



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL  
PROCESO DE TREFILACIÓN DE  
ALAMBRES DE ACERO  
INCORPORANDO EL EFECTO DEL  
DAÑO PARA LA PREDICCIÓN DE  
FRACTURA.**

**IGNACIO ALEJANDRO ESCOBAR AHUMADA**

Tesis para optar al grado de  
Magíster en Ciencias de Ingeniería

Profesor Supervisor: Diego Javier Celentano

Santiago de Chile, Octubre, 2012

© 2012, Ignacio Escobar Ahumada





PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA

---

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL  
PROCESO DE TREFILACIÓN DE  
ALAMBRES DE ACERO  
INCORPORANDO EL EFECTO DEL  
DAÑO PARA LA PREDICCIÓN DE  
FRACTURA.**

**IGNACIO ALEJANDRO ESCOBAR AHUMADA**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**DIEGO JAVIER CELENTANO**

**JULIO VERGARA**

**MARCELA CRUCHAGA**

**JOSÉ LUIS ALMAZAN**

Para completar las exigencias del grado de  
Magíster en Ciencias de Ingeniería

Santiago de Chile, Octubre, 2012

(A todas aquellas personas que durante este periodo me han acompañado y apoyado.)

## **AGRADECIMIENTOS**

Al finalizar el trabajo de esta tesis tengo que agradecer el apoyo de muchas personas que me han ayudado durante este proceso.

Al profesor Diego Celentano, por la buena disposición y el apoyo entregado a lo largo del desarrollo de mi tesis. Gracias por el tiempo y los conocimientos entregados.

A mi madre y padre por la oportunidad de estudiar esta carrera y darle cierre con el desarrollo de este trabajo. Gracias por el apoyo y el cariño entregado durante todo este tiempo.

A Fernanda por su comprensión y constante apoyo en todas y cada una de las etapas vividas. Gracias por estar siempre para ayudar con un consejo y por el cariño entregado.

A las personas de Arcadis Chile por permitirme trabajar y desarrollar al mismo tiempo esta tesis.

Gracias a mi seres queridos, hermana y amigos por los gratos momentos vividos, que fueron necesarios para distraer la mente.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>vi</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>vii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xv</b>
<b>1 Introducción</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivación y justificación.....	1
1.2 Descripción del proceso de trefilado.....	2
1.3 Chevrones.....	6
1.4 Objetivos y resultados esperados .....	8
<b>2 Antecedentes</b> .....	<b>9</b>
2.1 Descripción analítica del proceso de trefilado .....	9
2.2 Modelación elastoplástica .....	12
2.3 Modelación elastoplástica con daño.....	18
2.3.1 Índice de daño .....	18
2.3.2 Modelación tipo Gurson.....	23
2.3.3 Modelación tipo Lemaitre .....	31
<b>3 Modelo mecánico con daño</b> .....	<b>40</b>
3.1 Ecuaciones de balance.....	40
3.2 Modelo constitutivo .....	41
3.3 Modelo mecánico de contacto y fricción .....	43
<b>4 Simulación del proceso de trefilado</b> .....	<b>48</b>

4.1	Casos estudiados .....	48
4.2	Validación experimental de la fuerza de trefilado .....	51
4.3	Análisis de deformaciones, tensiones y daño.....	54
4.3.1	Reducción 21% .....	55
4.3.1.1	Configuración 1.....	55
4.3.1.2	Configuración 2.....	65
4.3.1.3	Configuración 3.....	76
4.3.1.4	Configuración 4.....	87
4.3.1.5	Configuración 5.....	98
4.3.1.6	Análisis de daño residual .....	107
4.3.2	Reducción 31% .....	114
4.3.2.1	Configuración 1.....	114
4.3.2.2	Configuración 2.....	124
4.3.2.3	Configuración 3.....	135
4.3.2.4	Configuración 4.....	146
4.3.2.5	Configuración 5.....	157
4.3.2.6	Análisis de daño residual .....	168
<b>5</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>175</b>
<b>6</b>	<b>Líneas futuras de investigación.....</b>	<b>179</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>180</b>
	<b>A N E X O S .....</b>	<b>182</b>
	<b>Anexo A: Ensayo de tracción uniaxial .....</b>	<b>183</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Fuerza de Trefilado [6] .....	17
Tabla 2-2: Comparación criterios de daño [8] .....	22

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Esquema de proceso de trefilado.....	2
Figura 1-2: <i>Draw Bench</i> .....	3
Figura 1-3: <i>Drawing Bull Block</i> .....	4
Figura 1-4: Configuración en tándem .....	4
Figura 1-5: Esquema de dado de trefilado .....	5
Figura 1-6: Corte transversal alambre con chevrones.....	6
Figura 1-7: Campo de velocidad .....	7
Figura 1-8: Diagrama límite de trefilado para la predicción de estallido central en alambre de aluminio[3] .....	7
Figura 2-1: Trozo diferencial de material [4].....	11
Figura 2-2: Efecto de la reducción en curva tensión-deformación [5].....	14
Figura 2-3: Geometría del dado [6].....	17
Figura 2-4: Configuraciones de inclusiones [7].....	19
Figura 2-5: Zona de seguridad para inclusión cilíndrica no centrada [7] .....	20
Figura 2-6: Zona de seguridad para inclusión cilíndrica centrada [7] .....	20
Figura 2-7: Zona de seguridad para inclusión elíptica centrada [7].....	20
Figura 2-8: Determinación $Ci$ : (a) Freudenthal (b) Crockcroft y Latham (c) Brozzo (d) Oyane [8].....	22
Figura 2-9: Método de separación de elementos [9].....	25
Figura 2-10: Mallado durante el proceso de trefilado [9] .....	26
Figura 2-11: (a) Mallado de dado y alambre. (b) Mallado de dado trefilado [10].....	29
Figura 2-12: Distribución de tensiones [10].....	29
Figura 2-13: Daño acumulado [10].....	30
Figura 2-14: Fuerza-desplazamiento <i>deep drawing</i> (a) lámina cuadrada (b) lámina circular [11].....	33
Figura 2-15: Predicción de falla en proceso <i>deep drawing</i> [11] .....	34

Figura 2-16: (a) Mallado. (b) Primera configuración. (c) Segunda configuración [12] ..	37
Figura 2-17: Deformación plástica acumulada [12].....	38
Figura 2-18: Deformación plástica y mapa de daño [12].....	39
Figura 3-1: Descripción geométrica del contacto .....	44
Figura 4-1: Mallado de alambre y dado .....	49
Figura 4-2: Fuerza de trefilado con primer criterio de evolución de daño en reducción de 21%.....	52
Figura 4-3: Fuerza de trefilado con segundo criterio de evolución de daño en reducción de 21% .....	52
Figura 4-4: Fuerza de trefilado con primer criterio de evolución de daño en reducción de 31%.....	53
Figura 4-5: Fuerza de trefilado con segundo criterio de evolución de daño en reducción de 31% .....	54
Figura 4-6: Imagen de cortes radiales en el alambre.....	54
Figura 4-7: Presión hidrostática configuración 1 reducción 21% .....	56
Figura 4-8: Distribución de la presión hidrostática configuración 1 reducción 21% .....	57
Figura 4-9: Deformación plástica configuración 1 reducción 21% .....	58
Figura 4-10: Distribución de la deformación plástica configuración 1 reducción 21% ..	59
Figura 4-11: Tensión de von Mises configuración 1 reducción 21% .....	60
Figura 4-12: Distribución de la Tensión de von Mises configuración 1 reducción 21% ..	61
Figura 4-13: Daño con primer criterio de evolución configuración 1 reducción 21% ....	62
Figura 4-14: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 1 reducción 21% .....	62
Figura 4-15: Daño con segundo criterio de evolución configuración 1 reducción 21% ..	63
Figura 4-16: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 1 reducción 21% .....	64
Figura 4-17: Presión hidrostática configuración 2 reducción 21% .....	65
Figura 4-18: Distribución de la presión hidrostática configuración 2 reducción 21% ....	67
Figura 4-19: Deformación plástica configuración 2 reducción 21% .....	68

Figura 4-20: Distribución de la deformación plástica configuración 2 reducción 21% ..	69
Figura 4-21: Tensión de von Mises configuración 2 reducción 21% .....	70
Figura 4-22: Distribución de la tensión de von Mises configuración 2 reducción 21% ..	71
Figura 4-23: Daño con primer criterio de evolución configuración 2 reducción 21% ....	73
Figura 4-24: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 2 reducción 21% .....	73
Figura 4-25: Daño con segundo criterio de evolución configuración 2 reducción 21% ..	74
Figura 4-26: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 2 reducción 21% .....	75
Figura 4-27: Presión hidrostática configuración 3 reducción 21% .....	76
Figura 4-28: Distribución de la presión hidrostática configuración 3 reducción 21% ....	77
Figura 4-29: Deformación plástica configuración 3 reducción 21% .....	78
Figura 4-30: Distribución de la deformación plástica configuración 3 reducción 21% ..	79
Figura 4-31: Tensión de von Mises configuración 3 reducción 21% .....	80
Figura 4-32: Distribución de la tensión de von Mises configuración 3 reducción 21% ..	81
Figura 4-33: Daño con primer criterio de evolución configuración 3 reducción 21% ....	83
Figura 4-34: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 3 reducción 21% .....	84
Figura 4-35: Daño con segundo criterio de evolución configuración 3 reducción 21% ..	85
Figura 4-36: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 3 reducción 21% .....	86
Figura 4-37: Presión hidrostática configuración 4 reducción 21% .....	88
Figura 4-38: Distribución de la presión hidrostática configuración 4 reducción 21% ....	89
Figura 4-39: Deformación plástica configuración 4 reducción 21% .....	89
Figura 4-40: Distribución de la deformación plástica configuración 4 reducción 21% ..	90
Figura 4-41: Tensión de von Mises configuración 4 reducción 21% .....	91
Figura 4-42: Distribución de la tensión de von Mises configuración 4 reducción 21% ..	92
Figura 4-43: Daño con primer criterio de evolución configuración 4 reducción 21% ....	93

Figura 4-44: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 4 reducción 21% .....	94
Figura 4-45: Daño con segundo criterio de evolución configuración 4 reducción 21% ..	96
Figura 4-46: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 4 reducción 21% .....	97
Figura 4-47: Presión hidrostática configuración 5 reducción 21% .....	98
Figura 4-48: Distribución de la presión hidrostática configuración 5 reducción 21% ....	99
Figura 4-49: Deformación plástica configuración 5 reducción 21% .....	100
Figura 4-50: Distribución de la deformación plástica configuración 5 reducción 21%	101
Figura 4-51: Tensión de von Mises configuración 5 reducción 21% .....	102
Figura 4-52: Distribución de la tensión de von Mises configuración 5 reducción 21%	103
Figura 4-53: Daño con primer criterio de evolución configuración 5 reducción 21% ..	104
Figura 4-54: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 5 reducción 21% .....	105
Figura 4-55: Daño con segundo criterio de evolución configuración 5 reducción 21%	106
Figura 4-56: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 5 reducción 21% .....	107
Figura 4-57: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 1 reducción 21% .....	108
Figura 4-58: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 2 reducción 21% .....	109
Figura 4-59: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 3 reducción 21% .....	110
Figura 4-60: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 4 reducción 21% .....	111
Figura 4-61: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 5 reducción 21% .....	113
Figura 4-62: Presión hidrostática configuración 1 reducción 31% .....	114
Figura 4-63: Distribución de la presión hidrostática configuración 1 reducción 31% ..	115

Figura 4-64: Deformación plástica configuración 1 reducción 31% .....	116
Figura 4-65: Distribución de la deformación plástica configuración 1 reducción 31% .....	117
Figura 4-66: Tensión de von Mises configuración 1 reducción 31% .....	118
Figura 4-67: Distribución de la tensión de von Mises configuración 1 reducción 31% .....	120
Figura 4-68: Daño con primer criterio de evolución configuración 1 reducción 31% ..	121
Figura 4-69: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 1 reducción 31% .....	122
Figura 4-70: Daño con segundo criterio de evolución configuración 1 reducción 31%	123
Figura 4-71: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 1 reducción 31% .....	124
Figura 4-72: Presión hidrostática configuración 2 reducción 31% .....	125
Figura 4-73: Distribución de la presión hidrostática configuración 2 reducción 31% ..	126
Figura 4-74: Deformación plástica configuración 2 reducción 31% .....	127
Figura 4-75: Distribución de la deformación plástica configuración 2 reducción 31%	128
Figura 4-76: Tensión de von Mises configuración 2 reducción 31% .....	129
Figura 4-77: Distribución de la tensión de von Mises configuración 2 reducción 31%	130
Figura 4-78: Daño con primer criterio de evolución configuración 2 reducción 31% ..	131
Figura 4-79: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 2 reducción 31% .....	133
Figura 4-80: Daño con segundo criterio de evolución configuración 2 reducción 31%	134
Figura 4-81: Distribución de daño con segundo criterio de evolución configuración 2 reducción 31% .....	135
Figura 4-82: Presión hidrostática configuración 3 reducción 31% .....	136
Figura 4-83: Distribución de la presión hidrostática configuración 3 reducción 31% ..	137
Figura 4-84: Deformación plástica configuración 3 reducción 31% .....	138
Figura 4-85: Distribución de la deformación plástica configuración 3 reducción 31%	139
Figura 4-86: Tensión de von Mises configuración 3 reducción 31% .....	140
Figura 4-87: Distribución de la tensión de von Mises configuración 3 reducción 31%	141
Figura 4-88: Daño con primer criterio de evolución configuración 3 reducción 31% ..	142

Figura 4-89: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 3 reducción 31% .....	143
Figura 4-90: Daño con segundo criterio de evolución configuración 3 reducción 31%	145
Figura 4-91: Distribución con segundo criterio de evolución configuración 3 reducción 31% .....	146
Figura 4-92: Presión hidrostática configuración 4 reducción 31% .....	147
Figura 4-93: Distribución de la presión hidrostática configuración 4 reducción 31% ..	148
Figura 4-94: Deformación plástica configuración 4 reducción 31% .....	149
Figura 4-95: Distribución de la deformación plástica configuración 4 reducción 31%	150
Figura 4-96: Tensión de von Mises configuración 4 reducción 31% .....	151
Figura 4-97: Distribución de la tensión de von Mises configuración 4 reducción 31%	152
Figura 4-98: Daño con primer criterio de evolución configuración 4 reducción 31% ..	153
Figura 4-99: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 4 reducción 31% .....	155
Figura 4-100: Daño con segundo criterio de evolución configuración 4 reducción 31% .....	156
Figura 4-101: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 4 reducción 31% .....	156
Figura 4-102: Presión hidrostática configuración 5 reducción 31% .....	158
Figura 4-103: Distribución de la presión hidrostática configuración 5 reducción 31%	159
Figura 4-104: Deformación plástica configuración 5 reducción 31% .....	160
Figura 4-105: Distribución de la deformación plástica configuración 5 reducción 31% .....	161
Figura 4-106: Tensión de von Mises configuración 5 reducción 31% .....	162
Figura 4-107: Distribución de la tensión de von Mises configuración 5 reducción 31% .....	163
Figura 4-108: Daño con primer criterio de evolución configuración 5 reducción 31%	164
Figura 4-109: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 5 reducción 31% .....	165

Figura 4-110: Daño con segundo criterio de evolución configuración 5 reducción 31%	166
Figura 4-111: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 5 reducción 31%	167
Figura 4-112: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 1 reducción 31%	169
Figura 4-113: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 2 reducción 31%	170
Figura 4-114: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 3 reducción 31%	171
Figura 4-115: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 4 reducción 31%	172
Figura 4-116: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 5 reducción 31%	173

## RESÚMEN

En esta tesis se realiza la simulación computacional del proceso de trefilado en alambres con el objetivo de analizar el comportamiento del material e identificar los factores que influyen en la formación y evolución del daño como identificador de falla por el defecto denominado chevron o estallido central.

Para la simulación numérica se utiliza un modelo mecánico elastoplástico que incorpora la variable de daño, la cual se mide en base a la degradación del módulo elástico del material. Para esta variable se proponen dos criterios de evolución, los cuales se definen dentro del contexto de la teoría de la plasticidad asociada. El primer criterio de evolución se supone independiente del valor de la presión hidrostática, mientras que el segundo criterio considera la evolución del daño solamente ante la presencia de presiones positivas.

Los casos simulados corresponden a un proceso de trefilado de un paso, utilizando cinco semi ángulos diferentes de aproximación del dado ( $7^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $21^\circ$ ,  $28^\circ$  y  $35^\circ$ ) y dos reducciones de sección (21% y 31%). Estas configuraciones han sido previamente analizadas tanto experimental como numéricamente sin considerar el efecto del daño. Los resultados obtenidos permiten la validación del modelo mediante la obtención de las fuerzas de trefilado. Además se aprecia que el comportamiento de la presión hidrostática, la deformación plástica y la tensión de von Mises es consistente a lo representado en la literatura. En cuanto al daño, se logra identificar su inicio y evolución en el material a lo largo del proceso de trefilado. Los resultados indican que ninguna configuración ensayada alcanza el daño crítico, descartando así la presencia de chevrones. Esto permite afirmar que el proceso simulado se encuentra dentro de la zona segura de operación. Es interesante destacar que el segundo criterio refleja de mejor manera el comportamiento esperado del daño, mostrando una localización en las zonas internas del material.

Palabras Claves: Trefilado, chevron, estallido central, daño.

## ABSTRACT

This thesis present a computer simulation of wire drawing process in order to analyze the behavior of the material and identify the factors that influence the formation and evolution of damage like a fault identifier caused by the defect called chevron or central burst.

For this simulation an elastoplastic model that incorporates mechanical damage variable, is used. The damage is measured based on the degradation of the elastic modulus of the material. For the damage evolution, in this thesis two criteria are proposed, which are defined within the context of the associated plasticity theory. The first criteria of evolution are assumed independent of the value of the hydrostatic pressure, while the second criterion considers the evolution of damage in the presence of only positive pressures.

The simulated cases correspond to one step drawing process, using five different semi angles ( $7^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $21^\circ$ ,  $28^\circ$  and  $35^\circ$ ) and two section reductions (21% and 31%). These configurations have been studied both experimentally and numerically without considering the effect of the damage. The results allow the validation of the model using the drawing forces. Furthermore it is observed that the hydrostatic pressure behavior, plastic deformation behavior and von Mises stress behavior are consistent with the literature. Respect to the damage, the results allows identifying the beginning and evolution in the material along the wire drawing process. The results indicate that no configuration tested reaches the critical damage, discarding the presence of chevrons. This allows us to affirm that the simulated process is within the safe operating area.

Interestingly, the second criteria better reflect the expected behavior of the damage, showing a location in the internal zones of the material.

Keywords wire drawing, chevron, central burst, damage.

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Motivación y justificación

El proceso de trefilado corresponde a uno de los procesos de conformado de gran importancia a nivel industrial. Mediante este proceso se logran grandes reducciones de área de materiales dúctiles, como el acero, cobre y aluminio, entre otros, con el objetivo de fabricar diversos productos, dentro de los que destacan cables y tubos.

Las exigencias a las que se someten los productos fabricados mediante este método requieren que se estudien constantemente las condiciones que optimicen el proceso y permitan la manufactura eficiente de elementos de calidad. Además, con el desarrollo tecnológico, se ha creado la necesidad de producir cables más delgados exigiendo diseñar sistemas de trefilación que permitan mayores reducciones de área por pasada o utilizar mayor cantidad de éstas. Por todo esto, el trefilado es intensamente estudiado, para tener una mayor comprensión del proceso y de los parámetros que son relevantes para su control y optimización.

Como se verá en la sección siguiente, muchas han sido las técnicas que se han empleado para modelar el proceso de trefilación, destacando el uso de métodos analíticos y la utilización del método de elementos finitos para simular el comportamiento del material sometido a este proceso. De esta manera, algunos de los parámetros más relevantes para comprender el proceso son la reducción, el semi ángulo del dado, la fricción entre el material a trefilar y el dado, la velocidad de trefilación y la tensión de contratiro.

Debido a la importancia de este proceso de manufactura, en los últimos años se ha hecho hincapié en la capacidad de predecir fallas mediante la utilización de diferentes modelos, tanto analíticos como numéricos, enfocándose en una de las fallas más comunes, la formación de chevrones o estallido central, la cual es imposible de visualizar durante la fabricación, pero que sin embargo genera un debilitamiento del material desencadenando la fractura de éste con la consecuente interrupción del proceso.

Los avances en la predicción de daño han sido considerables, lográndose definir diagramas límite de trefilado (este diagrama delimita las zonas segura e insegura en

función del semi ángulo del dado y la reducción) el que, sin embargo, se sabe que tiene la limitación de depender de cada material, de las condiciones de lubricación, etc. Ésta es una herramienta de gran utilidad para la industria, correspondiendo a una línea investigativa aún en desarrollo.

Dentro de este contexto, el presente trabajo presenta la modelación y simulación (por medio del método de elementos finitos) del proceso de trefilado, incluyendo en el análisis la evolución del daño a través de la definición de una variable asociada al cambio en las propiedades del material. De esta forma se pretende avanzar en el entendimiento del proceso y de las condiciones de operación aptas para reducir las fallas por ocurrencia de “chevrones” o “estallidos centrales”.

## 1.2 Descripción del proceso de trefilado

El proceso de trefilado corresponde a un proceso en frío, sin desprendimiento de viruta, en el cual se somete a materiales dúctiles a grandes deformaciones plásticas, con el objetivo de producir una reducción de área. Los beneficios que otorga este proceso al material son una deformación homogénea y un adecuado acabado superficial.

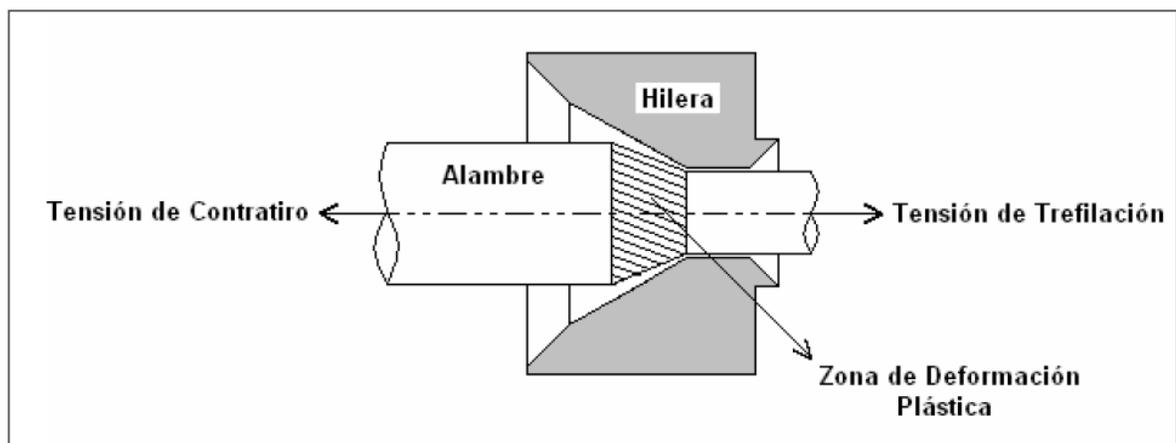


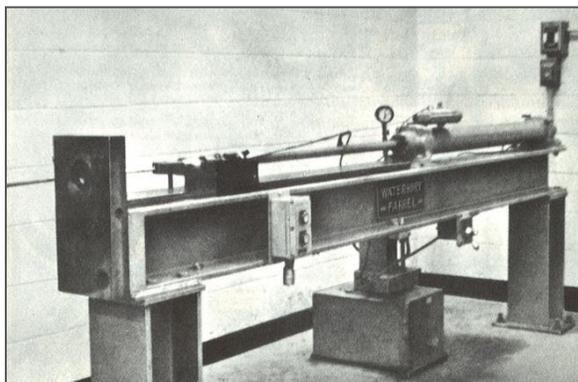
Figura 1-1: Esquema de proceso de trefilado

Este trabajo está enfocado en el trefilado de alambres de acero, donde se hace pasar el material, de sección circular, por un dado o matriz mediante una fuerza de tiro

produciéndose una deformación volumétrica (Figura 1-1), lo que implica una reducción en el diámetro y un alargamiento en su longitud debido a la deformación plástica.

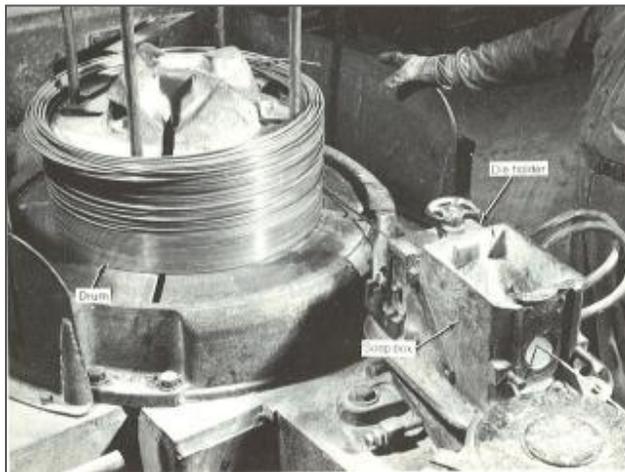
Para poder llevar a cabo este proceso es necesario realizar un afinamiento en la punta del material, con el objetivo de hacerlo pasar por el dado y aplicar en esta sección la fuerza de tiro. Posteriormente, la maquinaria para realizar el trefilado presenta diferentes posibilidades, pudiendo utilizarse un *Draw Bench* (Figura 1-2), que corresponde a un banco en el cual se realiza un tirado axial del alambre haciéndolo pasar así por el dado efectuando la reducción. También puede utilizarse un *Drawing Bull Block* (Figura 1-3), en el cual un tambor tira el alambre a través del dado enrollándolo después de pasar por éste. Esta última configuración permite operar a mayores velocidades, pero está restringida por la fuerza centrífuga, la cual puede provocar que el alambre se desprenda del tambor, reduciendo la fuerza de tiro.

Para poder obtener mayores reducciones es necesario realizar múltiples pasos de trefilado, pudiendo llegar hasta un 90% de la sección inicial del alambre mediante una configuración en tándem (varios dados consecutivos) tal como se muestra en la Figura 1-4.



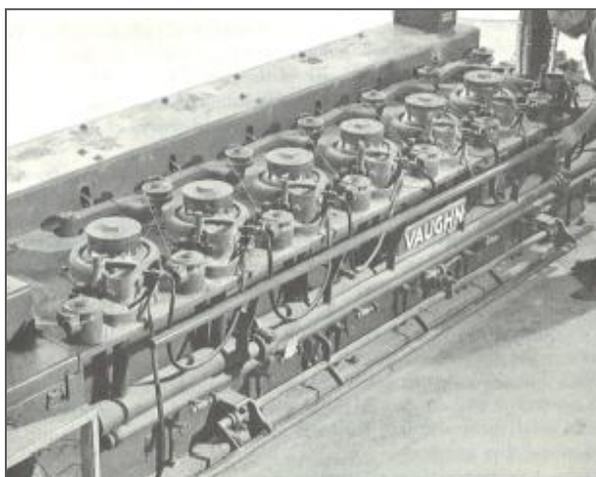
**Figura 1-2: Draw Bench**

Para comprender mejor este proceso de trefilado, es necesario identificar los principales factores que lo caracterizan [1,2], siendo éstos la fuerza de tiro, la geometría del dado y la lubricación. Estos factores tienen una estrecha relación entre sí.



