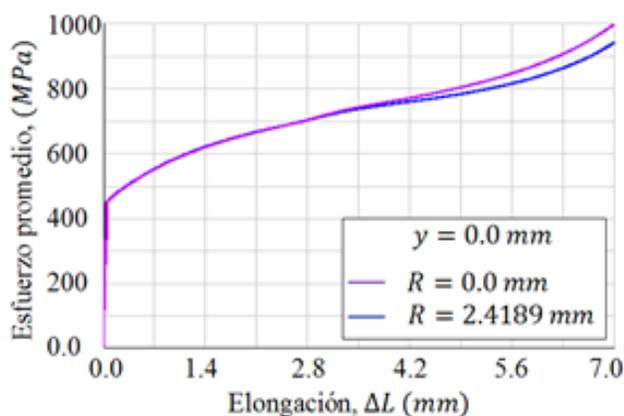


Figura 23. Perfiles de Esfuerzo promedio-Elongación.

III. CONCLUSIONES

La tecnología de mallado con celdas cuadriláteras y con relación de espacio aplicado al dominio mallado con 2400 celdas, la cual está mostrada en la Figura 13, elimina la imperfección de la curvatura compuesta por segmentos de líneas rectas en la pared del cuello.

La curva numérica identificada como “ANSYS” y obtenida con el código ANSYS se correlaciona con los datos experimentales de Norris, así como, con las curvas numéricas de Simo y Ponthot obtenidas con diferentes códigos computacionales.

Para la carga aplicada $\Delta L=7.0$ mm, la magnitud de mayor concentración de esfuerzos de Von Mises se produce en el centro donde se produce la estricción, formando un núcleo, en dirección del radio mínimo.

IV. REFERENCIAS

- [1]Hosford W., “Mechanic Behavior of Materials”, Second Edition, Cambride University Press, 2010, p. 419.
- [2]Norris D.M., Moran B., Scudder J.K., Quiñones D.F., “A Computer Simulation of the Tension Test”, Journal of Mechanics Physics and Solids. Tomo 26, 1978, pp. 1-19.
- [3]Giroux E.D., “HEMP Users’ Manual”, Report UCRL-51079, Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore, Calif., 1973.
- [4]Balderrama J. J., Iorio A., “Análisis de la Variación de las Propiedades Mecánicas del Acero ASTM A533 Tipo B Clase 1 (JRQ) de Uso en Recipientes de Presión de Centrales Nucleares”, Jornadas SAM 2000 - IV Coloquio Latinoamericano de Fractura y Fatiga. 2000, pp. 543-549.
- [5]Gómez F. J., Elices M., Valiente A., “Aplicación del Modelo Cohesivo al Estudio de la Fractura de un Acero A533 Irradiado”, Anales de Mecánica de la Fractura. Vol.19, 2002, pp. 531-536.
- [6]Investigación técnica acero “Tenacidad de un Acero para Recipientes a Presión (A 533 B C.1) en la Zona de Transición Dúctil-frágil. Predicción del Límite de Propagación Estable de la Grieta”. Informe EUR. Dirección General, Ciencia Investigación y Desarrollo. Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europea. Luxemburgo. ISBN 92-826-7371-5, 1994.
- [7]Hallquist O., “An implicit, Finite Deformation, Finite Element Code for Analyzing the Static and Dynamic Response of Two Dimensional Solids”, Lawrence Livermore National Laboratory, Report UCRL-52678, 1979, p. 104.
- [8]Simo J.C., “A Framework for Finite Strain

Elastoplasticity Based on Maximum Plastic Dissipation and the Multiplicative Decomposition. Part II: Computational Aspects”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 68, 1988, pp. 1-31.

[9]Simo J., Hughes T. J., “Computational Inelasticity”, New York: Springer-Verlag, 1998, pp. 326-336.

[10]Ponhot J.P., “Unified Stress Update Algorithms for the Numerical Simulation of Large Deformation Elasto-plastic and Elasto-viscoplastic Processes”, *International Journal of Plasticity* 18, 2002, pp. 91-126.

[11]Elguedj T., Hughes T.J., “Isogeometric Analysis of Nearly Incompressible Strain Plasticity”, ICES REPORT 11-35, The Institute for Computational Engineering and Sciences, The University of Texas at Austin, November, 2011, pp. 1-27.

[12]Wriggers P., Simo J.C., “A General Procedure for the Direct Computation of Turning and Bifurcation Points”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol 30, 1990, pp. 155-176.

[13]Dvorkin E.N., Pantuso D., Repetto E.A., “A Finite Element Formulation for Finite Strain Elasto-plastic Analysis Based on Mixed Interpolation of Tensorial Components”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 114, 1994, pp. 35-54.

[14]Glaser S., Armero F., “On the Formulation of Enhanced Strain Finite Elements in Finite Deformations”, *Engineering Computations*, Vol 14, No 7, 1997, pp. 759-791.

[15]Voyiadjis G.Z., Abu R.K., Palazotto A.N., “On the Small and Finite Deformation Thermo-elasto-viscoplasticity Theory for Strain Localization Problems: Algorithmic and Computational Aspects”, *European Journal of Computational Mechanics*, Vol. 15, no 7-8, 2006, pp. 945-987.

[16]García C., Gabaldón F., Goicolea J., “Finite Element Simulation of the Simple Tension Test in Metals”, *Finite Elements in Analysis and Design* 42, 2006, pp. 1187-1197.

[17]Careglio C., García C., Mirasso A., “Comparación de Distribuciones de Tensiones en Probetas con Estricción”, *AMCA, Mecánica Computacional*, Vol. XXX, 2011, pp. 631-649.

[18] Voce E., “A Practical Strain Hardening Function”, *Metallurgical*, 1955, 51, pp. 219-226.

[19]Tolentino S.L., “Simulación Numérica de la Deformación Plástica por Tracción Axial de una Probeta de Aluminio HE30”, *Puerto Ordaz, Venezuela, XIV Jornadas de Investigación UNEXPO 2016 Mecánica*, mayo, 2016, pp. 7.

[20]Tolentino S.L., “Estudio Comparativo de Tres Dominios Computacionales con Simetría Axial de una Probeta de Aluminio”, *Puerto Ordaz, Venezuela, XVI Jornadas de Investigación UNEXPO 2018 Mecánica*, mayo, 2018, pp. 15-22.

[21]Bridgman P., “Studies in Large Plastic Flow and Fracture”, Harvard University Press, Cambridge, MA, 1964, p. 16.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento a Jehová, mi Dios todopoderoso, mi fuente de sabiduría e inspiración.

Al Grupo de Modelamiento Matemático y Simulación Numérica (GMMNS, Group of Mathematical Modeling and Numerical Simulation) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Lima, Perú.