**Figura 1-3: Drawing Bull Block**

La fuerza de tiro es uno de los factores que limita la reducción que es posible llevar a cabo en el trefilado. Ésta se ve afectada por diversos factores como la geometría de la herramienta y por las propiedades del lubricante y del material.



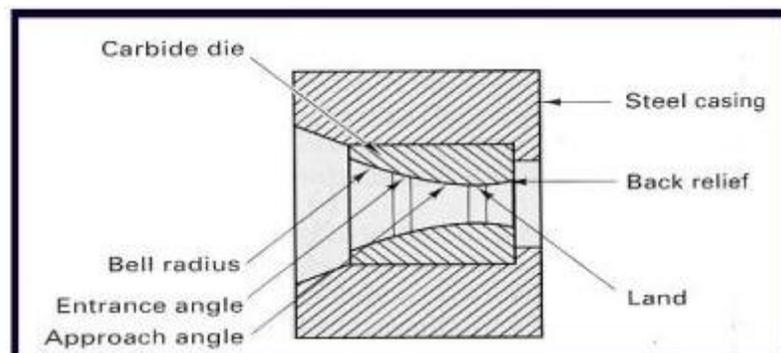
**Figura 1-4: Configuración en tándem**

Cabe destacar que esta fuerza se encuentra compuesta por tres contribuciones. La primera de éstas corresponde a la carga para deformar idealmente el material, siendo independiente al semi-ángulo del dado. La segunda componente corresponde a la carga para vencer el trabajo redundante. Esta carga se presenta por efecto de la distorsión en la

deformación a medida que se produce la reducción, debido a que se necesita de energía para producir los cambios en la dirección del flujo de las zonas del material. Finalmente la tercera componente de la fuerza de tiro es la carga para vencer la fricción producto de la resistencia que ejerce el dado sobre el movimiento del alambre.

Por otra parte, las características geométricas del dado son responsables de determinar la reducción a efectuar (Figura 1-5). La parte más importante de los dados corresponde a su núcleo, el cual debe tener alta dureza, buena resistencia a la tracción, alta conductividad térmica y bajo coeficiente de roce. Es por esto que generalmente los materiales seleccionados para esta zona del dado son carburo de tungsteno y diamante.

Otra consideración respecto a la geometría del dado es el ángulo de aproximación, el cual es de gran importancia para el proceso. Existe un ángulo que minimiza la energía necesaria para producir la deformación plástica requerida por la reducción a realizar, lo cual significa que la fuerza de tiro es también mínima en este punto. Si se utiliza un ángulo demasiado estrecho los efectos de la fricción aumentan la fuerza de tiro y si se utiliza un ángulo demasiado amplio el trabajo redundante produce el mismo efecto en la fuerza de tiro, además de contribuir a la formación de defectos en el material.



**Figura 1-5: Esquema de dado de trefilado**

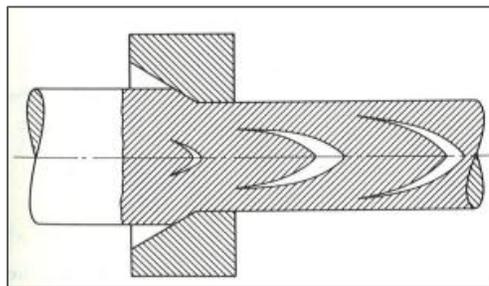
Finalmente la lubricación juega un papel fundamental en el proceso. La utilización de un lubricante apropiado, libre de contaminantes, reduce la fuerza necesaria

para efectuar la deformación plástica programada, además del desgaste de la herramienta y la probabilidad de fallas como la fractura.

Existen diferentes maneras de modelar la fricción, siendo los más utilizados el método de Coulomb, el cual asume que el esfuerzo cortante que se produce entre las superficies es proporcional a la presión entre éstas, mientras que el método de fricción constante asume que la fricción es proporcional a la resistencia del material.

### 1.3 Chevrone

Como se mencionó anteriormente, la predicción de fallas en el proceso productivo ha sido un tema de gran interés para la industria. Dentro de éstas, una de las que genera mayores problemas son los estallidos centrales o chevrones (Figura 1-6), ya que son imposibles de detectar, debido a que ocurren a nivel de las zonas internas del material, pudiendo provocar la fractura del alambre mientras se está trefilando.



**Figura 1-6: Corte transversal alambre con chevrones**

Mediante la aplicación de diferentes métodos, se han logrado determinar los factores que influyen en la manifestación de este defecto, tales como el nivel de reducción, el ángulo del dado, el roce y las propiedades del material. Cabe destacar que este fenómeno se manifiesta solamente bajo un rango de combinaciones de estas variables.

Una vez que el “estallido central” ocurre, los campos de velocidad que se producen se asemejan al de la Figura 1-7, donde puede apreciarse que la región de deformación plástica no se extiende hasta el eje de simetría del alambre.

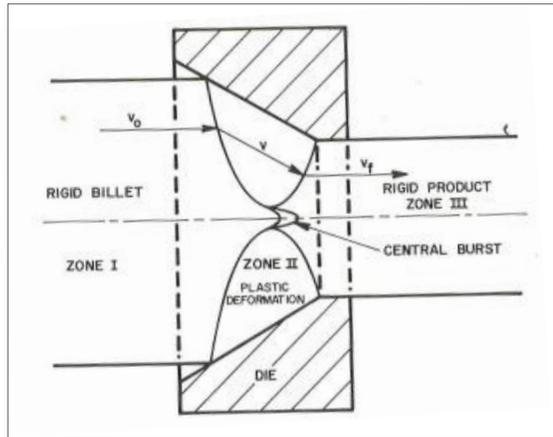


Figura 1-7: Campo de velocidad

Además, las regiones del material sin deformar y las que se encuentran completamente deformadas (alrededor del eje de simetría), tienen una frontera en común y, teniendo en cuenta la diferencia de velocidad entre éstas, el material se separa y se produce una propagación del estallido central.

El estudio de este fenómeno ha llamado la atención de muchos autores y es un campo que se está desarrollando constantemente para lograr determinar zonas seguras para el proceso de trefilado (Figura 1-8) [3], permitiendo optimizarlo.

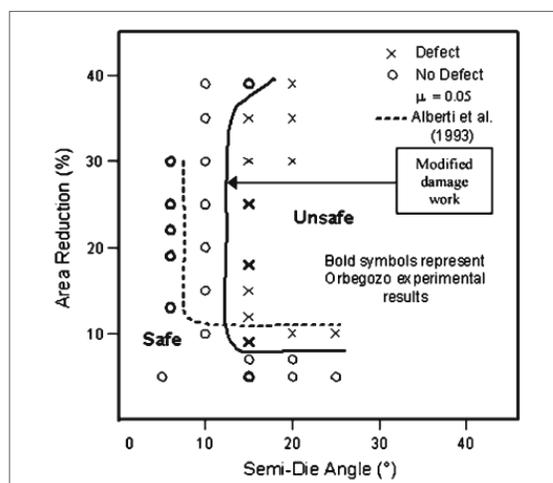


Figura 1-8: Diagrama límite de trefilado para la predicción de estallido central en alambre de aluminio[3]

#### **1.4 Objetivos y resultados esperados**

El objetivo general de esta tesis es incorporar un modelo de daño al análisis del comportamiento del material durante el proceso de trefilado que permita la predicción de falla por chevrões o estallidos centrales. Los objetivos específicos son:

- Obtener resultados de la simulación para distintas condiciones experimentales de operación.
- Validar experimentalmente los modelos de daño empleados, discutiendo sus alcances y limitaciones.
- Evaluar la evolución del daño en el material producto del proceso de trefilado, en función del semi ángulo y la reducción.

Se espera que los resultados de la simulación se ajusten de manera razonable a las mediciones experimentales disponibles posibilitando así la validación de la simulación en la predicción del comportamiento del material durante el proceso, además de permitir la definición de tendencias de falla diagrama límite de trefilado.

## 2 ANTECEDENTES

Como ya se mencionó, el estudio del proceso de trefilado ha llamado la atención de numerosos autores debido a la importancia industrial de este proceso.

Teniendo en cuenta la complejidad que significa obtener la solución exacta de un proceso como éste, se plantean diferentes metodologías para obtener una solución aproximada, dentro de las cuales se pueden destacar métodos analíticos y modelos que emplean el método de elementos finitos. La incorporación de estos últimos permite profundizar en el conocimiento del proceso e incluir al análisis nuevos parámetros, logrando así mejores aproximaciones al comportamiento del material.

La modelación mediante la utilización de elementos finitos del proceso de trefilado se ha desarrollado mucho durante las últimas décadas. En un principio, como una mejor estimación de los métodos analíticos, se logra obtener una caracterización de las variables que influyen en el proceso y sus efectos en el comportamiento del material. Posteriormente, con el avance tecnológico, estos modelos permitieron incorporar nuevas variables, con lo cual pudo iniciarse el estudio del daño en el alambre.

### 2.1 Descripción analítica del proceso de trefilado

En esta sección podemos destacar tres métodos que se utilizan para estudiar las variables que rigen el proceso de trefilado los cuales, mediante simplificaciones, permiten obtener una buena aproximación de la realidad. En [4] se puede apreciar la comparación entre los diferentes métodos mostrados a continuación

El primer método (Deformación Homogénea), asume que se utiliza la misma energía por unidad de volumen para efectuar la deformación plástica y que para este propósito se involucra el trabajo de todas las fuerzas externas. Se debe tener en cuenta que en este modelo se desprecia la fricción y no toma en cuenta la energía de distorsión. Contemplando todas estas consideraciones, junto con la suposición de una tensión de cedencia constante  $\sigma = \sigma_0$ , se establece el siguiente balance de energía:

$$FL = \int_V \int_{\varepsilon} \sigma d\varepsilon dV = V \int_{\varepsilon} \sigma d\varepsilon \rightarrow \sigma_{xf} = \frac{FL}{V} \quad (2.1)$$

$$\sigma_{xf} = \frac{F}{A} = \int_{\varepsilon} \sigma d\varepsilon = 2\sigma_0 \ln\left(\frac{R_i}{R_f}\right) \quad (2.2)$$

Donde F : fuerza externa de trefilado.  
 L : longitud del trefilado.  
 V : volumen del material deformado  
 $\sigma_{xf}$  : tensión de trefilado  
 $R_i$  : radio de entrada  
 $R_f$  : radio de salida

Ahora bien, si se asume una tensión de cedencia,  $\sigma = k\varepsilon^n$ , entonces se obtiene la siguiente ecuación para la tensión de trefilado:

$$\frac{\sigma_{xf}}{\sigma} = \frac{1}{1+n} \left( 2 \ln\left(\frac{R_i}{R_f}\right) \right) \quad (2.3)$$

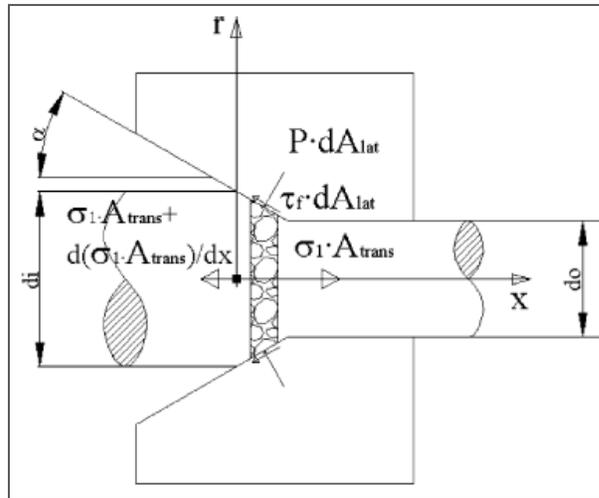
Como vemos, éste es uno de los métodos más simplificados, donde la tensión de trefilado está solamente determinada por la reducción a realizar.

El segundo método, denominado Método de Slab, considera la fricción pero no la energía de distorsión. El enfoque de este método consiste en tomar un trozo diferencial del material y realizar un balance de fuerzas, como se muestra en la Figura 2-1. Planteando las ecuaciones de balance de fuerzas en los ejes axiales y radiales respectivamente, se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial r} r + 2(\sigma_1 + \tau_f \cot(\alpha) + P) = 0 \quad (2.4)$$

$$P = \tau_f \tan(\alpha) + \sigma_r \quad (2.5)$$

Donde  $\sigma_1$  : tensión principal  
 $\sigma_r$  : tensión radial  
 $P$  : presión de contacto  
 $\tau_f$  : tensión de corte por fricción  
 $\alpha$  : semi ángulo del dado



**Figura 2-1: Trozo diferencial de material [4]**

Ahora bien, teniendo en cuenta el criterio de plasticidad de von Mises, el modelo de fricción de Tresca ( $\sigma_r = \sigma_0 - \sigma_1$ ;  $\tau_f = m \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_0$ ) y una tensión de cedencia similar a la utilizada en el método anterior, se obtiene la expresión para la tensión principal:

$$\sigma_x = \frac{k}{1+n} 2\sigma_0 \left( \frac{m(\cotan(\alpha) + \tan(\alpha))}{\sqrt{3}} + 1 \right) \left( 2 \ln \left( \frac{R_i}{r} \right) \right)^{n+1} \quad (2.6)$$

Este método evidencia la importancia que tienen para el proceso el coeficiente de roce y el semi ángulo del dado, presentándose así como un modelo más completo que el anterior.

Finalmente, el tercer método corresponde al Método del Limite Superior. Éste considera un dado rígido y un flujo axisimétrico. Esta primera suposición significa que toda la deformación plástica acumulada se concentra en la parte cónica del dado,

mientras que en las zonas restantes no existe deformación plástica en el material. La ecuación propuesta por este método se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\sigma_{xf}}{\sigma_0} = 2f(\alpha) \ln\left(\frac{R_i}{R_f}\right) + \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{\alpha}{\sin^2(\alpha)} - \cotan(\alpha) + m(\cotan(\alpha)) \ln\left(\frac{R_i}{R_f}\right) \right) \quad (2.7)$$

$$\text{Donde } f(\alpha) = \frac{1}{\sin^2(\alpha)} \left( 1 - \cos(\alpha) \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2(\alpha)} + \frac{1}{\sqrt{132}} \ln \left( \frac{\left(1 + \sqrt{\frac{11}{12}}\right)}{\sqrt{\frac{11}{12} \cos(\alpha) + \sqrt{1 - \frac{11}{12} \sin^2(\alpha)}}} \right) \right)$$

Este último modelo, junto con los que se expondrán en la sección siguiente, efectúa una mejor aproximación de los mecanismos que se producen en el proceso de trefilado.

## 2.2 Modelación elastoplástica

Los métodos expuestos en esta sección, ofrecen una aproximación más fiel a la realidad del proceso de trefilado que los métodos analíticos ya que realizan menos simplificaciones, pagando el costo de un mayor requerimiento de recursos computacionales y de tiempo.

Los trabajos aquí presentados se caracterizan por hacer un análisis del proceso de trefilado basándose en la respuesta viscoplástica del material, con endurecimiento isotrópico, considerando grandes deformaciones y un modelo de fricción de Coulomb.

El estudio de la simulación de un sistema multipasada puede apreciarse en [5], donde se logra modelar el proceso de trefilado definiendo una combinación apropiada de tensiones que permiten aumentar la estabilidad del proceso y disminuir el uso de dados durante la secuencia de formación. Las principales variables operacionales analizadas en este trabajo son la razón de reducción de diámetro, el semi-ángulo en la entrada del dado, la condición de fricción, la velocidad y el número de pasadas. Con esto se busca determinar los parámetros viscoplásticos, estimar el coeficiente de fricción y validar experimentalmente los resultados obtenidos en la simulación. Para esto se supone un proceso cuasi-estático, donde la respuesta mecánica del material puede describirse mediante ecuaciones gobernantes locales expresadas por la conservación de la masa, el

balance de momentum lineal y la desigualdad de disipación, escritas en descripción Lagrangiana:

$$\rho J = \rho_0 \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b}_f = 0 \quad (2.9)$$

$$D_{int} \geq 0 \quad (2.10)$$

Donde  $\boldsymbol{\sigma}$  : tensor de tensiones de Cauchy.  
 $\rho$  : densidad.  
 $J$  : determinante del tensor de gradiente de la deformación  $\mathbf{F}$  ( $\mathbf{F}^{-1} = \mathbf{1} - \nabla \mathbf{u}$ , donde  $\mathbf{1}$  es el tensor unidad,  $\nabla$  es el operador espacial gradiente y  $\mathbf{u}$  es el vector de desplazamiento).  
 $\mathbf{b}_f$  : vector correspondiente al peso propio del cuerpo.  
 $D_{int}$  : disipación interna que restringe el modelo constitutivo.

Definiendo una ecuación de energía libre de Helmholtz,  $\psi$ , en función de algunas variables termodinámicas de estado, tales como:

$\mathbf{e}^p$  : tensor de deformación de Almansi ( $\mathbf{e}^p = \frac{1}{2}(\mathbf{1} - \mathbf{F}^{-T} \cdot \mathbf{F}^{-1})$ , donde T es el símbolo de la transpuesta).

$\alpha_k$  : conjunto de  $n_{int}$  variables internas fenomenológicas, gobernadas por ecuaciones de evolución, para  $k = 1, \dots, n_{int}$ .

Se plantea un modelo constitutivo, representado por la siguiente ecuación:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}:(\mathbf{e} - \mathbf{e}^p) + \boldsymbol{\sigma}_0 \quad (2.11)$$

Donde  $\mathbf{C}$  : tensor elástico isotrópico.

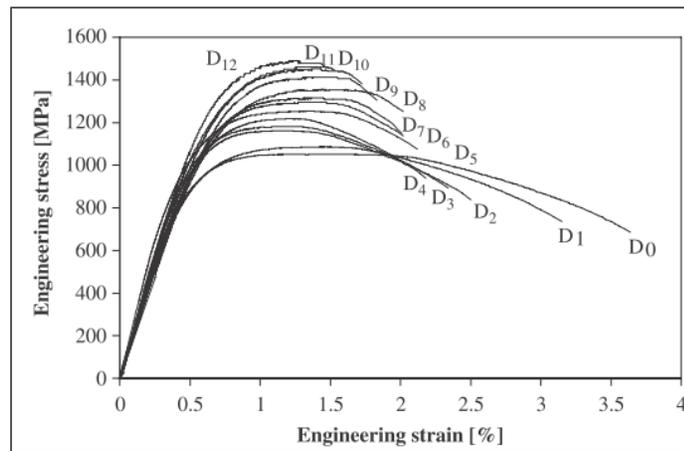
A continuación, incorporando la ecuación de endurecimiento isotrópico,  $\mathbf{C} = A^p e^{pn^p}$ , se construyen las ecuaciones de evolución basados en el contexto de la teoría viscoplástica asociada dependiente de la tasa de deformación, obteniéndose:

$$L_v(\mathbf{e}^p) = \lambda \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}}, \dot{\mathbf{e}}^p = -\lambda \frac{\partial F}{\partial \mathbf{C}} \quad (2.12)$$

Donde  $F$  es la función de von Mises, definida como  $F = \sqrt{3J_2} - C - C_{y_0}$  y  $\lambda$  es el parámetro viscoplástico definido como  $\lambda = \left(\frac{\langle F \rangle}{B^P}\right)^{m^P}$ .

Finalmente, se define un modelo de contacto para simular la interacción entre el dado y el material a trefilar, basado en la analogía plasticidad-fricción.

Para realizar la caracterización del material, se utiliza un ensayo de tracción, el cual permite determinar, observando la curva de tensión-deformación obtenida al realizar las doce reducciones contempladas (Figura 2-2), los parámetros de endurecimiento necesarios para realizar la simulación del proceso de trefilado. De esta figura se logra desprender un marcado desarrollo de endurecimiento plástico que tiene como resultado una reducción relativa de ductilidad en los diámetros menores.



**Figura 2-2: Efecto de la reducción en curva tensión-deformación [5]**

Por otra parte se realiza un análisis respecto de la influencia de la velocidad de deformación en el proceso, obteniéndose que la respuesta del endurecimiento es independiente a este factor. Finalmente, debido a la no uniformidad de los esfuerzos y deformaciones, las cuales provocan la formación de un cuello, es necesario realizar una simulación del proceso de tracción para lograr determinar de mejor manera los parámetros de endurecimiento. Para esto se asume un espécimen cilíndrico axisimétrico

con una altura de 25 mm y con una variación de radial de un 0,1%. Se compone una malla por elementos de cuatro nodos isoperimétricos, con tecnología B-bar, que evita el bloqueo por concepto de incompresibilidad. Con todo esto se logra simular doce diferentes reducciones de un alambre de acero ER70S-6, de diámetro inicial 2,02 mm, mediante una simulación computacional 2D, axisimétrica, discretizado con 2000 elementos isoparamétricos. Los resultados obtenidos en este trabajo son contrastados con datos experimentales, lo cual permite validar el modelo.

A partir de la simulación del proceso de trefilado considerando la caracterización previa del material, se destacan las conclusiones sobre la influencia de la velocidad de trefilado, ya que si bien para velocidades bajas (1 mm/min) no se aprecia influencia, para velocidades mayores (80 mm/min) la evidencia de una respuesta del material dependiente de esta variable hace el llamado a extender la caracterización del material.

Otra de las conclusiones que es importante rescatar es la determinación del coeficiente de fricción, el cual se obtiene a partir de la fuerza de trefilado comprobándose que es ligeramente dependiente de la reducción realizada. Sin embargo, la modelación considera un coeficiente promedio, ya que el lubricante es el mismo para todas las reducciones.

Por otra parte, en [6], el autor realiza una formulación termo mecánica aplicada a la trefilación de cobre, con el objetivo de poder evaluar la influencia de la velocidad y la temperatura. Para esto se utiliza la misma ecuación de conservación de masa (2.8), y se modifican las ecuaciones gobernantes de conservación de cantidad de movimiento y la de disipación de la siguiente manera:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b}_f = \rho \ddot{\mathbf{u}} \quad (2.13)$$

$$-\rho c \dot{T} - \nabla \mathbf{q} + \rho r - T \boldsymbol{\beta} : \mathbf{d} + \rho r_{int} = 0 \quad (2.14)$$

Donde  $\ddot{\mathbf{u}}$  : el vector de aceleración.

$c$  : capacidad de calor específico.

$T$  : temperatura.

- $\mathbf{q}$  : vector de flujo de calor, definido según la ley de Fourier  
 $\mathbf{q} = -k\Delta\mathbf{T}$ , siendo  $k$  el coeficiente de conductividad.
- $\boldsymbol{\beta}$  : conjugado del tensor de dilatación térmica, definido como  
 $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{C}:e_R^{th}$ , donde  $e_R^{th} = \frac{1}{3}(1 - a_{th})^{-\frac{1}{3}}\alpha_{th}$ , siendo  $a_{th} = \alpha_{th}(T - T_0)$  con  $\alpha_{th}$  como el coeficiente de dilatación térmica.
- $\mathbf{d}$  : tensor de razón de deformación.
- $r_{int}$  : fuente específica de calor interno, definida como  $r_{int} = \frac{1}{\rho} \left( (T\boldsymbol{\beta} + \boldsymbol{\sigma}):L_v(\mathbf{e}^p) - C\dot{\epsilon}^p \right)$ .

Además se debe considerar que en la definición del tensor de tensiones se agrega un término  $e^{th}$ , el cual representa la deformación en el material debido al efecto térmico, definido como:

$$\mathbf{e}^{th} = \frac{1}{2} \left( 1 - (1 - a_{th})^{\frac{2}{3}} \right) \mathbf{1} \quad (2.15)$$

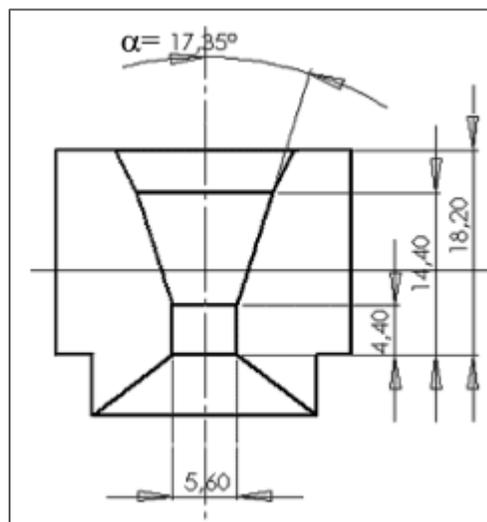
Por otra parte el modelo de contacto utilizado en este trabajo incluye el efecto térmico de la fricción, lo cual queda definido por la siguiente expresión:

$$\mathbf{qn}_{(i)} = q_{c(i)} + q_{f(i)} \quad (2.16)$$

Donde  $q_{f(i)}$  : flujo de calor normal por fricción.

$q_{c(i)}$  : flujo de calor normal por conducción.

En cuanto a las ecuaciones de evolución para este modelo, estas son las mismas que las expuestas en la modelación anterior. Además se tienen en consideración la misma ecuación de von Mises y la caracterización del material se realiza a través de un ensayo de tracción.



**Figura 2-3: Geometría del dado [6]**

Con el objetivo de completar la caracterización del proceso de trefilado y la posterior validación del modelo, se realiza experimentalmente el proceso con un alambre de cobre de 6,35 mm de diámetro. El perfil del dado a utilizar provoca una reducción de un 22,6% y puede apreciarse en la Figura 2-3. Finalmente, considerando una temperatura ambiental de 12,5°C y un lubricante seco, se ensayarán tres velocidades de trefilado (0,042 mm/s, 20 mm/s y 140 mm/s).

La Tabla 2-1 resume las fuerzas de trefilado obtenidas y la temperatura final del alambre luego del proceso, para las tres velocidades ensayadas.

Drawing velocity [mm/s]	Experimental		Computed	
	Drawing force [kN]	Temperature [°C]	Drawing force [kN]	Temperature [°C]
0,042	4.3 ± 0.2	14.0 ± 2.0	4.35	14.6
20	4.7 ± 0.2	44.0 ± 2.0	4.81	45.8
140	7.3 ± 0.2	74.0 ± 2.0	7.10	73.9

**Tabla 2-1: Fuerza de Trefilado [6]**

Por otra parte, la estimación del coeficiente de fricción se realiza en base a los resultados experimentales obtenidos, con lo que se obtiene un valor de 0,06, el cual se encuentra dentro de los rangos de lubricantes empleados.

Teniendo todo esto en cuenta, se realiza la simulación 2D, considerando una discretización similar al trabajo anterior, replicando las condiciones del trabajo experimental. Los resultados obtenidos mediante la simulación numérica permiten confirmar las observaciones realizadas a los datos experimentales. En primer lugar es posible apreciar en la Tabla 2-1, que las fuerzas de trefilado se encuentran dentro de los rangos obtenidos en el experimento. Además, se puede confirmar que esta variable tiene una respuesta independiente si la velocidad de trefilado es baja, mientras que para velocidades altas la fuerza de trefilado aumenta, de la misma manera que lo hace la temperatura final del alambre.

Los dos trabajos anteriormente expuestos permiten comprender mejor el proceso de trefilado ya que incorporan modelos más fieles a la realidad resueltos en el marco del método de elementos finitos.

A partir de aquí, las siguientes simulaciones emplean también este método para la modelación del proceso de trefilado incorporando una nueva variable, el daño.

### **2.3 Modelación elastoplástica con daño**

En esta sección, se describen algunos trabajos que tienen como objetivo medir el daño experimentado por el material durante el proceso de trefilado.

El daño es una variable que se incluye a los modelos con el objetivo de lograr encontrar zonas seguras para el proceso, de manera de poder evitar la formación de chevrones y en consecuencia la fractura del material mientras se está trefilando.

Los trabajos mostrados en la sección 2.3.1 incorporan, en una primera aproximación, el concepto de daño como una variable independiente de la modelación del proceso, mientras que los trabajos presentados en las secciones siguientes, 2.3.2 y 2.3.3, realizan una incorporación del daño completa.

#### **2.3.1 Índice de daño**

En [7] se estudia el comportamiento de un alambre súper fino de cobre, donde el problema de la formación de chevrones es crítico. La teoría expuesta busca explicar el fenómeno del estallido central basándose en la formación y evolución de una inclusión. Mediante la simulación, empleando el método de elementos finitos, es posible modelar

diferentes inclusiones en el material variando la posición, la forma y tamaño, de manera de determinar como influyen en el comportamiento del alambre (deformación plástica, presión hidrostática, tensiones principales y formación de chevrones).

El estudio se centra en tres tipos de inclusiones (Figura 2-4): cilíndrica centrada, cilíndrica no centrada y elíptica.

La configuración emplea del proceso de trefilado corresponde a una reducción de 17,4%, utilizando un dado de semi ángulo de aproximación de  $8^\circ$  y un coeficiente de fricción de 0,05. Además, cabe destacar que la inclusión presente está compuesta de aleación dura que se encuentra conectada a la matriz durante todo el proceso y transfiere completamente las tensiones axiales.

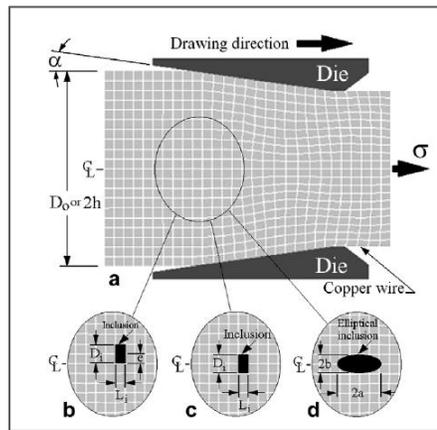


Figura 2-4: Configuraciones de inclusiones [7]

Utilizando los datos obtenidos de la simulación numérica, se aplica el criterio de Cockcroft y Latham para evaluar la influencia en el inicio y desarrollo del estallido central, de manera de poder determinar el momento cuando se produce la fractura por este defecto. La expresión utilizada es:

$$\sum_{i=1}^n (\sigma^* \Delta \bar{\epsilon})_i = C \quad (2.17)$$

Donde  $n$  : número de pasos de simulación.  
 $\Delta \bar{\epsilon}$  : incremento de la deformación efectiva.  
 $\sigma^*$  : tensión principal en el elemento.

$C$  : constante que representa el valor crítico del daño. Para este caso se define como 0,664.

De esta manera se logran determinar las zonas seguras de operación definidas en las Figuras 2-5, 2-6 y 2-7.

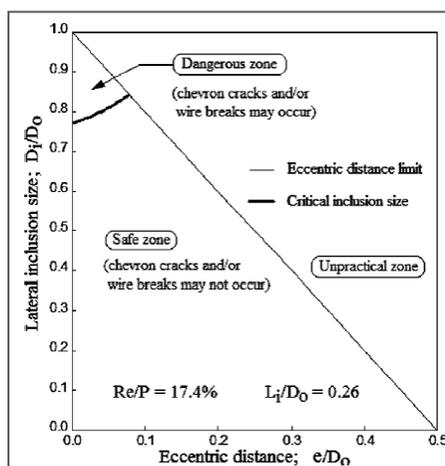


Figura 2-5: Zona de seguridad para inclusión cilíndrica no centrada [7]

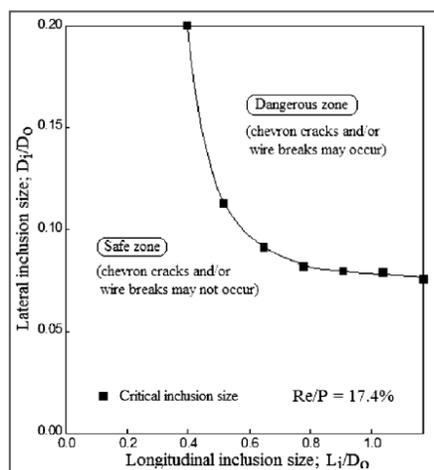


Figura 2-6: Zona de seguridad para inclusión cilíndrica centrada [7]

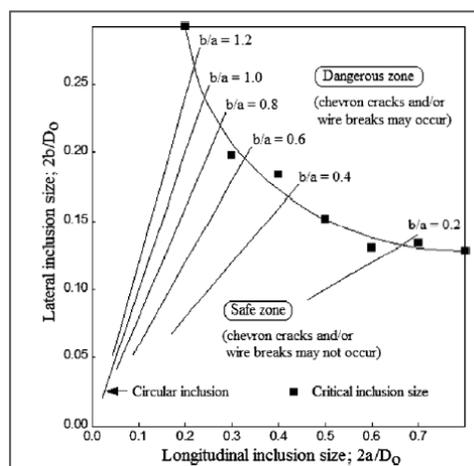


Figura 2-7: Zona de seguridad para inclusión elíptica centrada [7]

El método utilizado para medir el daño en el material producto del proceso de trefilado, mostrado en el trabajo anterior, es un criterio que toma en cuenta el análisis numérico del proceso obtenido de una modelación idéntica a las mostradas en la sección anterior. Así como el criterio de Cockcroft y Latham, existen muchos otros, que brindan una aproximación del daño. En [8], se muestran cuatro criterios distintos, utilizados para estudiar la mecánica de la fractura dúctil en el trefilado de alambre, centrando su atención en el estallido central.

Si bien el contenido central de este trabajo es el uso de un tipo de criterio que se abordará en la sección siguiente (Modelo de Gurson), es interesante apreciar la comparación que se lleva a cabo entre los diferentes criterios de daño.

Los criterios a comparar son los siguientes:

Criterio de Freudenthal:

$$\int \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dt \geq C_1 \quad (2.18)$$

Criterio de Cockcroft y Latham:

$$\int \sigma_{max} \dot{\epsilon} dt \geq C_2 \quad (2.19)$$

Criterio de Brozzo:

$$\int \frac{2\sigma_{max}}{3(\sigma_{max} - \sigma_m)} \dot{\epsilon} dt \geq C_3 \quad (2.20)$$

Criterio de Oyane:

$$\int \left( \frac{\sigma_m}{\sigma} + B_4 \right) \dot{\epsilon} dt \geq C_4 \quad (2.21)$$

Donde  $C_i$  : valores de daño crítico para cada criterio.

$\bar{\sigma}$  : tensión equivalente.

$\dot{\epsilon}$  : tasa de deformación equivalente.

$\sigma_m$  : tensión normal

$\sigma_{max}$  : tensión máxima.

Al realizar la simulación del proceso de trefilado con dos configuraciones diferentes (configuración 1: ángulo de 45° y reducción de 25%, configuración 2: ángulo de 30° y reducción de 15%) y contrastando con datos experimentales, se obtienen resultados categóricos que son resumidos en la Tabla 2-2.

Los valores de  $C_i$  son determinados observando el número de dado utilizado al momento de la fractura bajo las condiciones experimentales, siendo el número de dado 6 para la configuración 1 y 10, para la configuración 2 (Figura 2-8).

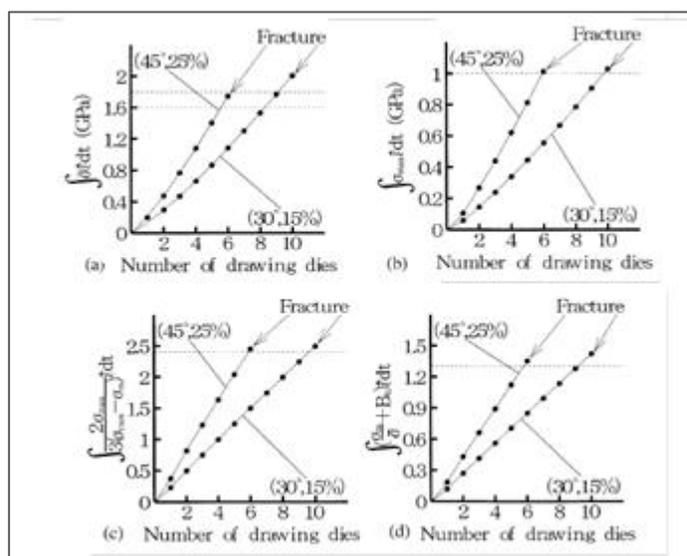


Figura 2-8: Determinación  $C_i$ : (a) Freudenthal (b) Crockcroft y Latham (c) Brozzo (d) Oyane [8]

Config/Criterio	Experimental	Freudenthal	Crockcroft y Latham	Brozo	Oyane
45°, 25%	Fractura periódica en el centro, 4.5 mm	Fractura en la cercanía de la superficie.	Fractura periódica en el centro, 5.7 mm	Fractura periódica en el centro, 5.1 mm	Fractura periódica en el centro, 3.5 mm
30°, 15%	Fractura periódica en el centro, 7 mm	Fractura en la cercanía de la superficie.	Material se separa en dos producto de la fractura	Material se separa en dos producto de la fractura	Fractura periódica en el centro, 5.1 mm

Tabla 2-2: Comparación criterios de daño [8]

Al ser comparados con datos experimentales permiten afirmar que el criterio de Oyane se aproxima de buena manera, mientras que los criterios de Crockcroft y Latham y de Brozzo, se aproximan bien en ciertas configuraciones. Por otra parte este trabajo también permitió apreciar que el criterio de Freudenthal no muestra una buena aproximación de la realidad.

Como se pudo notar, estos criterios ofrecen una buena aproximación a la realidad, sin embargo es necesario conocer sus limitaciones. La principal limitación que experimentan estos criterios es la base física de la fractura dúctil, debido a que éstos no consideran cómo el daño influye en el comportamiento del material.

A continuación, los trabajos que se expondrán en las siguientes secciones buscan dar el siguiente paso en el estudio del daño, logrando acoplar esta variable al modelo viscoplástico del material.

### **2.3.2 Modelación tipo Gurson**

La incorporación del daño a la modelación del proceso de trefilado busca realizar una mejor aproximación al fenómeno de la fractura dúctil. Es bien sabido que este fenómeno ocurre producto del mecanismo de la formación de cavidades (nucleación, luego crecimiento y finalmente coalescencia). Este mecanismo sería el responsable de la generación de micro-fracturas, las cuales al someter al material a ciertos esfuerzos pueden desencadenar la fractura de éste.

En la actualidad diversos autores han formulado modelos numéricos que buscan incorporar este conocimiento en la simulación de procesos de conformado, con el fin de evitar que estos defectos generen la fractura del material, interrumpiendo el proceso.

Así es como analizaremos dos principales modelaciones que logran este propósito. La primera corresponde al modelo de plasticidad porosa de Gurson, el cual deriva las ecuaciones constitutivas de la definición de un potencial plástico del material. En este modelo se define la razón de cambio de la fracción en volumen de cavidades  $\dot{f}$ , incorporando los efectos de la nucleación y crecimiento de las cavidades que finalmente producen una microfractura, la cual se genera al alcanzar un valor crítico de la fracción volumétrica de cavidades, valor que se obtiene experimentalmente.

Autores como Komori [9] y K.K Tang junto con Z. X. Li y J. Wang [10] han estudiado el proceso de trefilado con el objetivo de simular el daño experimentado por el material durante este proceso.

En [9] se aprecia el uso de la función de cedencia propuesta por Gurson definida como:

$$\Phi = \frac{3}{2} \frac{\sigma_{ij}\sigma_{ij}}{\sigma_M^2} + \frac{f}{4} \left( \frac{\sigma_{kk}^2}{\sigma_M^2} \right) - (1 - f)^2 = 0 \quad (2.22)$$

Donde  $\sigma_M$  : tensión de cedencia de la matriz.  
 $f$  : fracción del volumen de vacío en el material.  
 $\sigma_{ij}$  : componente del tensor de tensiones  
 $\sigma_{kk}$  : traza del tensor de tensiones

Aplicando la teoría del potencial plástico y las reglas de flujo se determinan las relaciones entre las tensiones y las deformaciones. De esta manera la expresión que denota el cambio en la fracción del volumen de vacío es:

$$\dot{f} = (1 - f)\dot{\epsilon}_{kk} + A\dot{\epsilon} + B \left( \frac{\dot{\sigma}_{kk}}{3} \right) \quad (2.23)$$

Donde  $A, B$  : constantes.  
 $\dot{\epsilon}_{kk}$  : traza de la tasa de deformación.

Luego se define el criterio de fractura como:

$$\int \dot{f} dt \geq C \quad (2.24)$$

Donde  $C$  : constante del material, definida como la fracción de volumen de vacío crítica.

Con el objetivo de obtener cálculos más próximos a la realidad, se plantea la necesidad de incorporar al análisis un método que permita hacer coincidir el criterio de fractura en el elemento con el valor crítico en éste al fin del paso de cálculo. Para esto se

utiliza el método  $r_{min}$ , permitiendo fracturar un elemento por paso de cálculo. Se explicará el método aplicado al modelo de Gurson, pero su aplicación es similar a los demás criterios.

En primer lugar debe cumplirse en el elemento la siguiente desigualdad:

$$\int_0^t \dot{f} dt < C \quad (2.25)$$

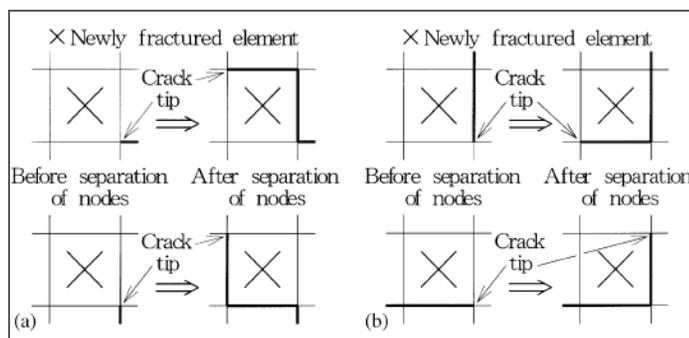
Luego se asume el desplazamiento, en el cual se considera un  $r'$  que satisfaga la siguiente ecuación:

$$\int_0^{t+r'\Delta t} \dot{f} dt = C \quad (2.26)$$

Dentro de los  $r'$  de todos los elementos se selecciona el menor definiéndolo como  $r'_{min}$ . Cuando éste es mayor que cero pero menor que uno, el incremento en el tiempo se modifica a  $r'_{min}\Delta t$ .

Adicionalmente, cuando se detecta la fractura de un elemento se implementa un método que busca descartar el elemento fracturado.

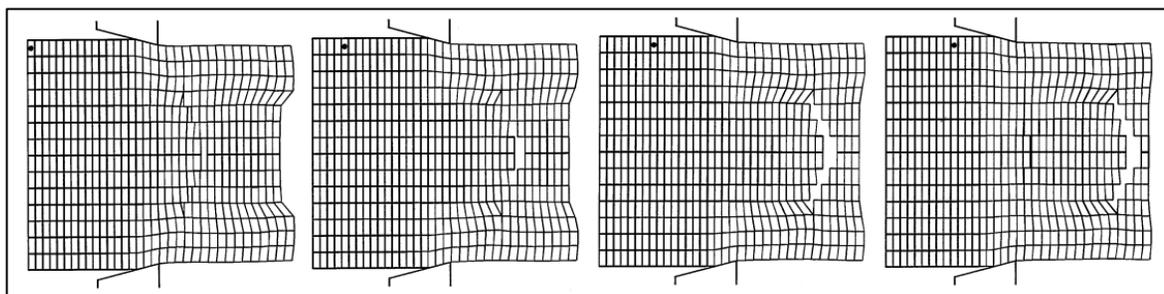
La Figura 2-9 explica el método de separación de nodos, donde la línea más gruesa marca la separación del elemento fracturado.



**Figura 2-9: Método de separación de elementos [9]**

En el caso (a) se considera que ningún borde del nuevo elemento fracturado se había separado de los elementos vecinos. De esta manera al producirse la fractura dos

nodos son separados en cuatro debido a que se separan dos bordes de los elementos. El caso (b) se considera cuando un borde del nuevo elemento fracturado ya se ha separado de los elementos vecinos. En este caso un nodo es separado en dos debido a la separación de un lado del elemento.



**Figura 2-10: Mallado durante el proceso de trefilado [9]**

Con todo esto se implementa una rutina computacional que calcula el daño y aplicando el criterio de fractura se determina el comportamiento del material. Si no se alcanza el valor crítico el programa asume el desplazamiento hacia el siguiente paso de cálculo. Cuando el valor crítico se alcanza el programa efectúa la separación de nodos asumiendo que solamente un elemento se fracturó y posteriormente se asume el desplazamiento. La Figura 2-10 muestra la malla durante diversos pasos de cálculo.

Por otro lado en [10], al igual que en el trabajo recién expuesto se utiliza la modelación tipo Gurson. En este trabajo, se realiza una simulación de mayor complejidad al construir un modelo 3D del proceso de trefilado.

Se utiliza un modelo de Gurson modificado llamado modelo Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN), el cual predice la fractura dúctil mediante la siguiente expresión:

$$\Phi(\sigma_{ij}, f, \sigma_y) = \left(\frac{\Sigma_e}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f \cosh\left(\frac{3q_2 \Sigma_m}{2\sigma_y}\right) - 1 - q_3 f^2 = 0 \quad (2.27)$$

Donde  $\Phi$  : potencial plástico.

$\Sigma_e$  y  $\Sigma_m$  : tensión efectiva y principal respectivamente.

En el proceso de daño acumulativo, la evolución del daño está dada por la siguiente expresión:

$$\dot{f} = \dot{f}_n + \dot{f}_g \quad (2.28)$$

Se puede notar que la ecuación de evolución se encuentra constituida por dos efectos, la nucleación y el crecimiento de cavidades, los cuales son definidos de la siguiente manera:

$$\dot{f}_n = \frac{f_n}{S_n \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_{eq}^p - \varepsilon_n}{S_n}\right)^2\right) \varepsilon_{eq}^p \quad (2.29)$$

$$\dot{f}_g = (1 - f) \varepsilon_{kk}^p \quad (2.30)$$

Donde  $S_n$  : desviación estándar.

$\varepsilon_n$  : deformación a la nucleación.

Con esta formulación para la ley de evolución del daño se puede notar que las cavidades tienen un crecimiento continuo con el aumento de la deformación. Es importante destacar que este crecimiento puede verse acelerado una vez que se alcance un valor crítico  $f_c$ , por lo que conviene reformular la ecuación del potencial plástico de la siguiente manera:

$$\Phi(\sigma_{ij}, f, \sigma_y) = \left(\frac{\Sigma_e}{\sigma_y}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3q_2 \Sigma_m}{2\sigma_y}\right) - 1 - q_3 f^{*2} = 0 \quad (2.31)$$

Donde,  $f^* = f$   $f \leq f_c$

$$f^* = f_c + \frac{f_u^* - f_c}{f_f - f_c} (f - f_c) \quad f > f_c$$

De esta manera queda definido  $f_f$  como la fracción en volumen de cavidades en la que ocurre la fractura. El material pierde su capacidad de soportar carga completamente cuando  $f \geq f_f$  o cuando  $f^* \geq f_u^* = \frac{1}{q_1}$ .

Una vez definida la variable de daño y su ley de evolución, en [10] se realiza la modelación del proceso de trefilado utilizando un modelo rígido-plástico. Cuando ocurre

la deformación plástica, la variación de volumen es provocada por la nucleación y el crecimiento de cavidades, variando las tensiones principales. Este hecho lleva a que se modifique el supuesto de incompresibilidad del material.

Así, se asume una tensión equivalente para el material dañado de la siguiente forma:

$$\bar{\sigma}^* = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_z - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yx}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{zx}^2)] + f\sigma_m^2} \quad (2.32)$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad (2.33)$$

Derivando del criterio de von Mises y utilizando la ecuación de flujo plástico de Saint-Venant, la ecuación de cedencia para un material poroso se escribe como:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\lambda}^* \sigma'_{ij} = \dot{\lambda}^* \left( \sigma'_{ij} + \frac{2}{9} f \sigma_m \delta_{ij} \right) \quad (2.34)$$

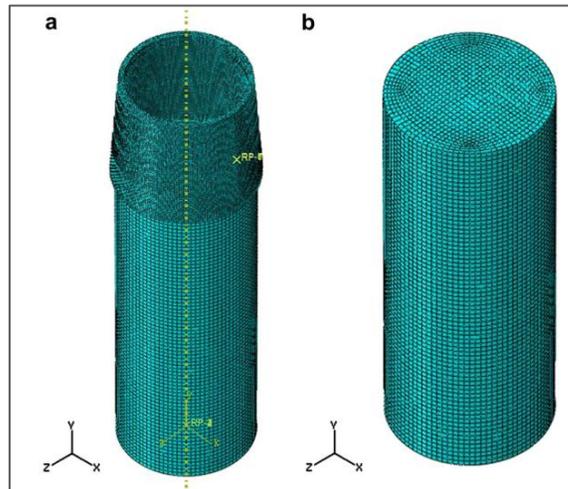
Luego, introduciendo la razón de deformación volumétrica  $\dot{\epsilon}_v$ , las ecuaciones obtenidas son:

$$\sigma_m = \frac{\bar{\sigma}^* \dot{\epsilon}_v}{\dot{\bar{\epsilon}}^* f} \quad (2.35)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{\bar{\sigma}^*}{\dot{\bar{\epsilon}}^*} \left[ \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} + \left( \frac{1}{f} - \frac{2}{9} \right) \dot{\epsilon}_v \delta_{ij} \right] \quad (2.36)$$

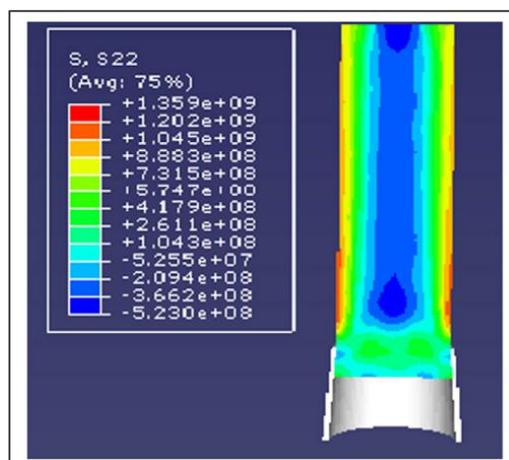
Adicionalmente, para modelar el contacto entre el material y el dado se debe utilizar un algoritmo de contacto que simule el comportamiento de las superficies. Se adopta el método de la función de penalización, obteniéndose las fuerzas de contacto proporcionales a la penetración.

Con todas estas consideraciones se presenta una simulación 3D del proceso de trefilado implementando el modelo GTN en el software ABAQUS (Figura 2-11).



**Figura 2-11: (a) Mallado de dado y alambre. (b) Mallado de dado trefilado [10]**

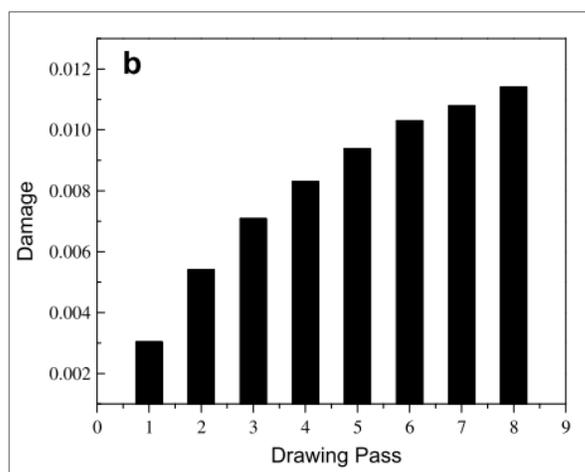
Para validar este modelo basta con apreciar el comportamiento de un punto de la superficie del alambre. Este punto está en contacto directo con el dado, mientras que la tensión radial experimentada es igual a la tensión de compresión aplicada por el dado. Cabe destacar que la tensión de compresión cambia a medida que el alambre se mueva a través del dado, pudiendo apreciarse dos peaks (uno a la entrada y otro a la salida del dado), lo cual se encuentra reflejado en los datos experimentales.



**Figura 2-12: Distribución de tensiones [10]**

Además, esta modelación muestra el efecto que tiene la fricción en la no uniformidad de la distribución de tensiones en las capas del material. La presencia de tensiones de tracción en la superficie y de compresión en el corazón del alambre (Figura 2-12), es un fenómeno que se puede notar claramente gracias a este modelo, logrando así su validación.

Por otra parte, respecto al daño experimentado por el material, se presenta la evolución de esta variable a lo largo de un proceso de 8 pasadas, logrando evidenciar el carácter acumulativo de esta (Figura 2-13).



**Figura 2-13: Daño acumulado [10]**

Se puede notar que en las primeras reducciones el daño experimentado por el material es mínimo, aumentando a medida que se realizan más reducciones. Este fenómeno encuentra su explicación debido al ablandamiento que sufre el material y a la coalescencia de cavidades.

Observando los trabajos presentados hasta aquí, es claro notar el avance que ha experimentado el entendimiento del proceso de trefilado y el interés que existe por lograr caracterizar el comportamiento del material. Es por esto que la modelación computacional ofrece una gran alternativa de desarrollo, permitiendo simular el proceso de trefilado obteniendo muy buenas aproximaciones a la realidad. En este contexto, al igual que los dos trabajos anteriores, se presenta otro tipo de modelación, que corresponde a un modelo CDM (*Continuum Damage Mechanics*), el cual será utilizado en esta tesis.

### 2.3.3 Modelación tipo Lemaitre

Los mecanismos de daño continuo están basados en la degradación del material producto de microcavidades y microfracturas dentro de un elemento de volumen representativo. Para medir esto se introduce una variable,  $D$  (pudiendo ser escalar o vectorial), que mide el daño experimentado por el material.

Este tipo de modelación considera que el potencial plástico del material dañado se compone por dos partes. La primera de éstas, correspondiente a la cedencia y endurecimiento, se obtiene principalmente de una función de cedencia usando el principio de deformaciones equivalentes. Esto hace referencia a que el comportamiento del material dañado puede ser descrito con las mismas ecuaciones constitutivas que un material virgen, si la tensión de Cauchy es remplazada por una tensión efectiva, la cual no es más que la tensión de Cauchy dividida por el factor  $(1 - D)$ . Así, derivando de esta primera parte del potencial plástico con respecto a la tensión, se obtienen las ecuaciones de estado.

La segunda parte que compone el potencial plástico, correspondiente al daño, al ser derivada respecto a la fuerza termodinámica entrega la ley de crecimiento del daño. Lemaitre propone una expresión simple para esta parte del potencial plástico, dado que esta no se encuentra bien definida en la literatura, de manera de obtener una ley de crecimiento lineal que no considera la nucleación de cavidades.

En [11], se utiliza un modelo tipo Lemaitre, con el objetivo de estudiar diferentes geometrías y parámetros del material en el proceso de *deep drawing*. Para esto se asume un endurecimiento elasto-plástico de acuerdo al criterio de cedencia de von Mises. Además, el daño es incorporado a las ecuaciones constitutivas a través de la deformación equivalente, adoptando la ley de crecimiento propuesta por Lemaitre.

En el modelo utilizado por estos autores, el comportamiento del material es descrito incorporando una variable de daño. Asumiendo un comportamiento isotrópico del material, la variable de daño se define como la fracción de área dañada:

$$D = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta A_v}{\Delta A} \quad (2.37)$$

De esta manera el potencial plástico se define como:

$$\varphi = \phi(\sigma_{ij}, -R; D) + \phi_d(-Y; D) \quad (2.38)$$

Donde  $-R$  y  $-Y$  corresponden a la parte disipativa de las fuerzas termodinámicas, asociadas a la variable de daño y al endurecimiento respectivamente.

Como ya se mencionó, se define el tensor de Cauchy efectivo como:

$$\sigma_{ij}^* = \frac{\sigma_{ij}}{1-D} \quad (2.39)$$

De esta manera el potencial plástico  $\phi$ , asumiendo el principio de deformación equivalente, queda definido de la siguiente forma:

$$\phi(\sigma_{ij}, \varepsilon_{eq}^{pL}; D) = \sigma_{eq}^* - \sigma_y \quad (2.40)$$

Donde  $\varepsilon_{eq}^{pL}$  : variable conjugada correspondiente a  $R$ .

A continuación se define la relación de dependencia de la función de cedencia, incorporando la ley de endurecimiento del material.

$$\sigma_y = \sigma_{y_0} + K(\varepsilon_{eq}^{pL})^n \quad (2.41)$$

Luego, para completar la expresión del potencial plástico, se utiliza lo propuesto por Lemaitre:

$$\phi_d(-Y; D) = \frac{1}{1-D} \frac{1}{1+s} \left( -\frac{Y}{S} \right)^{s+1} \quad (2.42)$$

$$-Y = \frac{\sigma_{eq}^2 R_v}{2E(1-D)} \quad (2.43)$$

$$R_v = \frac{2}{3}(1 + \nu) + 3(1 - 2\nu) \left( \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \right) \quad (2.44)$$

Donde  $s$  y  $S$  : parámetros del material que, cuando la temperatura no experimenta cambios significativos, toman el valor de la unidad.

$E$  y  $\nu$  : módulo elástico y la razón de Poisson respectivamente.

Finalmente, para poder definir la ley de crecimiento de daño, el incremental de daño se construye de la siguiente manera:

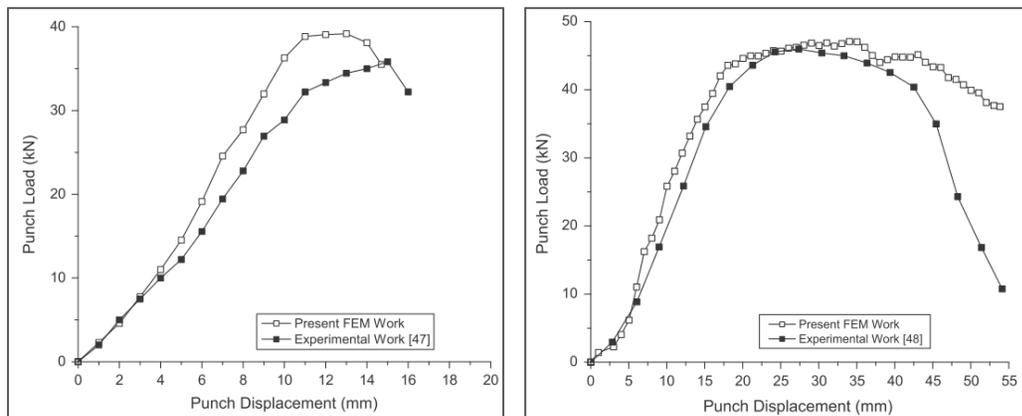
$$\dot{D} = \frac{D_c R_\nu}{(\varepsilon_c - \varepsilon_D)} \dot{\varepsilon}_{eq}^{pL} \quad (2.45)$$

Donde  $D_c$  : valor donde se inicia la fractura

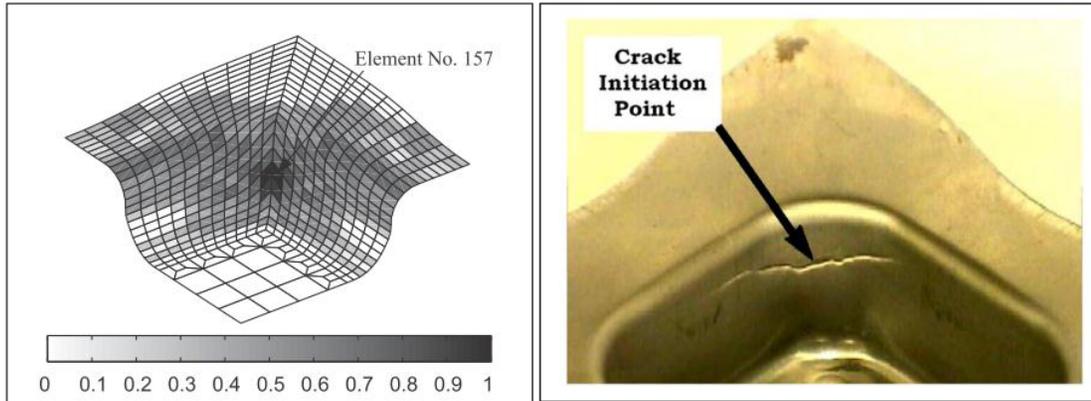
$\varepsilon_c$  : deformación al momento del inicio de la fractura

La validación de este modelo se logró mediante la simulación de láminas cuadradas y circulares, comparando las cargas realizadas por el punzón con datos experimentales. Como puede apreciarse en la Figura 2-14, este modelo logra una razonable representación de la realidad.

Implementando esta modelación y aplicándola al proceso de *deep drawing*, es posible predecir el comportamiento del material antes de la fractura. Durante este proceso de conformado, este trabajo logra predecir el inicio de la fractura, cercano a una de las esquinas inferiores, lo cual concuerda con los datos experimentales (Figura 2-15).



**Figura 2-14: Fuerza-desplazamiento *deep drawing* (a) lámina cuadrada (b) lámina circular [11]**



**Figura 2-15: Predicción de falla en proceso *deep drawing* [11]**

Similar al trabajo de los autores anteriores, en [12] se utiliza un modelo tipo Lemaitre modificado para comprender el comportamiento del material en procesos de conformado.

Otro aspecto que contempla este trabajo es considerar que el origen del daño dúctil toma lugar a nivel de sistemas de deslizamiento cristalográfico (CSS), ya que interesa presentar un modelo mecánico para materiales policristalinos.

De esta manera cada grano del material contiene un sistema de deslizamientos, que se ve afectado por las cargas (siendo potencialmente activado), desencadenando el movimiento de las dislocaciones y originando la deformación plástica.

Este efecto, sumado a la presencia de inclusiones o cavidades, que facilita la activación de los sistemas de deslizamiento, desencadenaría la micro fractura del material.

Teniendo esto en cuenta, es crucial para esta modelación determinar cómo la aplicación de una tensión macroscópica afecta a cada grano. Para afrontar esto, se utiliza una regla de transición paramétrica  $\beta$ , donde una tensión  $\Sigma$  macroscópica se traduce en una tensión sobre cada grano  $\sigma^g$ , de la siguiente manera:

$$\sigma^g = \Sigma + C \left( \sum_{g=1}^{N_g} f^g \beta^g - \beta^g \right) \quad (2.46)$$

Donde  $f^g$ : densidad de granos con la misma orientación.

C: parámetro característico del endurecimiento intergranular.

Así, puede definirse el esfuerzo de corte y la tensión normal en cada CSS, como:

$$\tau^s = \sigma^g : m^s \quad (2.47)$$

$$m^s = \frac{1}{2}(\vec{n}^s \otimes \vec{b}^s + \vec{n}^s \otimes \vec{b}^s) \quad (2.48)$$

$$\sigma_n^s = \sigma^g : \eta^s \quad (2.49)$$

$$\eta^s = \vec{n}^s \otimes \vec{n}^s \quad (2.50)$$

Luego se construye la ecuación de energía libre del material:

$$\rho\psi(E^e, \beta^g, q^s, d^s) = \rho\psi_{el}(E^e, D^T(d^s)) + \sum_{g=1}^{N_g} \rho\psi_{an}^g(\beta^g, q^s; d^s) \quad (2.51)$$

En esta modelación, la variable  $D^T$  corresponde a la medición macroscópica del daño. De manera de incorporar este fenómeno, es necesario definir las siguientes variables de estado efectivas:

$$\tilde{E}^e = \sqrt{1 - D^T} E^e \quad (2.52)$$

$$\tilde{\Sigma} = \frac{\Sigma}{\sqrt{1 - D^T}} \quad (2.53)$$

$$\tilde{q}^s = \sqrt{1 - d^s} q^s \quad (2.54)$$

$$\tilde{R}^s = \frac{R^s}{\sqrt{1 - d^s}} \quad (2.55)$$

De esta forma la parte elástica de la ecuación de energía libre y el tensor de tensiones macroscópico quedan definidos como:

$$\rho\psi_{el}(E^e, D^T) = (1 - D^T) \left[ \frac{1}{2} \lambda (\text{tr}(E^e))^2 + \mu \text{tr}(E^e)^2 \right] \quad (2.56)$$

$$\Sigma = \frac{\partial \rho\psi_{el}}{\partial E} = (1 - D^T) [\lambda \text{tr}(E^e) + 2\mu \text{tr}(E^e)] \quad (2.57)$$

Por otra lado, la parte inelástica de la ecuación de energía libre a escala granular se define como sigue:

$$\rho\psi_{an}^g(\beta^g, q^s; d^s) = \frac{1}{3}C\beta^g : \beta^g + \frac{Q}{2}\sum_{s=1}^{N_s}\sum_{r=1}^{N_s}H^{rs}\tilde{q}^s\tilde{q}^r \quad (2.58)$$

Donde  $C$ : módulo de endurecimiento cinemático (intergranular).

$Q$ : módulo de endurecimiento isotrópico (transgranular).

$H^{rs}$ : matriz cuadrada que define el endurecimiento producto de la interacción de granos.

A continuación se define la función de cedencia y el potencial plástico dentro de cada grano:

$$f^s = |\tilde{\tau}^s| + \alpha\langle\tilde{\sigma}_n^s\rangle\sum_s d^s - \tilde{R}^s - \tau_0 \quad (2.59)$$

$$\phi^s = f^s + bq^s\tilde{R}^s + \frac{3a^g}{4c^g}X^g : X^g + \phi_d^s(d^s, Y^s) \quad (2.60)$$

$$\phi_d^s = \frac{1}{1+\beta}\left(\frac{Y^s - Y_0}{s}\right)^{\beta+1} \frac{1}{(1-d^s)^m} \quad (2.61)$$

Donde  $X^g = \frac{\partial\rho\psi_{an}^g}{\partial\beta^g}$ : tensor de endurecimiento cinemático intergranular.

$R^s = \frac{\partial\rho\psi_{an}^g}{\partial q^s}$ : fuerza termodinámica asociada al endurecimiento transgranular.

$Y^s = \frac{\partial\rho\psi_{an}^g}{\partial d^s}$ : fuerza termodinámica relacionada con el daño dúctil.

Luego, de las ecuaciones constitutivas se desprenden las ecuaciones de evolución de las variables internas:

$$\dot{q}^s = -\lambda^s \frac{\partial\phi^s}{\partial R^s} \quad (2.62)$$

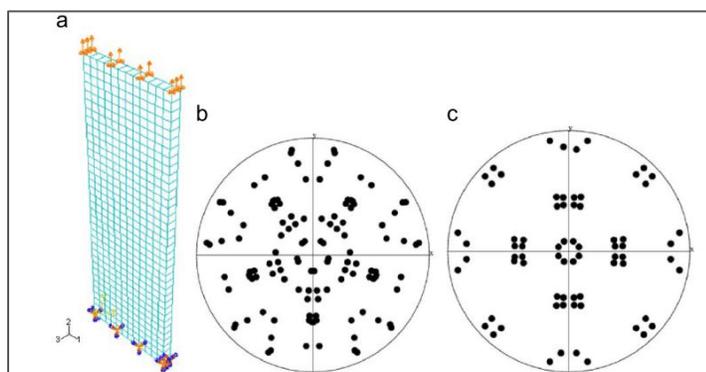
$$\dot{d}^s = -\lambda^s \frac{\partial\phi^s}{\partial Y^s} \quad (2.63)$$

Finalmente, de esta modelación granular, logra obtenerse las expresiones para la variable macroscópica de daño, definida como:

$$\dot{D}^T = \sum_{g=1}^{g=N_g} f^g \sum_{s=1}^{s=N_s} \dot{d}^s \quad (2.64)$$

Por otra parte, los autores simulan dos procesos de conformado utilizando esta modelación. El primero corresponde a un ensayo uniaxial de tensión monótona y el segundo al proceso de *deep drawing*.

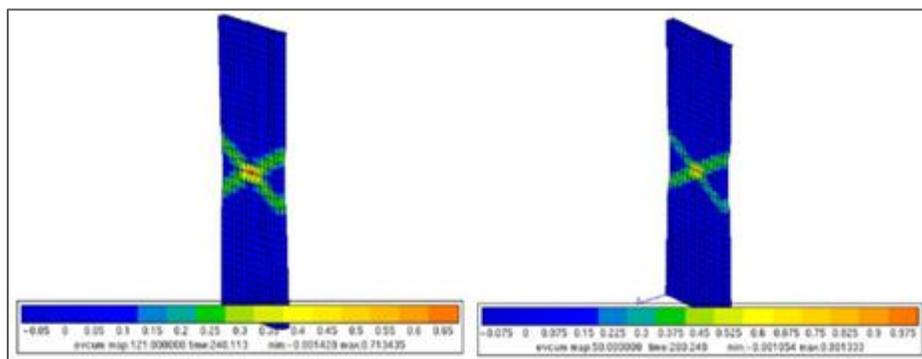
Para la primera aplicación, se construye un modelo 3D ensayando dos configuraciones policristalinas, replicando configuraciones de la bibliografía (Figura 2-16).



**Figura 2-16: (a) Mallado. (b) Primera configuración. (c) Segunda configuración [12]**

Las curvas obtenidas de tensión-deformación para ambas configuraciones ensayadas, así como la distribución de la deformación plástica, logran replicar de muy buena manera la realidad del proceso. Además observando la formación del cuello y la distribución del daño calculado en el material (Figura 2-17), se puede afirmar que este modelo logra simular el comportamiento macroscópico del material a partir de un análisis microscópico.

La segunda aplicación mostrada en este trabajo corresponde a la simulación del proceso de *deep drawing*. Para esta simulación es necesario destacar que tanto el dado como el punzón son definidos como cuerpos rígidos, y que el contacto con el material es modelado con el modelo de fricción de Coulomb.



**Figura 2-17: Deformación plástica acumulada [12]**

La Figura 2-18 muestra el comportamiento del material durante el proceso. Como se esperaba, en la etapa inicial del proceso, la distribución de la deformación plástica es casi axial simétrica, mientras que el daño se localiza en las mismas zonas sin ninguna tendencia aparente. En las siguientes etapas, la presencia del daño rompe la simetría del flujo plástico, como se evidencia en la figura anterior, y se puede apreciar la aparición de una fractura, la cual comienza a propagarse a medida que el punzón avanza.

Observando los ejemplos expuestos en este último trabajo, se puede concluir que el modelo sugerido es capaz de describir el daño dúctil en procesos de conformado, con resultados muy alentadores, lográndose predecir la ocurrencia de fracturas durante los procesos que involucran grandes deformaciones.

En el presente capítulo se realizó un recorrido a través de la historia de la simulación de procesos de conformado, partiendo desde los modelos analíticos y culminando el recorrido en modelos más complejos que incorporan el estudio del daño en el material. A continuación se presenta el modelo elegido para realizar el estudio de daño en el proceso de trefilado, el cual corresponde a una modelación tipo Lemaitre.

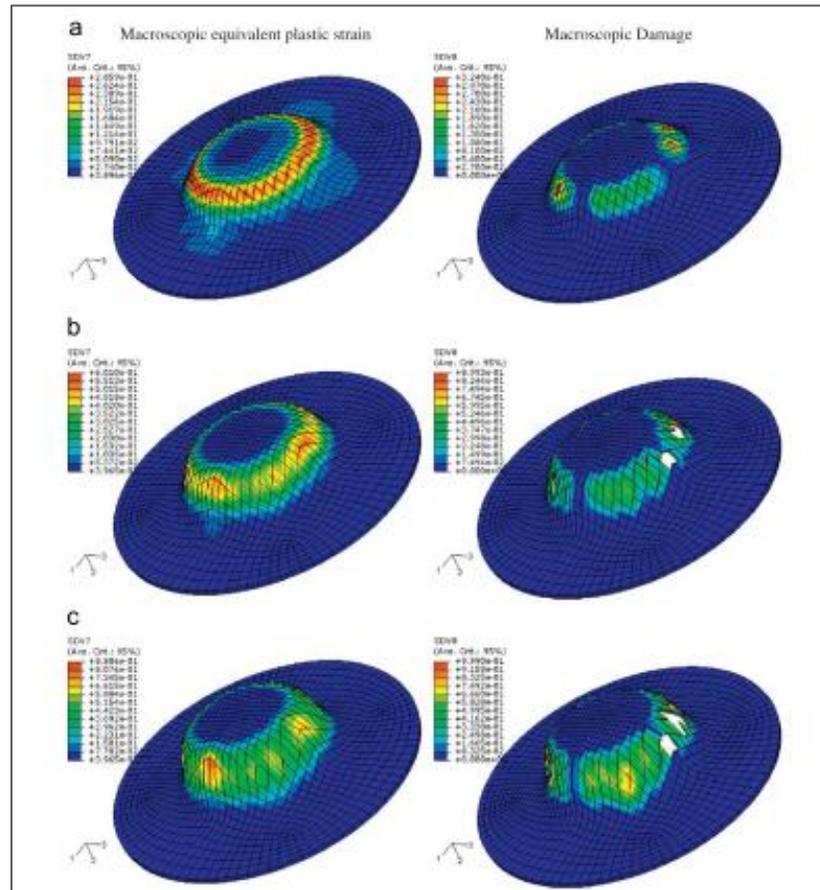


Figura 2-18: Deformación plástica y mapa de daño [12]

### 3 MODELO MECÁNICO CON DAÑO

Este capítulo presenta los aspectos generales del modelo que será utilizado en el análisis del proceso de trefilado.

Este modelo, similar al utilizado en [13], considera que el trefilado se desarrolla en condiciones isotérmicas. A continuación se presentan las leyes de conservación de masa y de cantidad de movimiento, el modelo constitutivo y el modelo de contacto y fricción para simular la interacción entre el alambre y el dado. Cabe mencionar que el modelo constitutivo expuesto a continuación incorpora la variable de daño establecida por Lemaitre, la cual se mide en base al cambio en el comportamiento del módulo elástico del material.

#### 3.1 Ecuaciones de balance

La evolución de un problema cuasi-estático, o sea, con efectos insignificantes de inercia y balance energético completamente satisfecho, puede ser descrita por ecuaciones de balance locales expresadas por la conservación de masa, conservación de cantidad de movimiento lineal y la desigualdad de la disipación. Todas ellas son válidas en  $\Omega \times Y$ , donde  $\Omega$  corresponde a la configuración espacial del cuerpo y  $Y$ , al intervalo del tiempo de interés. Escribiendo estas ecuaciones en descripción Lagrangiana:

$$\rho J = \rho_0 \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{b}_f = 0 \quad (3.2)$$

$$D_{int} \geq 0 \quad (3.3)$$

Donde  $\boldsymbol{\sigma}$  : tensor de tensiones de Cauchy.

$\rho$  : densidad.

$J$  : determinante del tensor de gradiente de la deformación  $\mathbf{F}$  ( $\mathbf{F}^{-1} = \mathbf{1} - \nabla \mathbf{u}$ , donde  $\mathbf{1}$  es el tensor unidad,  $\nabla$  es el operador espacial gradiente y  $\mathbf{u}$  es el vector de desplazamiento).

$\mathbf{b}_f$  : vector correspondiente al peso propio del cuerpo.

$D_{int}$  : disipación interna que restringe el modelo constitutivo.

### 3.2 Modelo constitutivo

Definiendo una ecuación de energía libre de Helmholtz,  $\psi$ , en función de algunas variables termodinámicas de estado, tales como:

$\mathbf{e}$  : tensor de deformación de Almansi ( $\mathbf{e} = \frac{1}{2}(\mathbf{1} - \mathbf{F}^{-T} \cdot \mathbf{F}^{-1})$ , donde T es el símbolo de la transpuesta).

$\alpha_k$  : conjunto de  $n_{int}$  variables internas fenomenológicas, gobernadas por ecuaciones de evolución, para  $k = 1, \dots, n_{int}$ .

Cabe destacar que la definición de la energía libre solamente es válida para pequeñas deformaciones elásticas y para una respuesta isotrópica del material, siendo ambas aplicables para metales y otros materiales.

Utilizando el método de Coleman, pueden obtenerse las siguientes relaciones:

$$\boldsymbol{\sigma} = \frac{\rho \delta \psi}{\delta \mathbf{e}} \quad (3.4)$$

$$D_{int} = q_k * \frac{D\alpha_k}{Dt} \quad (3.5)$$

Donde  $q_k = -\rho_0 \frac{\delta \psi}{\delta \alpha_k}$ , son las variables conjugada de  $\alpha_k$ .

Es importante notar que la definición de la ecuación de energía libre como  $\psi = \psi(\mathbf{e}, \alpha_k)$  y  $\frac{D\alpha_k}{Dt}$ , como la derivada temporal que satisface los principios de objetividad, son aspectos muy importantes que permiten derivar todas las ecuaciones constitutivas. Las variables internas y sus correspondientes ecuaciones de evolución se definen dentro del contexto de la teoría de la plasticidad asociada, incorporando el efecto del daño en el modelo. Estas ecuaciones se escriben de la siguiente manera:

$$L_v(\mathbf{e}^p) = \frac{\dot{\lambda} \delta F}{\delta \boldsymbol{\sigma}} \quad \dot{\mathbf{e}}^p = -\frac{\dot{\lambda} \delta F}{\delta C} \quad d^p = \frac{\dot{\lambda} \delta G}{\delta Y} \quad (3.6)$$

Donde  $L_v$  : derivada de Lie.

$\dot{\lambda}$  : parámetro de consistencia plástica.

C : función de endurecimiento isotrópico.

- Y : variable conjugada de  $d^p$ , también considerada como la tasa de liberación de energía de deformación por unidad de crecimiento de daño.
- G : flujo potencial de daño.
- F : flujo potencial de plasticidad pura.

En este contexto F también es considerada como la función de fluencia, que clásicamente es formulada como la función de von Misses:

$$F = \sqrt{3J_2} - C_y \quad (3.7)$$

- Donde  $J_2$  : segundo invariante de la parte desviatoria del tensor  $\sigma$ .
- $C_y$  : función de endurecimiento  $C_y = (1 - d^p)C_{y0} + C$ .
- $C$  : corresponde a la función de endurecimiento plástico isotrópico que es afectado por el daño.

Por otra parte la expresión adoptada para G es:

$$G = \frac{\frac{1}{2}A_d}{Y_{1D}} Y^2 \quad (3.8)$$

Donde  $Y_{1D}$  es la tasa de liberación de energía de deformación por unidad de crecimiento de daño relacionada a un ensayo uniaxial y  $A_d$  es una función que generaliza la pendiente de la curva  $d^p - e^p$ , definida como:

$$A_d = \frac{1}{(e_r - e_g)} [d_r H(\bar{e}^p - e_g) + (1 - d_r)^{-\beta_d} H(\bar{e}^p - e_r)] f_d \quad (3.9)$$

Donde  $e_r, e_g$  y  $d_r$  son los parámetros de daño y  $\beta_d$  es un parámetro que contabiliza la aceleración en la evolución del daño. Por otra parte,  $f_d$  es la función que define la influencia de la presión hidrostática en la evolución del daño. El primer criterio de evolución (Lemaitre original) es independiente del valor de la presión hidrostática, mientras que el segundo criterio considera evolución solamente ante la presencia de presiones positivas. De esta manera  $f_d$  se define como:

$$f_d = \begin{cases} 1 & \text{Primer criterio de evolución} \\ H(p) & \text{Segundo criterio de evolución} \end{cases}$$

Donde  $p = \frac{1}{3} \text{tr}(\boldsymbol{\sigma})$ , con  $\text{tr}()$  simboliza la traza.

Con todo esto, la función de energía libre es la siguiente:

$$\psi = \frac{1}{2\rho} (\mathbf{e} - \mathbf{e}^p) : (1 - d^p) \mathbf{C}_0 : (\mathbf{e} - \mathbf{e}^p) + \frac{1-d^p}{(n^p+1)\rho} A^p < \bar{e}^p - e_c >^{n^p+1} + \psi_0 \quad (3.10)$$

Donde  $A^p, n^p$  y  $e_c$  son parámetros relacionados al endurecimiento isotrópico.

A continuación se escriben las ecuaciones de referentes a las variables internas:

$$\boldsymbol{\sigma} = (1 - d^p) \mathbf{C}_0 : (\mathbf{e} - \mathbf{e}^p) \quad (3.11)$$

$$C = (1 - d^p) A^p < \bar{e}^p - e_c >^{n^p} \quad (3.12)$$

$$Y = \frac{\sigma_{eq}}{2E_0(1-d^p)^2} R_v + \frac{A^p}{(n^p+1)} < \bar{e}^p - e_c >^{n^p+1} \quad (3.13)$$

Donde el factor de tensión triaxial  $R_v$  es

$$R_v = \frac{2}{3} (1 + \nu) + 3(1 - 2\nu) \left( \frac{p}{\sigma_{eq}} \right)^2 \quad (3.14)$$

Finalmente, la expresión de disipación interna es dada por

$$D_{int} = \boldsymbol{\sigma} : L_v(\mathbf{e}^p) - C \dot{\bar{e}}^p + Y \dot{d}^p \geq 0 \quad (3.15)$$

### 3.3 Modelo mecánico de contacto y fricción

Para este modelo, es necesario tener en cuenta las condiciones de contorno (Figura 3-1), para la ecuación de equilibrio:

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = t_{f(i)} \text{ en } \Gamma_{f(i)} \text{ x } Y \quad (3.16)$$

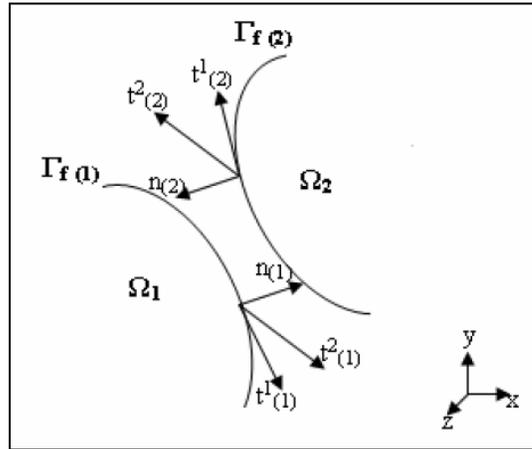


Figura 3-1: Descripción geométrica del contacto

Se define el vector de tracción en el contorno, de la siguiente manera:

$$\mathbf{t}_{f(i)} = -p_n \mathbf{n}_i - \mathbf{a}_i \mathbf{p}_t \text{ en } \Gamma_{f(i)} \text{ x } Y \quad (3.17)$$

- Donde
- $i$  : número de cuerpos en contacto.
  - $\mathbf{n}$  : vector normal saliente al contorno.
  - $\mathbf{a}_i = [t^j]_i$ : matriz de vectores tangentes.
  - $\mathbf{t}^j$  : vector tangente.
  - $p_n$  : presión normal.
  - $\mathbf{p}_t$  : presión tangente.
  - $\Gamma_{f(i)}$  : contornos espaciales de las configuraciones  $\Omega_{(i)}$  donde se produce el contacto.

Luego, se define la penetración o abertura normal como:

$$g_n = \mathbf{n}_{(1)} \cdot (\mathbf{x}_{(1)} - \mathbf{x}_{(2)}) \quad \mathbf{x} = \mathbf{X} + \mathbf{u} \quad (3.18)$$

- Donde
- $\mathbf{x}$  : vector de coordenadas espaciales.
  - $\mathbf{X}$  : vector de coordenadas instantáneas iniciales.
  - $\mathbf{u}$  : vector de desplazamiento

Lo siguiente por definir es el desplazamiento relativo o la abertura tangencial, dada por:

$$\mathbf{g}_t = \mathbf{a}_{(1)}^t \cdot (\mathbf{x}_{(1)} - \mathbf{x}_{(2)}) \quad (3.19)$$

De esta manera las leyes constitutivas para este caso son:

$$p_n = H(g_n)E_n g_n \quad (3.20)$$

$$\mathbf{p}_t = H(\mathbf{g}_t)E_t(\mathbf{g}_t - \mathbf{g}_t^s) \quad (3.21)$$

Donde  $H$  : función de Heaviside

$E_n$  : módulo constitutivo normal de adhesión y es el encargado de restringir la penetración.

$E_t$  : módulo constitutivo tangencial de adhesión, el cual rige la fricción estática y  $\mathbf{g}_t^s$  representa el desplazamiento tangencial, remarcando que su evolución se calcula en el contexto de la teoría de la plasticidad.

Ahora, se define la condición de deslizamiento tangencial como:

- Si  $g_n \leq 0$ , no existe contacto, por lo que se cumple que:

$$\mathbf{g}_t^s = \mathbf{g}_t \quad (3.22)$$

- Si  $g_n > 0$ , existe contacto. Para este caso la condición de  $\mathbf{g}_t^s$  se define como:

$$L_v \mathbf{g}_t^s = \lambda_f \frac{\delta F_f}{\delta \mathbf{p}_t} \quad (3.23)$$

Donde  $\lambda_f$  : parámetro de consistencia friccional

$F_f$  : función de cedencia o flujo friccional

Estas variables, dentro del marco de la teoría de la plasticidad, deben cumplir con las siguientes condiciones:

- Criterio de carga y descarga de Kuhn-Tucker

$$\dot{\lambda}_f \geq 0, \quad F_f \leq 0, \quad \dot{\lambda}_f F_f = 0 \quad (3.24)$$

- Criterio de Prager

$$\dot{\lambda}_f \dot{F}_f = 0 \quad (3.25)$$

Ahora bien, para caracterizar la función de cedencia, se adopta el modelo de Coulom, definiendo esta función como:

$$F_f = \|\mathbf{p}_t\| - \mu_f p_n \leq 0 \quad (3.26)$$

Donde  $\|\cdot\|$  : módulo de la presión tangente.  
 $\mu_f$  : coeficiente de fricción.

Teniendo esto último en cuenta, la ecuación de la condición de deslizamiento tangencial puede describirse como:

$$L_v \mathbf{g}_t^s = \dot{\lambda}_f \frac{\mathbf{p}_t}{\|\mathbf{p}_t\|} \quad (3.27)$$

De esta manera, de las condiciones de Prager se obtiene  $\dot{\lambda}_f$  y por último  $\mathbf{g}_t^s$  se obtiene integrando la ecuación anterior.

A modo de resumen:

- Si  $g_n \leq 0$ , eso implica que  $p_n = 0$  y  $\mathbf{p}_t = 0$ , por lo que no existe contacto. En este caso  $\mathbf{g}_t^s = \mathbf{g}_t$
- Si  $g_n > 0$  entonces existe contacto:

$$p_n = E_n g_n$$

$$p_t = E_t g_t$$

$$p_t = \mu_f p_n \frac{L_v g_t}{\|L_v g_t\|}$$

$$\text{si } \|p_t\| < \mu_f p_n$$

$$\text{si } \|p_t\| = \mu_f p_n$$

Contacto normal

Fricción tangencial estática

Fricción tangencial dinámica

## 4 SIMULACIÓN DEL PROCESO DE TREFILADO

### 4.1 Casos estudiados

Las simulaciones realizadas en esta tesis corresponden a un proceso de trefilado de un paso, utilizando cinco diferentes semi - ángulos de aproximación de dado ( $7^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $21^\circ$ ,  $28^\circ$  y  $35^\circ$ ) y dos reducciones de sección (21% y 31%).

Las configuraciones ensayadas fueron estudiadas previamente en [14], donde se contrastan los datos experimentales con la simulación numérica. En aquel trabajo se estudió el comportamiento del material, obteniéndose las curvas de fuerza de trefilado, las cuales serán utilizadas para validar el modelo presentado en esta tesis.

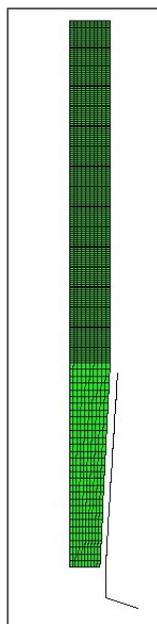
Además, se buscó estudiar el fenómeno del estallido central analizando la presión hidrostática y el esfuerzo de von Mises, mediante el uso de un modelo matemático similar a los mostrados en el Capítulo 2, en la sección de Modelación elastoplástica. Cabe destacar que para las configuraciones ensayadas no se evidenció presencia de estallido central, lo cual es corroborado por la simulación numérica presentada. Pese a esto, sí se logra apreciar la presencia de burbujas de tracción en la zona de trefilado y un aumento en las tensiones de von Mises en la zona de la reducción. Sin embargo ambos fenómenos se encuentran por debajo del umbral que marca el inicio del defecto del estallido central.

De esta manera en el presente trabajo se busca replicar estos ensayos aplicando un nuevo modelo matemático, descrito en el Capítulo 3, el cual al incorporar una nueva variable que tiene por objetivo medir la evolución del daño en el material durante el proceso, permitirá una mejor comprensión del comportamiento del material y definir una zona segura de operación. Cabe considerar que el modelo elastoplástico utilizado es válido para las bajas tasas de deformación utilizadas en [14].

Para realizar la simulación, es necesario definir el mallado del alambre a trefilar. Éste corresponde a una discretización 2D axisimétrica. El mallado posee 2211 nodos y 2000 elementos cuadriláteros de cuatro nodos e incorpora formulación B-bar, lo cual busca evitar el problema de bloqueo.

Se puede notar en la Figura 4-1 que el mallado no es uniforme debido a que se hace un refinamiento en la parte en la que se produce el contacto con el dado, y que es la zona donde se desarrollan los campos estacionarios de esfuerzos y deformaciones de interés. La sección anterior, que corresponde a la punta del material donde se impone el desplazamiento, sólo se considera para iniciar el proceso de estiramiento del alambre.

Cabe resaltar que la elección del mallado es una decisión sumamente importante, ya que los resultados obtenidos pueden verse influidos y el tiempo de cálculo tiende a aumentar a medida que el mallado es más fino. Es por esto que, en el Anexo A, se presenta un estudio del comportamiento del modelo mecánico aplicado a un ensayo de tracción uniaxial con diferentes mallados, con el objetivo de evaluar la objetividad del modelo, es decir, la independencia de la respuesta del material con nivel de discretización de la malla usada.



**Figura 4-1: Mallado de alambre y dado**

De este análisis se desprende que el comportamiento del material no se ve afectado por el refinamiento de la malla, salvo en los puntos cercanos a la fractura. De esta misma manera se analiza el comportamiento de la variable que mide el daño, logrando concluir que dentro del rango de evolución de esta variable, el mallado no tiene un efecto significativo, validando la objetividad del modelo.

Otra consideración importante es resaltar que las simulaciones numéricas se realizarán utilizando dos diferentes criterios de evolución de la variable de daño. Esto tiene por objetivo verificar la influencia de la presión hidrostática en el daño experimentado por el material. El primer criterio considera que la evolución del daño se produce ante cualquier valor de presión hidrostática, mientras que el segundo criterio considera evolución del daño solamente ante la presencia de presión hidrostática positiva (ver sección 3.3).

El siguiente paso es caracterizar mecánicamente el material a trefilar. Para esto se considerará un alambre de acero SAE 1020 al cual, además de aplicar la típica caracterización realizada mediante un ensayo de tracción, que permite obtener el módulo elástico, los parámetros de endurecimiento y la condición de fractura del material, es necesario realizar una caracterización para los parámetros referentes a la variable de daño introducida. En [13] se realiza un ensayo aplicando esfuerzos de tensión-compresión con el objetivo de apreciar la degradación en el modulo elástico, obteniendo así los parámetros del material.

Realizando un ensayo similar se obtienen los siguientes parámetros:

Módulo de Young inicial, $E_0$ (MPa)	200000
Razón de Poisson, $\nu$	0.3
Tensión de cedencia inicial, $C_{y0}$ (MPa)	280
Coefficiente de endurecimiento, $A^p$	770
Exponente de endurecimiento, $n^p$	0.15
Deformación al umbral de daño, $e_g$	0.22
Deformación a la fractura, $e_r$	0.88
Daño crítico, $d_r$	0.1

Finalmente, para simular el proceso de trefilado se utiliza un programa de cálculo llamado VULCAN [5,6,13], que opera en Linux. Este programa requiere como entrada la geometría a simular, correspondiendo en este caso al dado y al alambre a trefilar con sus respectivos mallados, las propiedades del material y las condiciones de contorno requeridas.

Como ya se mencionó, para recrear el proceso de trefilado es necesario imponer un desplazamiento en los nodos inferiores del alambre equivalente a la velocidad de trefilado multiplicada por el intervalo de tiempo.

Para la visualización de los resultados se utilizan programas auxiliares de VULCAN, como INTERGPLO, gracias al cual se obtienen, a modo de ejemplo, las curvas de la fuerza de trefilación y los desplazamientos nodales, INTERFLA, el cual permite traspasar los datos a un programa de post-proceso y GID 10, gracias al cual se logra obtener de manera gráfica las distribuciones de las variables a analizar.

A continuación se presentan los resultados obtenidos mediante la simulación numérica antes descrita. En primer lugar se mostrara la validación del modelo, mediante la comparación de las fuerzas de trefilado y a continuación se analizará el comportamiento del material, observando la deformación plástica, la presión hidrostática, la tensión de von Mises y el daño (utilizando ambos criterios de evolución).

#### **4.2 Validación experimental de la fuerza de trefilado**

Para validar el modelo mecánico utilizado en este trabajo, los valores obtenidos de la fuerza de trefilado, con los dos criterios de evolución de daño, para todas las configuraciones ensayadas se contrastan con los resultados obtenidos experimentalmente y mediante simulación computacional presentados en [14]. Estos últimos son replicables eliminando la variable de daño, ya que el material ensayado y las condiciones de la simulación son similares.

Para la reducción de 21%, la fuerza de trefilado obtenida para ambos criterios de evolución del daño comparado con los resultados obtenidos sin considerar el daño y los máximos y mínimos experimentales, son mostradas en las Figuras 4-2 y 4-3. Se puede apreciar que la fuerza de trefilado obtenida con ambos criterios de evolución (Figuras 4-

2 y 4-3) se ajustan a los resultados obtenidos al simular el proceso sin considerar el efecto del daño y se encuentran dentro de los rangos definidos por los resultados experimentales, salvo una excepción (semi ángulo de 7°), la cual presenta una diferencia del 9% (primer criterio de evolución) y 10% (segundo criterio de evolución) por sobre el valor máximo.

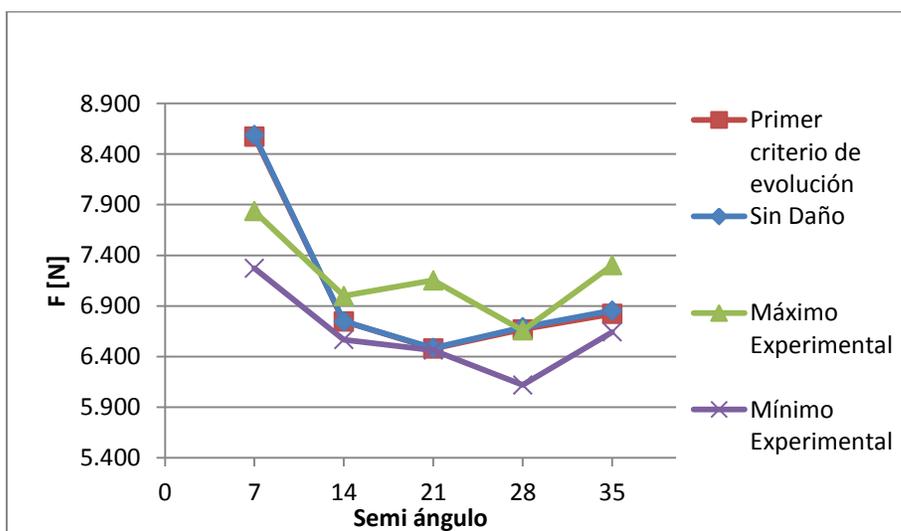


Figura 4-2: Fuerza de trefilado con primer criterio de evolución de daño en reducción de 21%

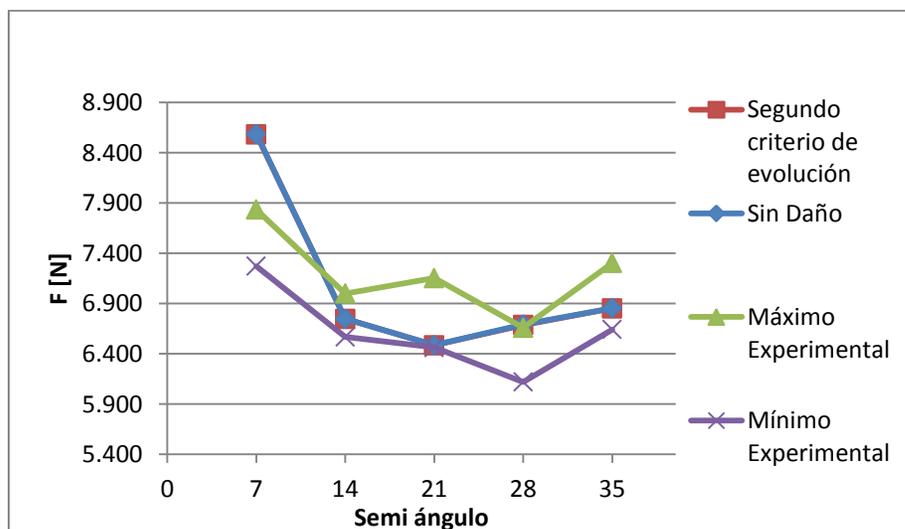
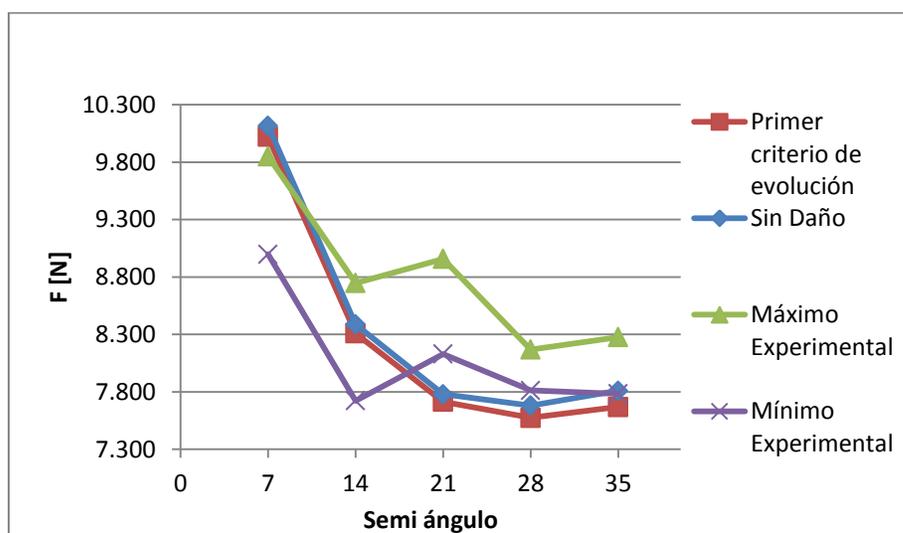


Figura 4-3: Fuerza de trefilado con segundo criterio de evolución de daño en reducción de 21%

A continuación se presenta la misma comparación para la reducción de 31% (Figuras 4-4 y 4-5). Puede apreciarse que para la reducción de 21% (Figura 4-4) la fuerza de trefilado obtenida con el primer criterio de evolución se ajusta bien a los valores obtenidos al simular el proceso sin considerar el efecto del daño, presentando leves diferencias para los ángulos mayores (menor al 2%). En cuanto a los resultados obtenidos con el segundo criterio de evolución (Figura 4-5) el ajuste con los resultados de la simulación sin considerar el efecto de daño no presenta desviaciones significativas.

Por otra parte, ambos criterios presentan valores de la fuerza de trefilado que se encuentran fuera de los rangos definidos experimentalmente. Sin embargo la mayor desviación (semi ángulo 21°) es de alrededor del 5% (5,11% para el primer criterio de evolución y 4,58% para el segundo criterio de evolución).



**Figura 4-4: Fuerza de trefilado con primer criterio de evolución de daño en reducción de 31%**

De esta manera se puede concluir que la incorporación de la variable de daño al modelo matemático, independiente del criterio de evolución de ésta, logra resultados muy similares a la modelación sin daño, quedando validado el modelo en cuanto a la fuerza de trefilado.

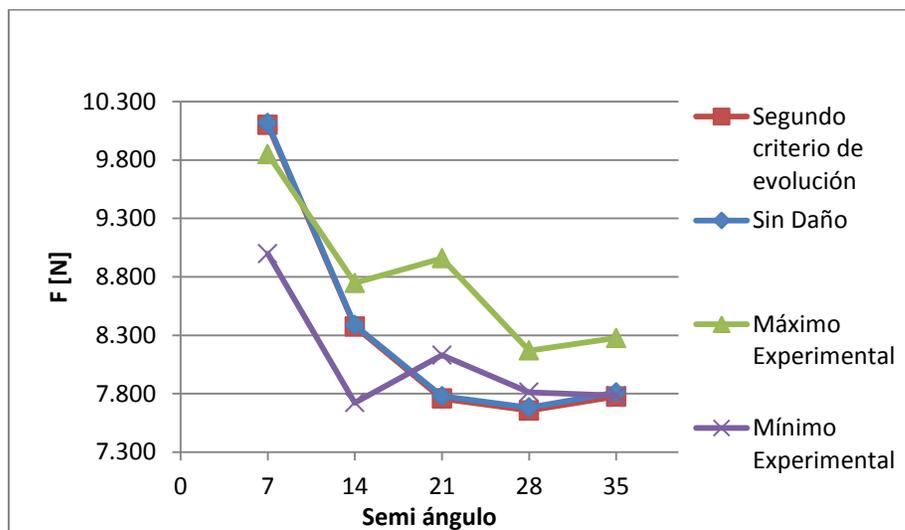


Figura 4-5: Fuerza de trefilado con segundo criterio de evolución de daño en reducción de 31%

### 4.3 Análisis de deformaciones, tensiones y daño

Para estudiar el comportamiento del material se eligieron 6 secciones características del proceso, mostradas en la Figura 4-6:

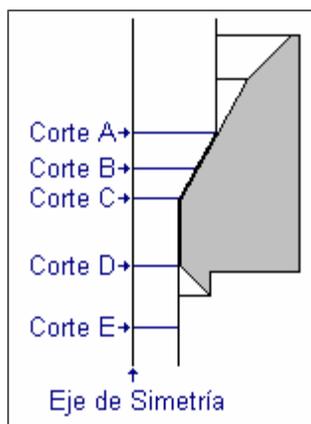


Figura 4-6: Imagen de cortes radiales en el alambre

La ubicación del corte A corresponde a la zona en la cual se inicia el contacto entre el dado y el material a trefilar, dando inicio a la deformación plástica. El corte B se ubica en la zona media de la deformación plástica, y el corte C corresponde al final de

esta zona y al comienzo de la zona muerta. Finalmente los cortes D y E corresponden a la salida de la zona muerta y a la zona en la cual se logra un estado estable, respectivamente.

En las siguientes secciones se presentan los resultados obtenidos para la presión hidrostática, deformación plástica, tensión de von Mises y el daño para las reducciones de 21% y 31%, para las diferentes configuraciones geométricas ensayadas. Es importante precisar que el análisis de la presión hidrostática, deformación plástica y tensión de von Mises se realiza sobre los resultados obtenidos con el primer criterio de evolución debido a que los resultados obtenidos con el segundo criterio son similares y las desviaciones son imperceptibles gráficamente.

Cabe mencionar que para los gráficos de corte, cada variable se muestra en relación a los nodos de la malla. El nodo 1 corresponde al eje de simetría del alambre, mientras que el nodo 11 corresponde a la superficie de éste.

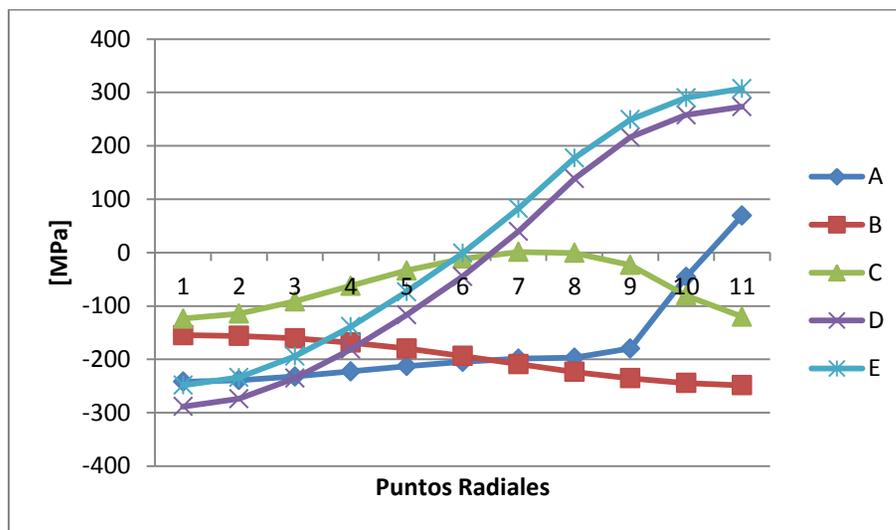
En conjunto con los cortes se presenta un mapa de colores, el cual muestra la distribución de las variables antes descritas a lo largo de la probeta.

### **4.3.1 Reducción 21%**

#### 4.3.1.1 Configuración 1

La primera configuración ensayada corresponde a un semi ángulo de  $7^\circ$ . Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

La presión hidrostática en el corte A, (Figura 4-7), muestra una alta compresión en el centro del alambre. A medida que se avanza radialmente la presión tiende a ser menos negativa, aunque este comportamiento es leve. Sin embargo, a partir del nodo 9 éste se acelera, produciéndose un cambio de signo, lo cual significa la presencia de un estado de tracción en la superficie. Esta tracción superficial se debe a que el alambre se encuentra entrando en la zona de deformación, por lo que el alambre se encuentra aún levemente en contacto con el dado.



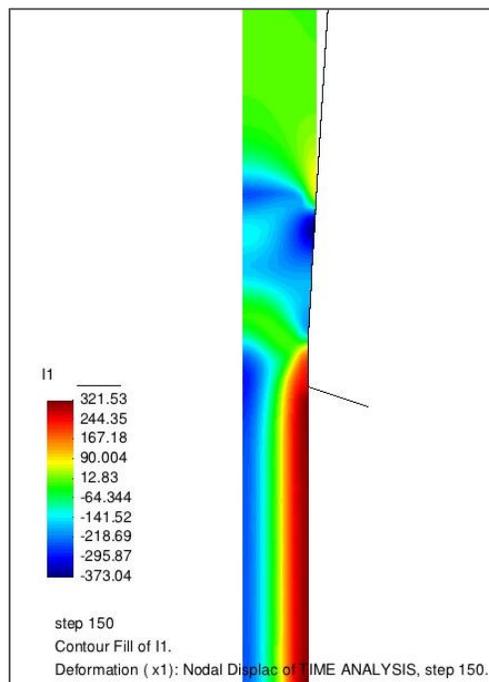
**Figura 4-7: Presión hidrostática configuración 1 reducción 21%**

En el corte B se evidencia un estado de compresión total en el alambre. Se puede notar que el comportamiento de este corte es diferente al anterior, ya que la presión hidrostática disminuye a medida que se avanza radialmente, intensificándose el estado de compresión. Esto se deba a que en este corte el material se encuentra en contacto con el dado, el cual genera un aumento en la presión hidrostática en el eje y una disminución en la superficie.

En cuanto al corte C, éste muestra valores negativos en toda la sección, al igual que el corte anterior. Sin embargo la tendencia de esta variable muestra un aumento en la presión hidrostática a medida que se avanza radialmente, alcanzando valores cercanos a cero en los nodos 6-8. Continuando el avance hacia la superficie la presión hidrostática vuelve a disminuir, registrándose valores similares a los alcanzados en el eje.

Finalmente los cortes D y E, ubicados al final del proceso de trefilado, muestran un comportamiento paralelo, estando siempre el corte E por encima. Puede apreciarse que ambos cortes evidencian un estado de compresión en las zonas internas del material, el cual decrece a medida que se avanza radialmente. Entre los nodos 6-7 la presión hidrostática alcanza valores positivos, produciéndose el cambio a un estado de tracción, el cual aumenta hacia la superficie. Este estado de tracción en la superficie se explica producto de las tensiones residuales acumuladas en el proceso.

A continuación (Figura 4-8), se muestra el mapa de colores de la presión hidrostática en el alambre.



**Figura 4-8: Distribución de la presión hidrostática configuración 1 reducción 21%**

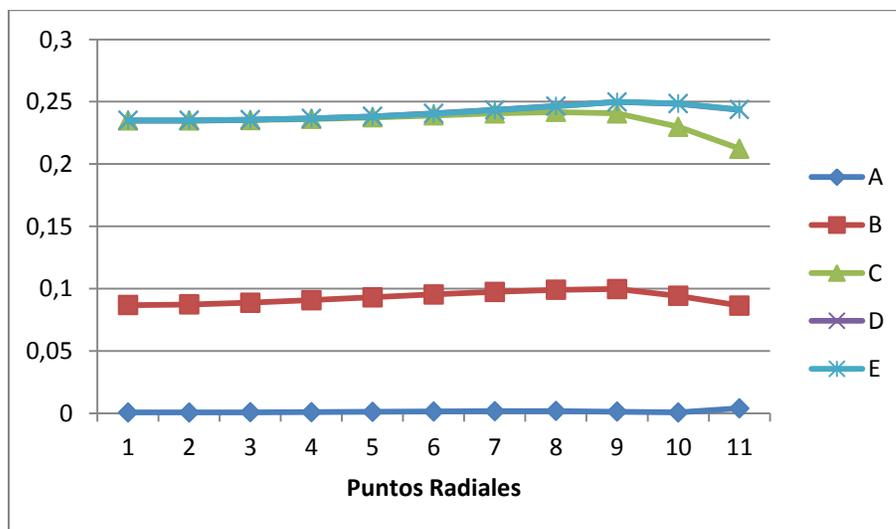
En el mapa de colores (Figura 4-8) puede notarse el momento en el que se produce el contacto entre el alambre y el dado (corte A) debido a la presencia de presiones negativas en el interior.

Es en la zona comprendida entre los cortes A y C donde el estado de compresión se extiende a la totalidad del material, alcanzando valores más negativos en la superficie, debido al contacto con el dado. A partir del corte C los valores de la presión hidrostática es menos negativa por efecto de las tensiones residuales acumuladas en el proceso, que se presentan a partir del paso recto.

Finalmente en la zona de los cortes D y E, que representan las salida del alambre del dado, las tensiones residuales alcanzan un estado más estable y se marcan claramente las zonas de compresión en las zonas internas del alambre y de tracción en la superficie, producto de la relajación de la zonas externas del material.

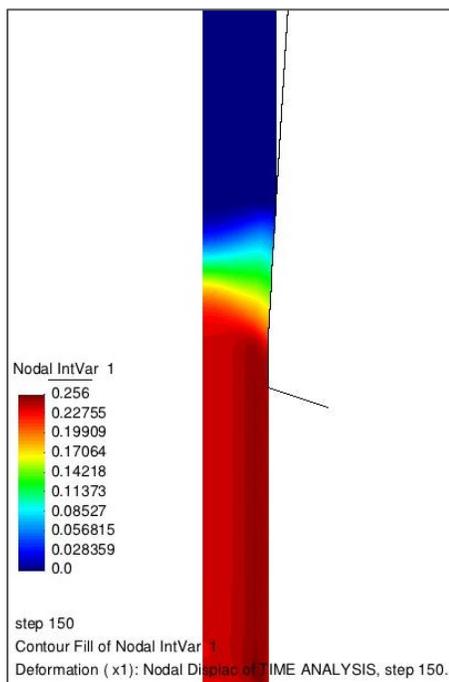
El comportamiento de la deformación plástica es mostrado en las Figuras 4-9 y 4-10. Se puede notar que la deformación plástica en el corte A presenta valores cercanos a cero, ya que en este punto el alambre está entrando al proceso de trefilado y aun no se ha iniciado la deformación.

A partir del corte B puede notarse que se inicia la deformación plástica, debido a que el material se encuentra en contacto con el dado. En este corte el comportamiento de esta variable es casi constante, aunque puede percibirse un aumento a medida que se avanza radialmente, alcanzando su máximo entre los nodos 8 y 9, para luego decaer hacia valores similares a los alcanzados en el eje.



**Figura 4-9: Deformación plástica configuración 1 reducción 21%**

Es claro apreciar que a medida que el material avanza a través del dado, la deformación plástica aumenta. En el corte C ya se alcanza el máximo de deformación en el eje del material. El comportamiento de este corte es similar al anterior, salvo en los nodos cercanos a la superficie (nodos 9-11), donde se produce un decaimiento, alcanzando valores de deformación menores a los alcanzados en el eje del material.



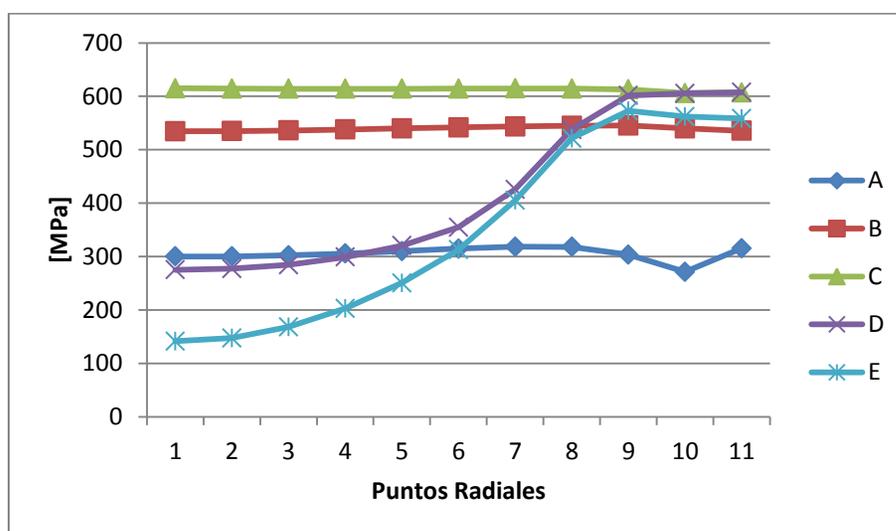
**Figura 4-10: Distribución de la deformación plástica configuración 1 reducción 21%**

Finalmente, en cuanto a los cortes D y E, se puede apreciar que la deformación plástica es similar, debido a que las curvas son coincidentes. La tendencia radial coincide con la mostrada en los cortes anteriores, aunque la disminución observada al llegar a la superficie es menor. A esta altura del proceso se ha alcanzado la deformación programada por la reducción de área. El comportamiento de estos cortes indica que el material no continúa deformándose después de abandonar el dado, por lo que pueden descartarse estricciones y posibles cortes.

El comportamiento de la tensión de von Mises en los diferentes cortes se puede apreciar en la Figura 4-11.

Los valores alcanzados para la tensión de von Mises en el corte A presentan un comportamiento casi constante en toda la sección del material. De igual manera los cortes B y C presentan un comportamiento similar, aunque los valores alcanzados superan por mucho al corte anterior. Estos valores, al encontrarse por sobre el límite elástico del material, corroboran la deformación plástica mostrada anteriormente (Figura 4-9).

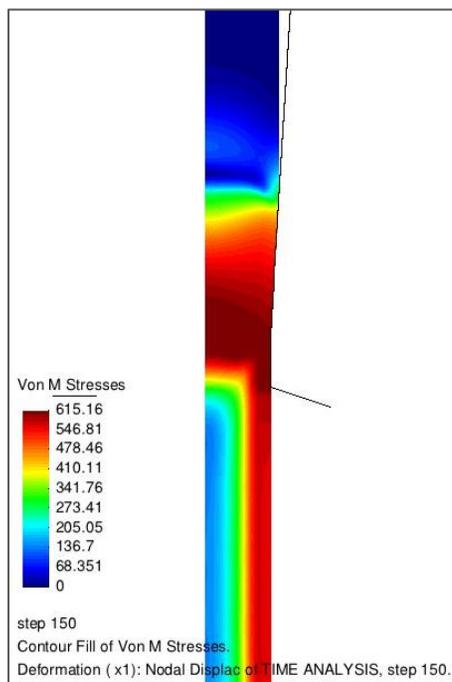
En los cortes D y E, la tensión de von Mises disminuye en las zonas internas del material. Este fenómeno se debe a que en esta zona se produce una descarga elástica, la cual se acentúa a medida que el alambre se aleja de la zona de deformación. En las cercanías de la superficie del alambre (nodos 9-11) la tensión de von Mises se estabiliza, en valores similares a los alcanzados en el corte C, proporcionando al material un nuevo endurecimiento y límite elástico.



**Figura 4-11: Tensión de von Mises configuración 1 reducción 21%**

En el mapa de colores para esta variable (Figura 4-12), puede apreciarse como las tensiones van incrementándose al entrar en la zona de deformación, presentándose a la altura del corte C el estado de mayores tensiones.

Ya en la salida del proceso de trefilado (corte D) puede notarse la estabilización de las tensiones en las zonas externas y la disminución de estas en las zonas internas del material debido a la descarga elástica.



**Figura 4-12: Distribución de la Tensión de von Mises configuración 1 reducción 21%**

A continuación, en la Figura 4-13 y la Figura 4-14 se presenta el comportamiento de la variable de daño obtenida para el primer criterio de evolución.

Los valores alcanzados en los cortes A y B (Figura 4-13), son coincidentes y permiten decir que el daño no se manifiesta en el material hasta más avanzado el proceso de trefilado. Es a partir del corte C que se evidencia la presencia del daño en el material ya que es en este corte donde el daño toma valores positivos. El comportamiento en este corte muestra como el daño aumenta a medida que se avanza radialmente, alcanzando su valor máximo en el nodo 8. A medida que se continúa avanzando hacia la superficie del material, el daño tiende a disminuir, llegando a cero en la superficie.

En cuanto a los cortes D y E el comportamiento es similar y con valores muy similares entre los nodos 1-8. A partir de este nodo se produce un cambio en la tendencia respecto del corte anterior, ya que esta vez el máximo se alcanza en el nodo 9, desde donde se produce una disminución al avanzar radialmente hacia la superficie. A diferencia del corte C, en estos cortes el daño alcanzado en la superficie registra un valor superior al alcanzado en el eje.

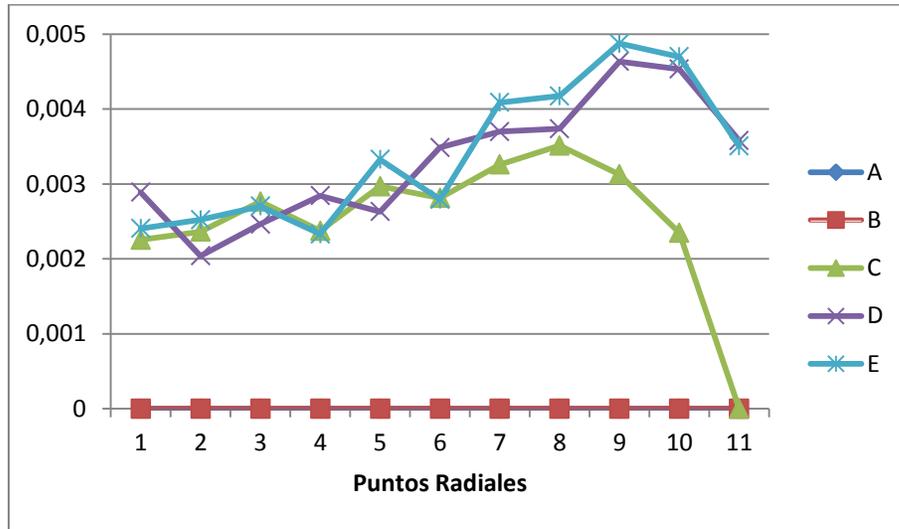


Figura 4-13: Daño con primer criterio de evolución configuración 1 reducción 21%

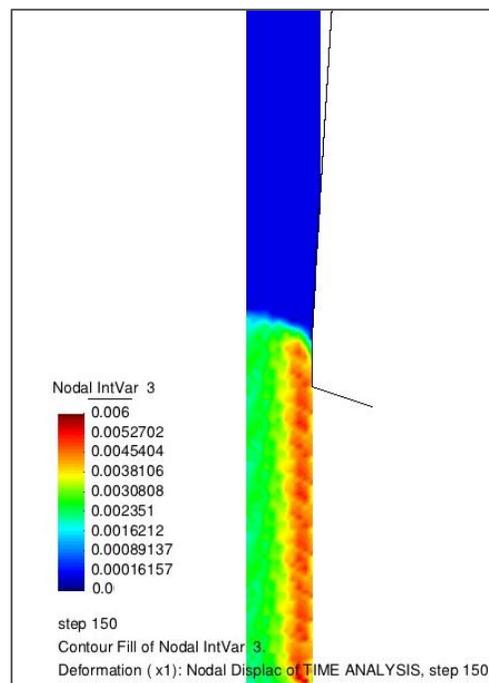


Figura 4-14: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 1 reducción 21%

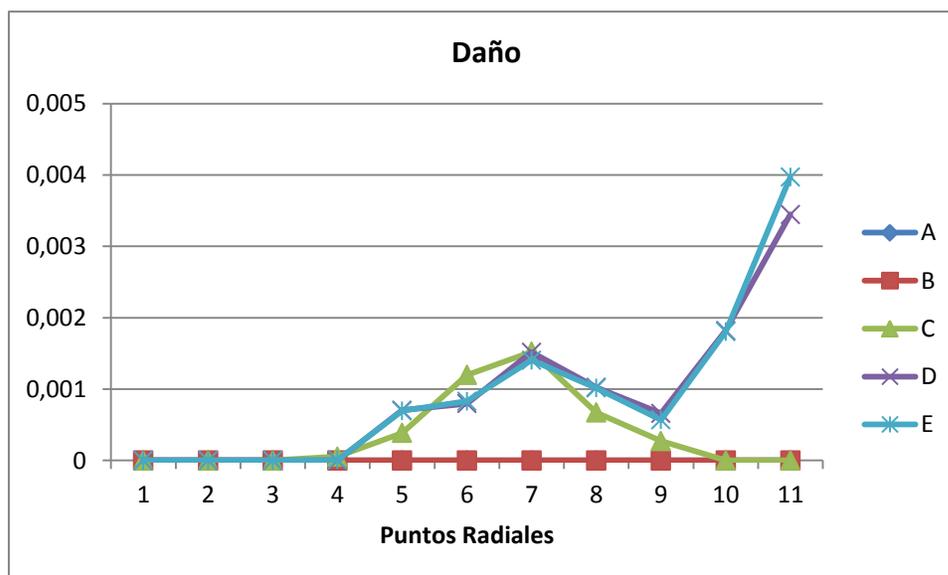
El mapa de colores mostrado en la Figura 4-14, muestra claramente la distribución de esta variable en el alambre. Puede notarse como el daño se manifiesta a

partir del final de la zona de reducción de sección e inicio de la zona muerta. A la salida del dado el alambre presenta un daño, el cual es mayor en la cercanía a la superficie.

Cabe destacar que los valores alcanzados se encuentran muy por debajo del valor crítico de daño, lo cual permite afirmar que el defecto del estallido central no se produce para esta configuración, lo cual concuerda con los ensayos mostrados en [14].

Luego de haber realizado la simulación del proceso de trefilado con el modelo de daño que contempla el primer criterio de evolución, se presenta a continuación el daño obtenido utilizando el segundo criterio de evolución, el cual depende del signo de la presión hidrostática. Las Figuras 4-15 y 4-16 presentan el daño en los diferentes cortes realizados y al mapa de colores respectivamente.

Se puede notar que para los cortes A y B (Figura 4-15) el comportamiento del daño es igual al mostrado utilizando el primer criterio de evolución, no pudiéndose detectar presencia de esta variable.



**Figura 4-15: Daño con segundo criterio de evolución configuración 1 reducción 21%**

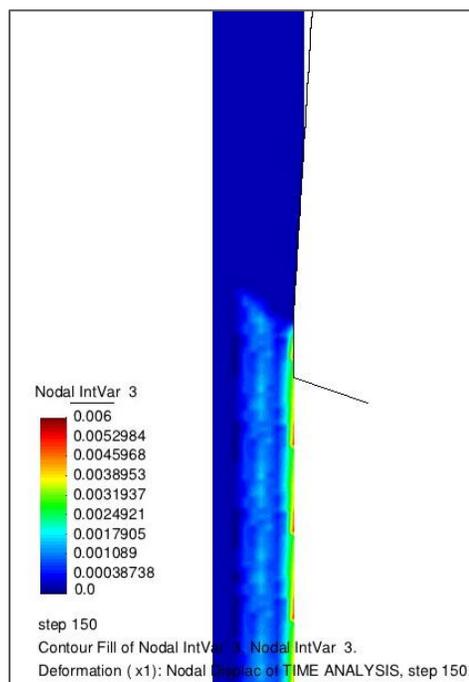
Es a partir del corte C donde se puede notar un leve aumento de los valores del daño. De manera similar a los cortes anteriores en las zonas internas del material no se registra daño, mientras que en la zona entre los nodos 4-10 se produce un aumento,

alcanzando su máximo en el nodo 7, para luego volver a decaer a cero al llegar a la superficie. El daño alcanzado en este corte es mu inferior al que se obtuvo con el primer criterio de evolución, registrando una diferencia promedio del orden del 78%.

En cuanto a los cortes D y E, éstos muestran una tendencia similar entre sí, lo cual revela que el daño se estabiliza a la salida del proceso de trefilado. En estos cortes el daño se manifiesta a partir del nodo 4 pero, a diferencia del corte C, no decae a cero en la superficie, sino que se registra el punto más alto al llegar a ésta.

Si bien, de manera similar al corte anterior, el daño experimentado por el material al simular el proceso utilizando el segundo criterio de evolución entrega valores menores en toda la sección, registrando un decrecimiento del orden del 73% en promedio, es interesante notar que en la superficie el daño alcanzado es muy similar al obtenido utilizando el primer criterio, con una diferencial de 3%.

Complementariamente, el mapa de colores para esta variable (Figura 4-16) permite hacer la comparación entre el daño obtenido con ambos criterios de evolución.



**Figura 4-16: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 1 reducción**

**21%**

Este mapa revela que en el inicio de la zona recta, el daño empieza a desarrollarse de manera similar al obtenido con el primer criterio de evolución. A partir de esta zona se identifica que en las zonas internas del material no se manifiesta daño, mientras que, avanzando radialmente, se percibe la presencia de daño, el cual al llegar a la superficie alcanza su punto máximo. Observando el mapa de colores obtenido con el primer criterio de evolución (Figura 4-14) puede apreciarse como los valores alcanzados con éste son superiores en toda la sección del material.

Cabe destacar que la variable de daño varía su comportamiento, como se esperaba, al imponerse que este se desarrolla solamente ante la presencia de presión hidrostática positiva. La ausencia de deformación plástica en la zona ubicada arriba del corte B y los valores negativos de la presión hidrostática explican que el daño no se manifieste en la misma zona y en las cercanías al eje respectivamente. De la misma manera los altos valores de presión hidrostática en la superficie, a partir del corte C, explican el punto alto que esta variable registra en esta zona.

#### 4.3.1.2 Configuración 2

La segunda configuración ensayada corresponde a un semi ángulo de  $14^\circ$ . Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

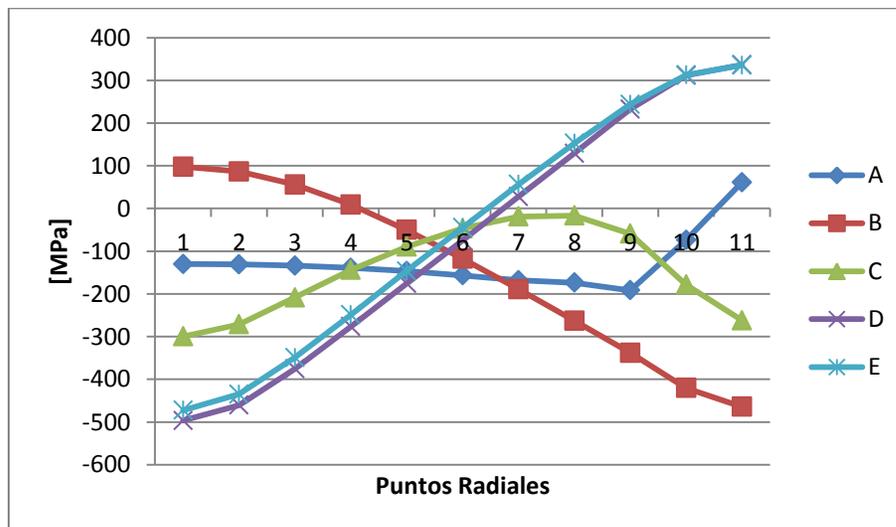


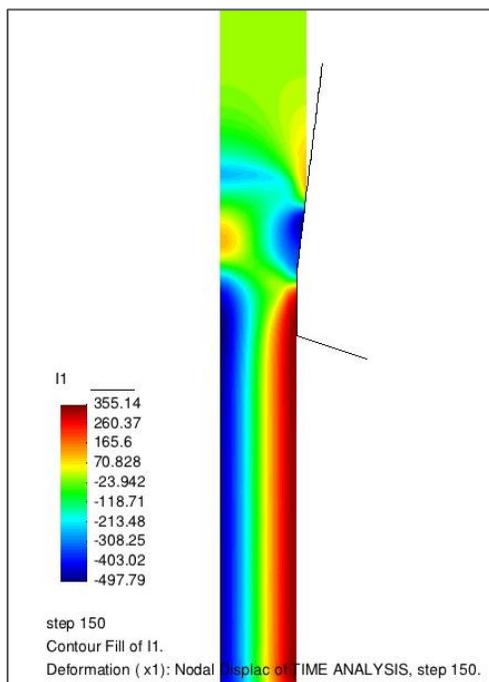
Figura 4-17: Presión hidrostática configuración 2 reducción 21%

Al igual que la configuración anterior, la presión hidrostática en el corte A (Figura 4-17) muestra un estado de compresión en las zonas internas del material y un estado de tracción en la superficie. Cabe destacar que el aumento en el semi ángulo redujo el valor negativo de la presión hidrostática (con un máximo del 46% en el eje) y modificó la tendencia mostrada en este corte, marcando una disminución radial hasta el nodo 9, desde donde aumenta rápidamente hasta convertirse en un estado de tracción en la superficie.

A diferencia de la configuración anteriormente ensayada, la presión hidrostática en el corte B muestra un estado de tracción en las zonas internas del material (nodos 1-4). A medida que se avanza radialmente se produce una disminución de la presión hidrostática, generando un cambio de signo de esta variable. A partir del nodo 5 se identifica un estado de compresión, el cual alcanza su valor más negativo en la superficie del alambre (un 86 % superior al alcanzado con la configuración 1). Este alto estado de compresión superficial se debe a que el alambre entra en la zona de deformación con un ángulo de aproximación mayor.

El corte C muestra valores negativos en el interior del alambre, con un comportamiento similar a la geometría anterior, pero con estados de compresión más altos en el eje y superficie del alambre (registrando un aumento porcentual de 142% y 118% respectivamente).

Finalmente los cortes D y E muestran el mismo comportamiento paralelo entre sí, con un marcado estado de compresión en las zonas internas del material (nodos 1-6) el cual es más intenso que el alcanzado con la configuración anterior, registrando un aumento porcentual de 90% y 51% respectivamente. A partir del nodo 7 se evidencia en el material un estado de tracción el cual aumenta al avanzar hacia la superficie, alcanzando un valor máximo que comparado con la configuración anterior representa un aumento porcentual de 9% y 32% respectivamente.



**Figura 4-18: Distribución de la presión hidrostática configuración 2 reducción 21%**

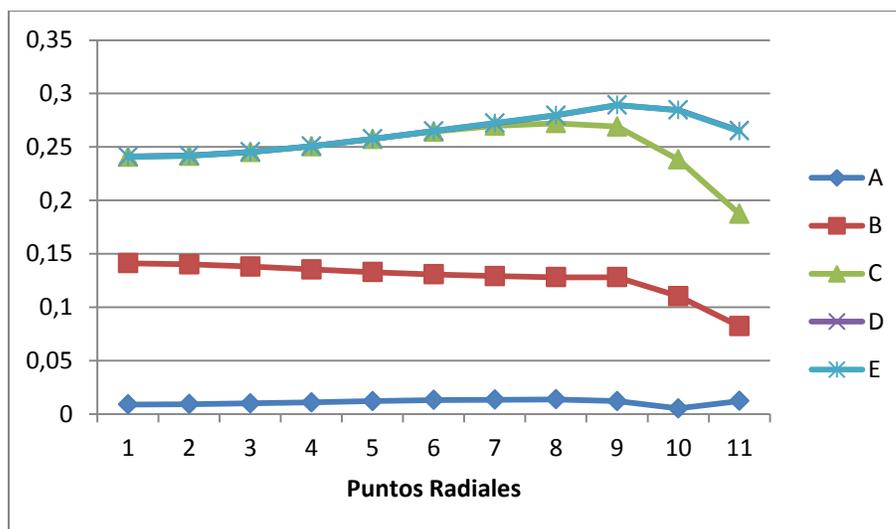
El mapa de colores mostrado en la Figura 4-18, permite apreciar la distribución de la presión hidrostática para esta nueva configuración. Gracias a éste se puede notar que en la zona que se produce la deformación plástica, entre los cortes A y C, se encuentra manifiesta de forma más localizada, un estado de compresión próximo a la superficie del alambre. Además se aprecia la aparición de una burbuja de tracción en la proximidad del eje.

Con respecto al comportamiento de la variable después del corte C, se puede notar una distribución muy similar a la obtenida con la configuración anterior, con estados de compresión en las zonas internas y tracción en las externas mas intensos

El análisis de la deformación plástica obtenida para esta configuración se aprecia en las Figuras 4-19 y 4-20.

En el corte A (Figura 4-19) se evidencia un leve inicio de deformación plástica. En cuanto al el corte B, en éste puede apreciarse un aumento en los valores de la deformación plástica en comparación a la configuración anterior registrando un incremento porcentual máximo del 63% en el eje), debido al aumento en el semi ángulo,

ya que la reducción de área se produce de manera más abrupta. Cabe destacar que para esta configuración, la tendencia mostrada en este corte indica que la deformación plástica tiene su mayor valor en el eje del material, con un decrecimiento a medida que se avanza hacia la superficie.

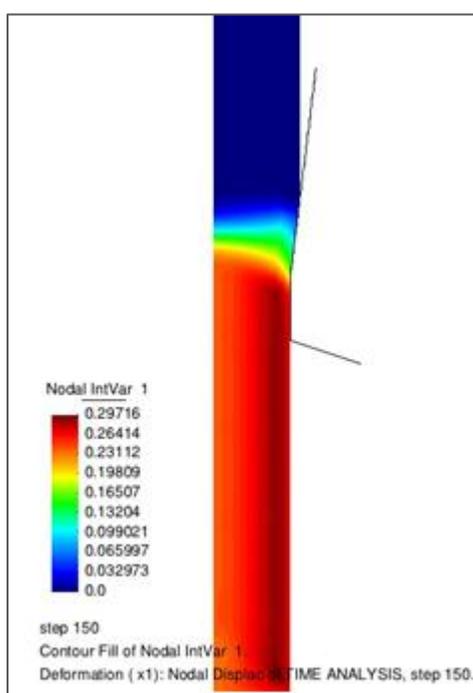


**Figura 4-19: Deformación plástica configuración 2 reducción 21%**

Tanto en el corte C, D y E, el valor de la deformación plástica en el eje del alambre es el mismo (con un incremento porcentual menor al 3% respecto de la configuración anterior) y la tendencia indica un aumento radial, hasta un punto cercano a la superficie, donde decae. En el caso del corte C este decaimiento se produce luego de alcanzar el valor máximo en el nodo 8 (el cual registra un incremento del 13% producto del aumento en el semi ángulo) llegando a alcanzar en la superficie valores inferiores a los experimentados en el eje.

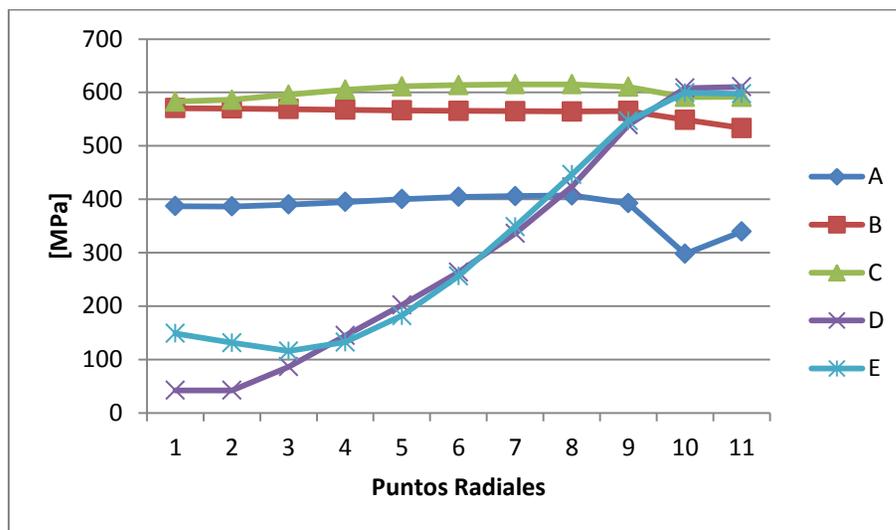
Respecto de los cortes D y E, éstos son coincidentes, lo cual indica que el material no continúa plastificando a la salida del dado. El valor de deformación máximo de deformación se alcanza en el nodo 9 (un 15% mayor que la configuración anterior), para luego registrar una disminución que alcanza valores en la superficie superiores a los alcanzados en el eje.

Observando el mapa de colores de la Figura 4-20 se puede notar que el inicio de la deformación plástica se adelanta axialmente y el aumento en este sentido se acelera al aumento en el semi ángulo de aproximación. Por otra parte se puede apreciar que producto del cambio en la configuración, esta variable va perdiendo su homogeneidad radial, lográndose distinguir una localización de la deformación plástica en una zona cercana a la superficie.



**Figura 4-20: Distribución de la deformación plástica configuración 2 reducción 21%**

Para el análisis de la tensión de von Mises los resultados obtenidos para los diferentes cortes y el mapa de colores se muestran en las Figuras 4-21 y 4-22, respectivamente.



**Figura 4-21: Tensión de von Mises configuración 2 reducción 21%**

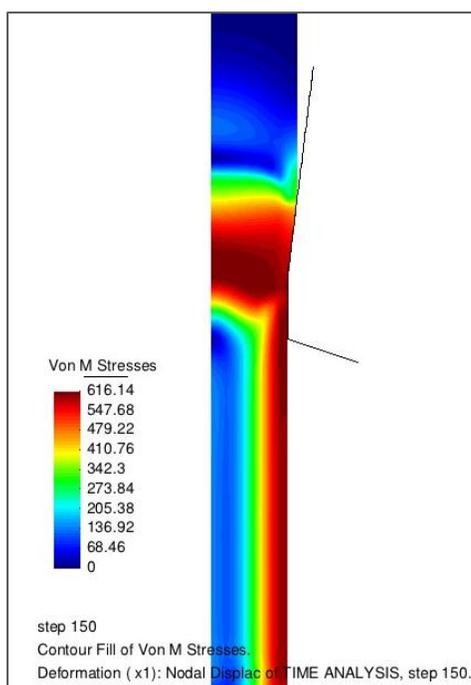
Los valores alcanzados en el corte A (Figura 4-21) experimentan un aumento considerable, producto del cambio en la configuración, en casi toda la sección del material (un 29% en promedio de los nodos 1-9). Los nodos 10 y 11 registran también un incremento pero éste es menor (del orden del 9%). De manera similar, el corte B, registra un incremento en los valores de la tensión de von Mises, aunque este es muy leve (del orden del 5%). Cabe destacar que la tendencia radial del corte A no experimenta cambios, mientras que para el corte B se distingue un decrecimiento en las tensiones a medida que se avanza hacia la superficie, modificando la tendencia mostrada anteriormente.

En cuanto al corte C, en este se alcanzan valores levemente menores al comparar con la configuración anterior, registrándose las mayores diferencias en las zonas internas (no superando el 6%) donde coincide con el corte B (nodos 1-2). La tendencia en este corte es ascendente a medida que se avanza a la superficie, hasta alcanzar un máximo en el nodo 8, para luego decaer.

El comportamiento del material en la salida del proceso de trefilado (corte D) respecto del cambio en la configuración muestra un marcado decrecimiento en los valores de tensión alcanzados. Este decrecimiento es mayor en las zonas internas del material (85% en el eje) y disminuye a medida que se avanza hacia la superficie (10% en

el nodo 9). Al llegar a la superficie (nodos 10-11) la tensión de von Mises registra una leve variación positiva (inferior al 1%). Debido a este comportamiento, se puede apreciar cómo la distribución radial se modifica, aumentando la pendiente de crecimiento de esta variable producto de las bajas tensiones alcanzadas en las zonas internas. Además se aprecia cómo en la superficie, las tensiones superan a las alcanzadas por el corte C.

Finalmente en el corte E se registran una disminución en los valores de las tensiones entre los nodos 2-9, del orden del 20% en promedio, mientras que en el nodo que corresponde al eje del material (nodo 1) y los nodos que corresponden a la superficie (nodos 10 y 11) se registra un incremento de las tensiones en un 5% y 7% respectivamente. Producto de este comportamiento es que partir del nodo 3 este corte alcanza valores similares al corte D (ya que entre los nodos 1-2 registra valores mayores).



**Figura 4-22: Distribución de la tensión de von Mises configuración 2 reducción 21%**

Adicionalmente, en el mapa de colores mostrado en la Figura 4-22, puede notarse como el incremento experimentado por las tensiones en el sentido axial se acelera producto del aumento en el semi ángulo. Además, el mapa de colores permite apreciar cómo a la altura del corte C se registra un estado de altas tensiones, el cual da lugar, a mediados de la zona de paso recto del dado, a una distribución de bajas tensiones en las zonas internas del material (producto de la relajación elástica) y de altas tensiones en las cercanías de la superficie, otorgándole al material un nuevo endurecimiento.

Analizando a continuación el daño experimentado por el material, obtenido utilizando el primer criterio de evolución, se puede observar en la Figura 4-23 los valores alcanzados en los diferentes cortes y en la Figura 4-24 el mapa de colores de esta variable.

En la Figura 4-23, se puede notar que tanto para los cortes A y B, el daño en el material no presenta cambios respecto a la configuración anterior, ya que el aumento en el semi ángulo no produce ningún efecto.

Sin embargo, a partir del corte C, donde el daño se manifiesta, el aumento en el semi ángulo produce un incremento considerable en los valores alcanzados, distinguiéndose zonas en las que alcanza el orden del 150% (entre los nodos 4-9). Cabe destacar que este efecto no modifica la tendencia ascendente mostrada en la configuración anterior, salvo que el máximo de daño se alcanza en el nodo 7, desde el cual comienza a disminuir hacia la superficie.

Un efecto similar, producto del aumento en el semi ángulo, se puede percibir en el daño alcanzado en los cortes D y E, ya que se registra un incremento porcentual del orden del 124% y 112% respectivamente. En cuanto al comportamiento radial de estos cortes se mantiene la tendencia ascendente a medida que se avanza hacia la superficie mostrada en la configuración anterior. El máximo de daño se alcanza al llegar a los nodos 9 y 10 respectivamente, desde los cuales se produce en decaimiento al llegar a la superficie.

Cabe destacar que pese al gran aumento porcentual experimentado por esta variable el daño en el material se encuentra muy por debajo del punto crítico, no

produciéndose el defecto del estallido central, siendo consistente con los resultados obtenidos en [14].

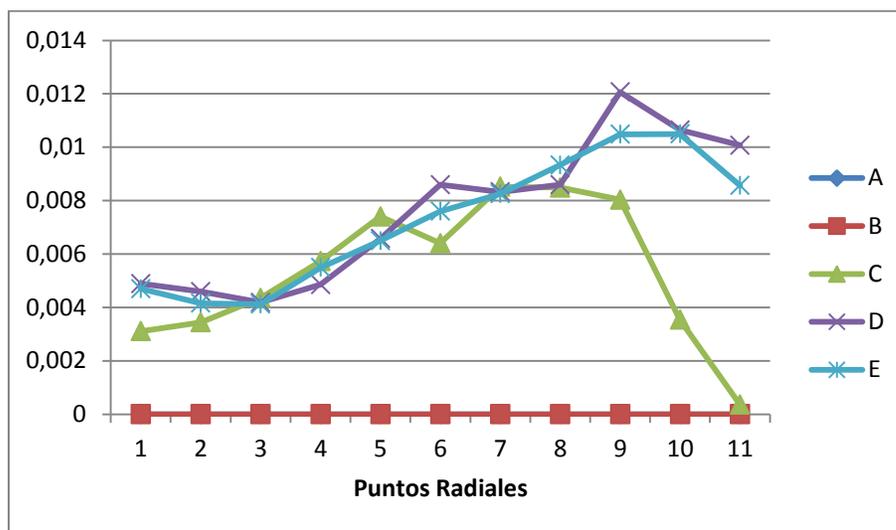


Figura 4-23: Daño con primer criterio de evolución configuración 2 reducción 21%

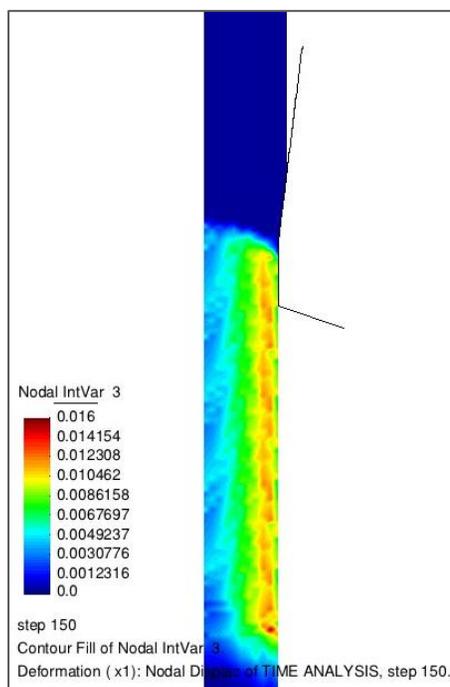
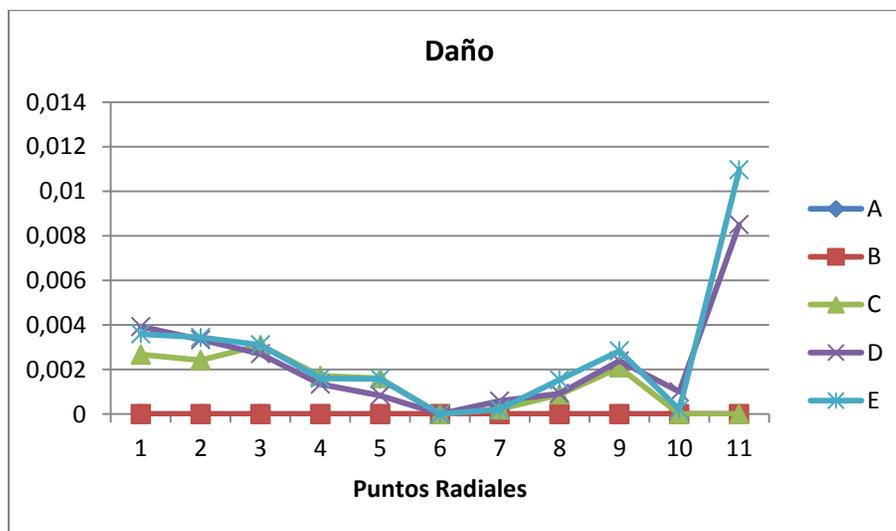


Figura 4-24: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 2 reducción 21%

Complementariamente a lo observado en los cortes, en la Figura 4-24 se aprecia el mapa de colores para la distribución del daño en el material. Gracias a este mapa se puede distinguir cómo el daño comienza a desarrollarse a partir del fin de la zona de deformación (corte C). Desde esta etapa del proceso el daño alcanza su máximo en una zona cercana a la superficie y evidencia un comportamiento secuencial en el sentido axial.

Luego de observar los resultados entregados por la simulación del proceso utilizando el primer criterio de evolución de daño, se muestra a continuación en las Figuras 4-25 y 4-26 el daño obtenido utilizando el segundo criterio de evolución.



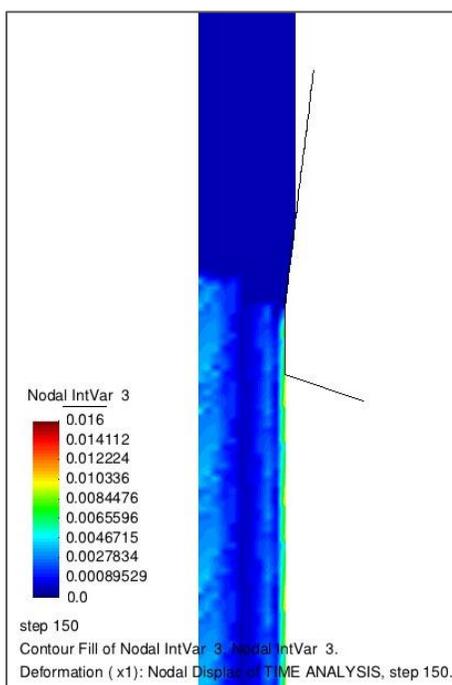
**Figura 4-25: Daño con segundo criterio de evolución configuración 2 reducción 21%**

En la Figura 4-25 se puede apreciar cómo tanto en el corte A como en el corte B el comportamiento del daño es consistente con el obtenido en la configuración anterior y con el obtenido utilizando el primer criterio de evolución.

Es a partir del corte C donde se puede apreciar el inicio de la manifestación del daño. Es interesante notar cómo en el eje de material el daño obtenido utilizando el segundo criterio de evolución es similar al obtenido utilizando el primer criterio, registrando una variación del 14%. A medida que se avanza radialmente esta diferencia se acrecenta debido a que el daño obtenido con el segundo criterio muestra una

tendencia a disminuir hacia la superficie, llegando a cero en el nodo 6. Sin embargo se puede apreciar que entre los nodos 6-10 nuevamente se observa manifestación del daño, sin embargo en esta sección no se alcanzan valores mayores.

Se distingue en la Figura 4-25 que tanto el corte D como el E tienen alcanzan valores y tienen un comportamiento radial similar al corte C en toda la sección del material, salvo en la superficie. Es en este punto donde los cortes D y E registran el máximo valor de daño. Al comparar estos valores máximos con los alcanzados al utilizar el primer criterio de evolución en el mismo nodo, se puede decir que el corte D registra un daño menor, con una diferencia del 16%, mientras que el daño alcanzado en el corte E es mayor, con una diferencia del 28%.



**Figura 4-26: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 2 reducción 21%**

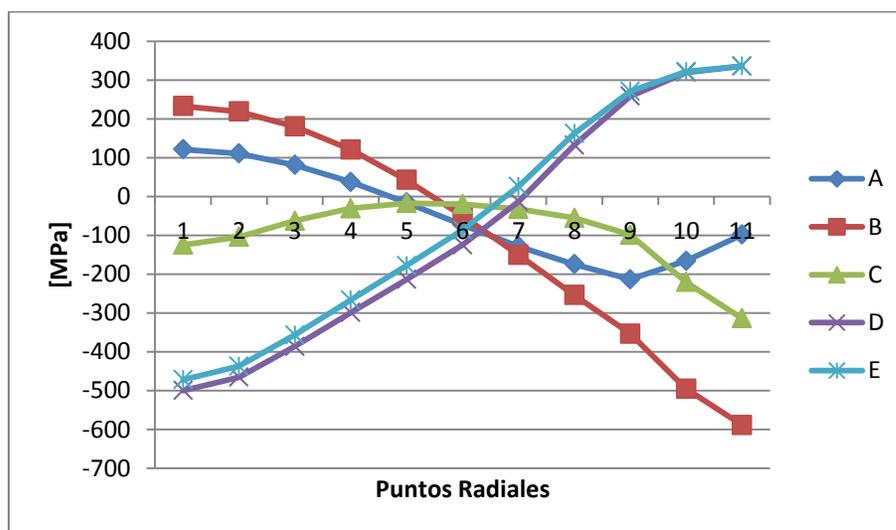
De manera de poder realizar una mejor comparación entre el daño obtenido con ambos criterios de evolución, la Figura 4-26 muestra el mapa de colores con el daño obtenido con el segundo criterio de evolución. Se puede apreciar en este mapa de colores

como el daño se manifiesta a partir de inicio del paso recto (corte C). Además se puede observar que el daño obtenido con el segundo criterio se manifiesta en forma secuencial, tanto en el sentido radial como en el axial, quedando este primer comportamiento reflejado en los cortes mostrados en la Figura 4-25.

De manera similar a la configuración anterior se esperaba que el variable de daño experimentara una variación en su comportamiento al imponerse que este se desarrolla solamente ante la presencia de presión hidrostática positiva. El efecto logrado muestra cómo el daño cambia su distribución radial, evidenciándose desarrollo en el eje (similar al obtenido con el primer criterio de evolución) y en la superficie del material, manteniéndose siempre muy por debajo del punto crítico.

#### 4.3.1.3 Configuración 3

La tercera configuración ensayada corresponde a un semi ángulo de  $21^\circ$ . Los resultados obtenidos se muestran a continuación.



**Figura 4-27: Presión hidrostática configuración 3 reducción 21%**

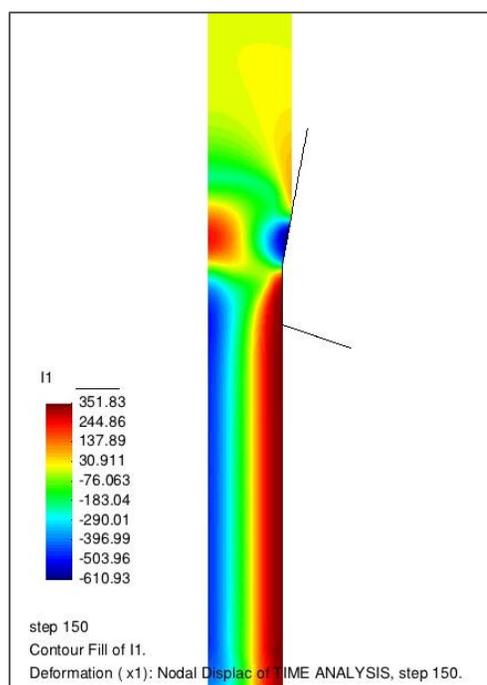
Observando la Figura 4-27, la presión hidrostática en el corte A y B presenta un estado de tracción en las zonas internas, mientras que en la superficie, producto de la disminución radial que evidencia esta variable, se genera un estado de compresión. Al

igual que anteriormente, el aumento en el semi ángulo produjo un incremento en la presión hidrostática experimentada por el material en las zonas internas, originando un cambio de estado.

Con respecto al corte B puede notarse que producto del aumento en el semi ángulo, los valores de la presión hidrostática obtenidos indican un aumento en la intensidad de los estados de tracción y compresión, con variaciones porcentuales de 138% y 27% respectivamente.

El corte C mantiene un comportamiento similar a las configuraciones previas, con valores siempre negativos radialmente. Sin embargo, a diferencia de los valores obtenidos con los semi ángulos de 7 y 14°, en el eje se evidencia un estado de compresión menor al experimenta el material en la superficie.

Finalmente los cortes D y E muestran el mismo comportamiento paralelo que las configuraciones anteriores, con valores similares.



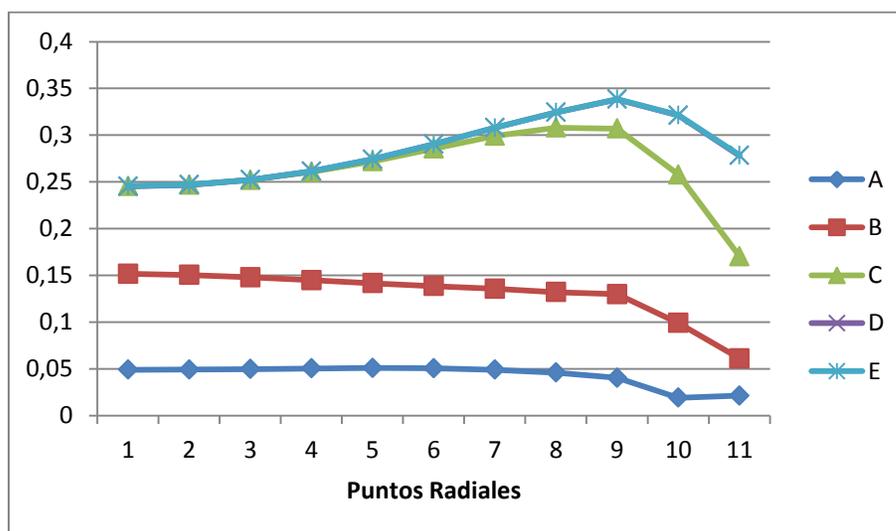
**Figura 4-28: Distribución de la presión hidrostática configuración 3 reducción 21%**

Gracias al mapa de colores, mostrado en la Figura 4-28, puede notarse que en el corte A, o sea, la zona en la cual se produce el contacto entre el dado y el alambre, se experimentan presiones positivas en las zonas internas, produciéndose una burbuja de tracción, la cual se extiende por la zona comprendida entre los cortes A y C. Es claro notar que el aumento en el semi ángulo genera una intensificación de este estado de tracción y amplía su alcance.

Se puede apreciar además que, complementando lo observado en el corte B de la Figura 4-27, el estado de compresión experimentado en la superficie producto de la interacción entre el dado y el alambre es más intenso y localizado a medida que se aumenta el semi ángulo.

En cuanto a la zona en la que el material ya salió del dado, el comportamiento de la presión hidrostática es consistente con la configuraciones anteriores, notándose bien definidas las zonas de compresión en las zonas internas del material y de tracción en la superficie.

La deformación plástica experimentada por el material, para esta configuración, se aprecia en las Figuras 4-29 y 4-30.

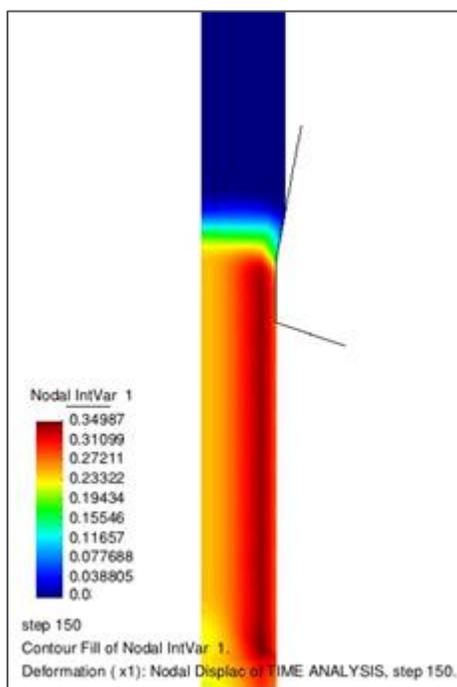


**Figura 4-29: Deformación plástica configuración 3 reducción 21%**

En el corte A (Figura 4-29) se evidencia un inicio en la deformación plástica, con un aumento porcentual del orden del 300% en toda la sección. De igual manera en el corte B se produce un aumento en los valores de deformación alcanzados, del orden del 6%, salvo en los nodos 10 y 11, donde se registra una disminución del orden del 20% en promedio. Este comportamiento mantiene la tendencia mostrada por el corte en la configuración anterior.

Respecto a la deformación plástica en los cortes C, D y E, nuevamente coinciden en el eje, alcanzando un valor similar a la configuración anterior (registrando un incremento inferior al 2%), evidenciando un comportamiento radial ascendente hasta alcanzar un máximo para luego decaer hacia la superficie. Este valor máximo es alcanzado por los tres cortes en el nodo 9 (registrando un incremento del 17% producto del cambio en la configuración).

El comportamiento del decaimiento en estos cortes es similar al obtenido utilizando la configuración anterior, alcanzando valores mínimos similares (variación porcentual inferior al 5%).



**Figura 4-30: Distribución de la deformación plástica configuración 3 reducción 21%**

Teniendo en cuenta el mapa de colores de la Figura 4-30 se puede notar el inicio de la deformación plástica cercano a la región marcada por el corte A. Además es posible apreciar cómo el aumento en el sentido axial de la deformación se acelera producto del aumento en el semi ángulo.

Por otra parte es interesante notar cómo otro efecto del incremento en el semi ángulo es el aumento en la variación radial de la deformación a partir del inicio de la zona recta (corte C) y cómo aumenta la localización de esta variable en una zona cercana a la superficie.

Los resultados obtenidos para la tensión de von Mises se aprecia en las Figuras 4-32 y 4-33.

Debido al aumento en el semi ángulo, en el corte A nuevamente se registra un incremento en las tensiones alcanzadas en toda la sección, siendo en promedio del orden del 21%, a excepción del nodo correspondiente a la superficie, donde el incremento es de apenas un 2%. Este comportamiento de las tensiones produce que los valores alcanzados en el eje se acerquen a los alcanzados en las etapas siguientes del proceso y que la tendencia radial en este corte sea decreciente a medida que se acerca a la superficie (tendencia la cual se aprecia claramente a partir del nodo 9).

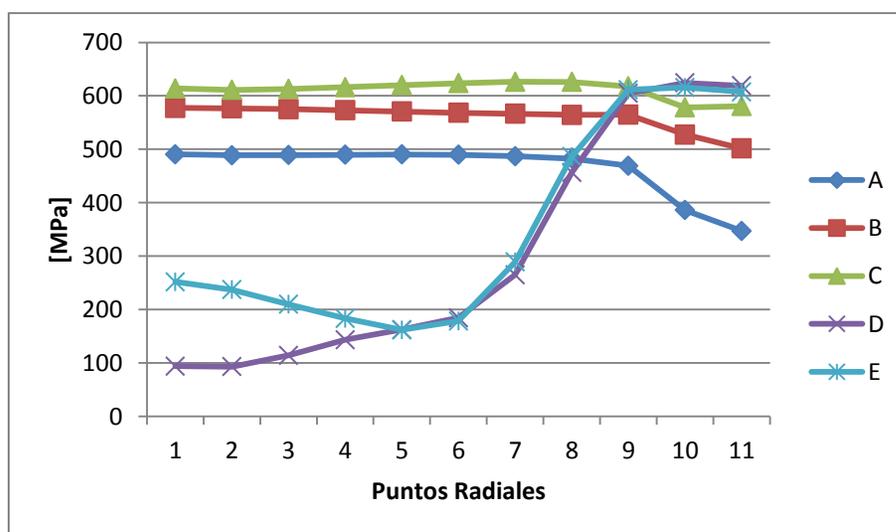
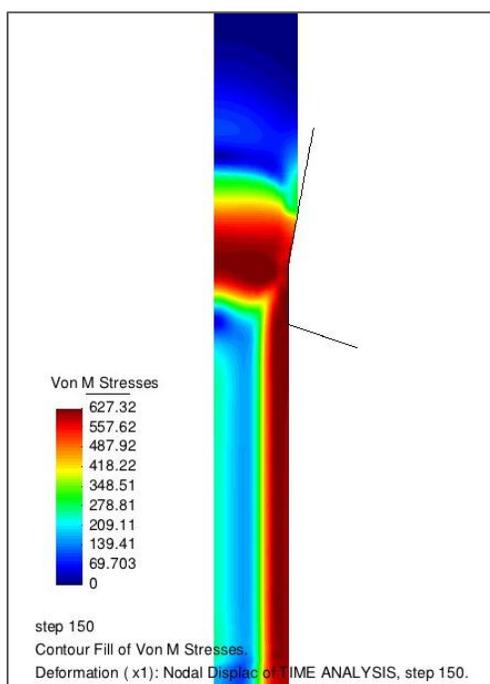


Figura 4-31: Tensión de von Mises configuración 3 reducción 21%

En cuanto al corte B no se aprecia un incremento considerable en las tensiones alcanzadas ya que el orden de este es inferior al 1%. Un comportamiento diferente se aprecia en los nodos cercanos a la superficie (nodos 10 y 11) donde se registra un decrecimiento en los valores de las tensiones del orden del 5%. De esta manera la tensión de von Mises en este corte presenta un comportamiento similar a la configuración anterior, salvo en los nodos correspondientes a la superficie, donde se distingue claramente el decrecimiento producto del aumento en el semi ángulo antes mencionado.

Para las tensiones alcanzadas en el corte C, se aprecia un leve aumento para los nodos 1-9, siendo este no superior al 3% en promedio, mientras que para los nodos 10 y 11 se experimenta una reducción del orden del 2%. Gráficamente se puede notar que el comportamiento de este corte no muestra una tendencia marcada ya que es casi constante radialmente, salvo en la superficie donde los valores corresponden al mínimo alcanzado en la sección.

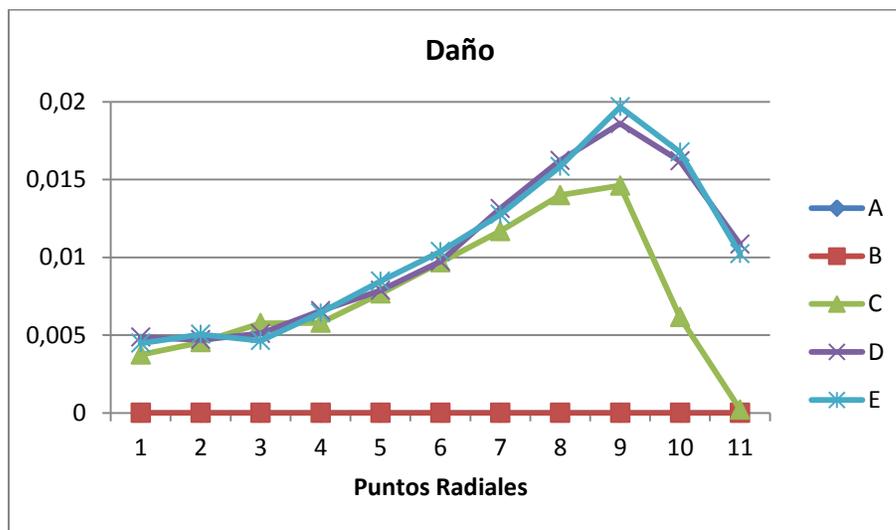


**Figura 4-32: Distribución de la tensión de von Mises configuración 3 reducción 21%**

Respecto al corte D, el efecto que genera el aumento en el semi ángulo en las tensiones alcanzadas en las zonas internas del material (nodos 1-3) es opuesto al evidenciado con la configuración anterior, ya que en estos tres nodos se experimenta un incremento del orden del 90% en promedio. Sin embargo, de todas maneras la tensión de von Mises es menor que la alcanzada al realizar el proceso de trefilado con la primera configuración. Para los nodos siguientes (nodo 4-7) el aumento en el semi ángulo significa una reducción de las tensiones, siendo este del orden del 18% en promedio, mientras que en las cercanías de la superficie (nodos 8-11) nuevamente se aprecia un aumento en las tensiones (del 6% en promedio). De esta manera, si bien la tendencia radial de esta variable evidencia un aumento en toda la sección, se perciben dos pendientes diferentes.

Por último en el corte E, se evidencia un comportamiento similar al mostrado por el anterior, registrándose un incremento de las tensiones entre los nodos 1-4, del orden del 67%. Avanzando radialmente, entre los nodos 5-8 se registra un decrecimiento en las tensiones del orden del 20%, mientras que al llegar a la superficie del material (nodos 8-11) nuevamente se percibe un incremento en las tensiones, esta vez del orden del 6% en promedio. Cabe destacar que, de manera similar a la configuración anterior, la tensión de von Mises en este corte se asemeja a la alcanzada en el corte D desde el nodo 5, ya que hasta antes de este nodo es mayor.

De manera complementaria, en el mapa de colores mostrado en la Figura 4-32, puede notarse como las tensiones aumentan en el sentido axial de manera más acelerada producto del aumento en el semi ángulo. Además, este mapa de colores permite apreciar como a la altura del corte C el estado de altas tensiones comienza a localizarse, de igual manera que en las cercanías de la salida del dado (corte D) se localiza una zona de bajas tensiones. Finalmente, el comportamiento de las tensiones una vez que el alambre ha abandonado el dado refleja un estado de bajas tensiones en las zonas internas producto de la relajación elástica y un estado de altas tensiones en la superficie, brindándole al material un nuevo endurecimiento.



**Figura 4-33: Daño con primer criterio de evolución configuración 3 reducción 21%**

Para el análisis del daño experimentado por el material, se puede observar en las Figuras 4-33 y 4-34 los valores alcanzados en los diferentes cortes y el mapa de colores de esta variable respectivamente, para el primer criterio de evolución.

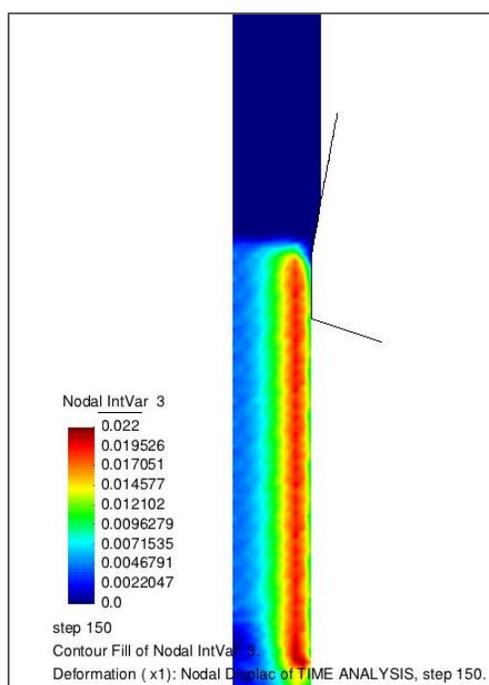
De manera similar a la configuración anterior, en la Figura 4-33, puede observarse que tanto el corte A como el corte B, el daño en el material no se manifiesta. De esta manera se puede decir que el aumento en el semi ángulo no produce ningún efecto.

Debido a que es en el corte C donde el daño empieza a manifestarse, es en este corte en donde comienza a apreciarse el efecto del aumento en el semi ángulo. El efecto que el cambio en la configuración produce es un incremento en el daño alcanzado en el material, el orden del 40% en promedio de toda la sección, salvo la superficie, donde se experimenta un decrecimiento del mismo orden. Cabe destacar que el máximo aumento se registra en el nodo 9, siendo este del 82%, convirtiéndose a su vez en el nodo donde se registra el mayor daño en este corte.

En cuanto a los cortes D y E, el efecto del aumento en el semi ángulo produce un incremento de los valores de daño alcanzados del orden del 35% y 41% en promedio de la sección, a excepción del nodo correspondiente al eje, donde en ambos cortes se registran leves disminuciones del orden del 0,5% y 4%, respectivamente. De la Figura 4-

33 puede desprenderse además, que tanto el corte C como los cortes D y E registran valores de daño similares en el eje, compartiendo los tres un crecimiento radial hasta llegar al máximo alcanzado en el nodo 9, para luego decaer.

De manera similar a lo evidenciado con la configuración anterior, pese al aumento porcentual experimentado por esta variable, el daño en el material se encuentra muy por debajo del punto crítico, no produciéndose el defecto del estallido central, lo cual es consistente con los resultados obtenidos en [14].



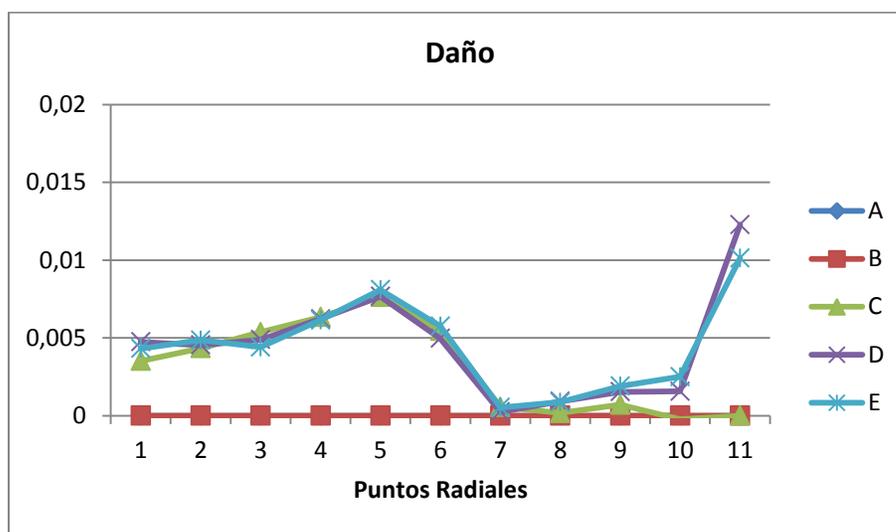
**Figura 4-34: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 3 reducción 21%**

En la Figura 4-34, donde se aprecia el mapa de colores para la distribución del daño en el material, se puede apreciar como nuevamente es a partir del fin de la zona de deformación (corte C) donde comienza a desarrollarse el daño. Además se puede distinguir claramente cómo el daño se distribuye radialmente, registrando valores muy pequeños en comparación con el máximo alcanzado en una zona cercana a la superficie. Esto coincide con el comportamiento de la deformación plástica observado en la Figura 4-30. Por otra parte es interesante notar cómo el daño evidencia un comportamiento

secuencial en el sentido axial, aunque este último menos marcado que la configuración anterior.

Luego de observar los resultados entregados por la simulación del proceso utilizando el primer criterio de evolución de daño, en la Figura 4-35 y en la Figura 4-36 se muestra el comportamiento en los diferentes cortes y el mapa de colores para el daño obtenido utilizando segundo criterio de evolución.

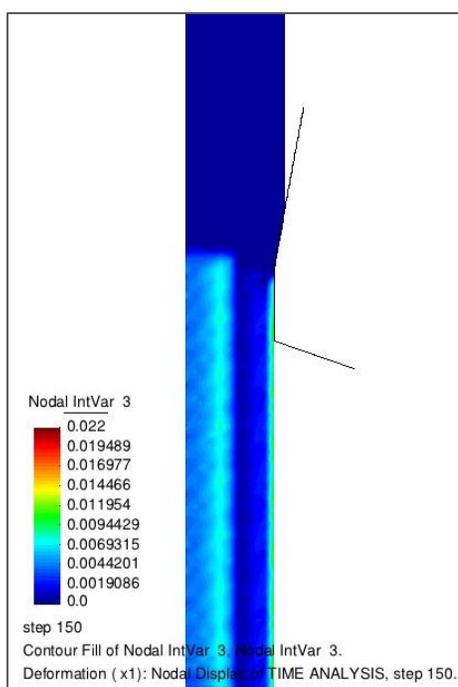
De manera consistente con la configuración anterior y con los resultados obtenidos con el primer criterio de evolución, en la Figura 4-35 se puede apreciar cómo no se manifiesta daño en los cortes A y B utilizando el segundo criterio de evolución.



**Figura 4-35: Daño con segundo criterio de evolución configuración 3 reducción 21%**

Nuevamente es a partir del corte C donde se puede apreciar la manifestación del daño. Es interesante notar que para esta configuración las diferencias en el daño alcanzado en las zonas internas del material (nodos 1-5) son inferiores al 10% entre los criterios de evolución (distinguiéndose incrementos y decrecimientos). De manera similar a la configuración anterior esta diferencia aumenta al avanzar hacia la superficie, debido a que la tendencia radial del daño obtenido con el segundo criterio de evolución es decreciente, alcanzando el cero en el nodo 7, evidenciándose leves registros de daño al acercarse a la superficie.

Respecto a los corte D y E, éstos muestran valores y tendencias similares al corte C, salvo en la superficie donde se registra el mayor desarrollo del daño obtenido utilizando el segundo criterio de evolución. Es interesante notar que en las zonas internas del material (nodos 1-5) el daño experimentado con ambos criterios es muy similar, disminuyendo sus diferencias porcentuales, siendo inferiores al 5%. De la misma manera que en el corte anterior, esta diferencia aumento en el resto de la sección y sólo llegando a la superficie vuelve a disminuir, registrándose variaciones del 13% e inferiores al 1% para los cortes D y E respectivamente.



**Figura 4-36: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 3 reducción 21%**

En la Figura 4-36 se muestra el mapa de colores para el daño obtenido con el segundo criterio de evolución. Gracias a este mapa se puede apreciar cómo el daño se manifiesta a partir de una zona cercana al inicio del paso recto. Además, es claro notar que el daño obtenido al simular el proceso de trefilado utilizando el segundo criterio de evolución se localiza en las zonas internas del material, alcanzando valores similares a

los obtenidos al utilizar el primer criterio de evolución, y en la superficie, donde se aprecia el mismo fenómeno.

De manera similar a la configuración anterior al imponerse que el daño se desarrolle solamente ante la presencia de presión hidrostática positiva se modifica su comportamiento radial, eliminándose el desarrollo explosivo que se manifestaba en una zona cercana a la superficie (Figura 4-34). Por último es interesante notar cómo el daño conserva un comportamiento secuencial en el sentido axial, y se manteniéndose siempre por debajo del punto crítico.

#### 4.3.1.4 Configuración 4

La configuración ensayada a continuación corresponde a un semi ángulo de  $28^\circ$ , para la cual el comportamiento de las variables se muestra a continuación.

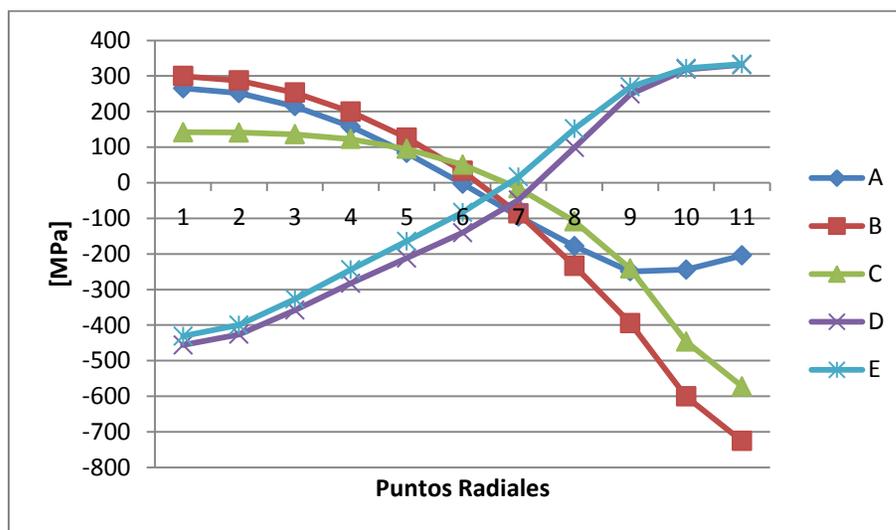
Analizando la Figura 4-37, la presión hidrostática en el corte A, B y C presenta un estado de tracción en las zonas internas y compresión en la superficie. Es claro apreciar que el aumento en el semi ángulo de aproximación produce un incremento en la presión hidrostática experimentada por el material en las zonas internas, lo cual, en esta ocasión, genera que el corte C experimente un estado de tracción.

En cuanto los valores alcanzados por el corte A, se puede notar un aumento porcentual de 119% en el eje y de 108% en la superficie, indicando un gran aumento de intensidad en los estados de tracción y compresión. Por otra parte el corte B presenta variaciones porcentuales de 29% y 23% en el eje y la superficie respectivamente, lo cual también indica, pero en menor grado, un aumento en la intensidad de los estados de presiones.

Respecto al comportamiento del corte C cabe destacar que los valores obtenidos en las zonas externas son más negativos a medida que aumenta el semi ángulo, con un aumento porcentual máximo del 143% en el nodo 9.

Finalmente los cortes D y E no muestran alteración en su comportamiento respecto de las configuraciones anteriores. En cuanto a los valores alcanzados, se puede distinguir que el aumento en el semi ángulo produce que en las zonas internas del

material disminuya la intensidad del estado de compresión, con una variación del orden del 9% para ambos cortes.



**Figura 4-37: Presión hidrostática configuración 4 reducción 21%**

Complementariamente, en el mapa de colores mostrado en la Figura 4-37, puede notarse cómo la burbuja de tracción que se aprecia en las zonas internas del material en la zona entre los cortes A y C aumenta su intensidad y su cobertura.

Además, respecto a la burbuja de compresión experimentada en la superficie del material a la altura del cote B se localiza aún más y alcanza valores más negativos producto del aumento en el semi ángulo.

En las Figuras 4-39 y 4-40, se puede apreciar el comportamiento de la deformación plástica experimentada por el material.

Es claro notar que para esta configuración el inicio de la deformación plástica se adelanta al corte A, donde se registran valores similares a los obtenidos en el corte B de la primera configuración ensayada. Estos valores significan un incremento porcentual del orden del 80% promedio en la sección producto del aumento en el semi ángulo.

En cuanto al corte B, el aumento en los valores de la deformación plástica (del orden del 50% en promedio de la sección) produce que entre los nodos 1-9 esta variable tenga un comportamiento radial casi constante y el valor alcanzado en las zonas internas

del material se acerquen al corte C. Sin embargo entre los nodos 9 y 11 se registra un gran decaimiento en los valores de la deformación plástica.

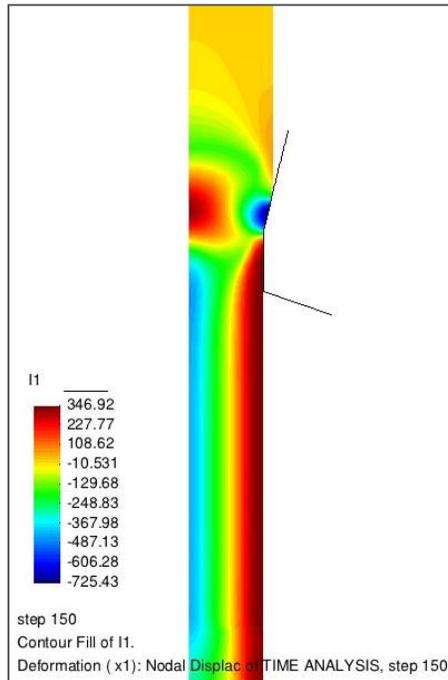


Figura 4-38: Distribución de la presión hidrostática configuración 4 reducción 21%

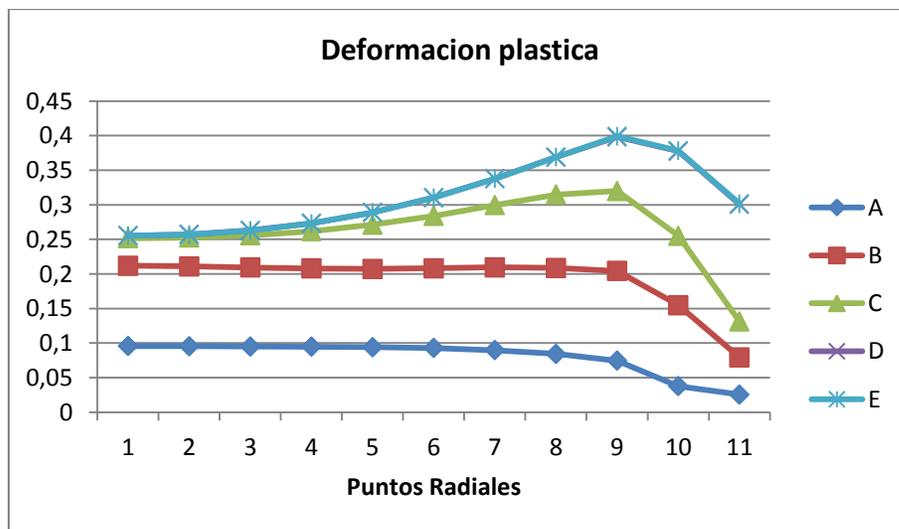
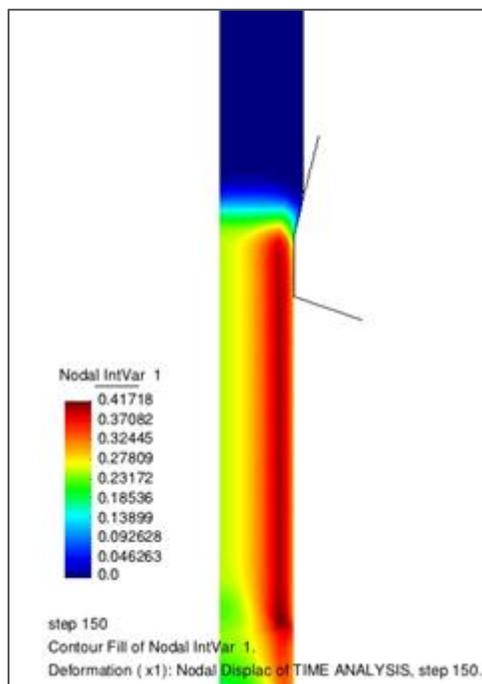


Figura 4-39: Deformación plástica configuración 4 reducción 21%

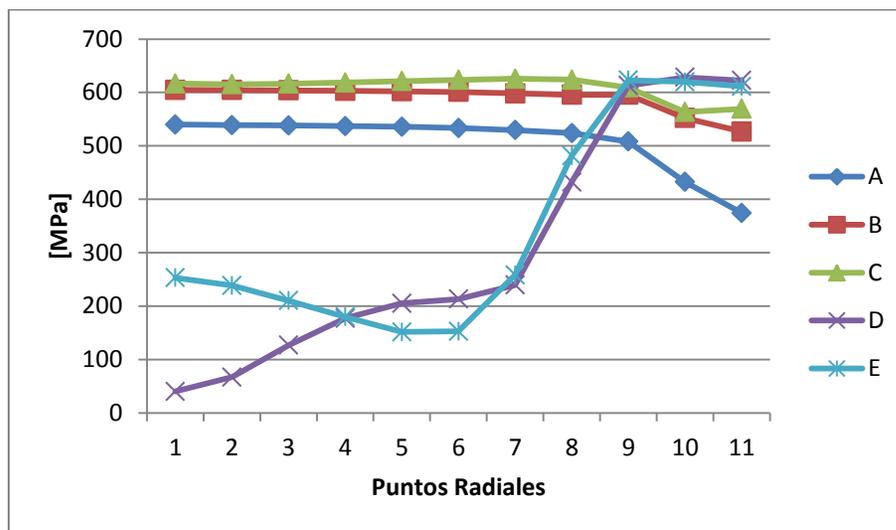
En los cortes C, D y E, se puede apreciar cómo la deformación plástica en el eje es la misma para los tres cortes. Sin embargo, a medida que se avanza radialmente, los cortes D y E, que entre sí registran los mismos valores, experimentan un incremento mayor que el corte C, el cual incluso en algunos nodos registra una disminución (nodo 11 experimenta una disminución del 22%). Pese a esto el comportamiento de los tres cortes se mantiene, alcanzando valores máximos en el nodo 9 que registran un aumento del 4% en el corte C y del 18% en los cortes D y E respecto de la configuración anterior.

De manera complementaria, observando el mapa de colores de la Figura 4-40, se puede notar cómo el adelanto del inicio de la deformación plástica al corte A. Además, de manera similar a las configuraciones anteriores, el aumento en el semi ángulo genera un aumento en la variación radial de la deformación plástica para los cortes a partir de la zona recta y aumenta la localización de esta variable en una zona cercana a la superficie



**Figura 4-40: Distribución de la deformación plástica configuración 4 reducción 21%**

Para la tensión de von Mises, en las Figuras 4-41 y 4-42 se aprecian los cortes realizados al material y el mapa de colores respectivamente.



**Figura 4-41: Tensión de von Mises configuración 4 reducción 21%**

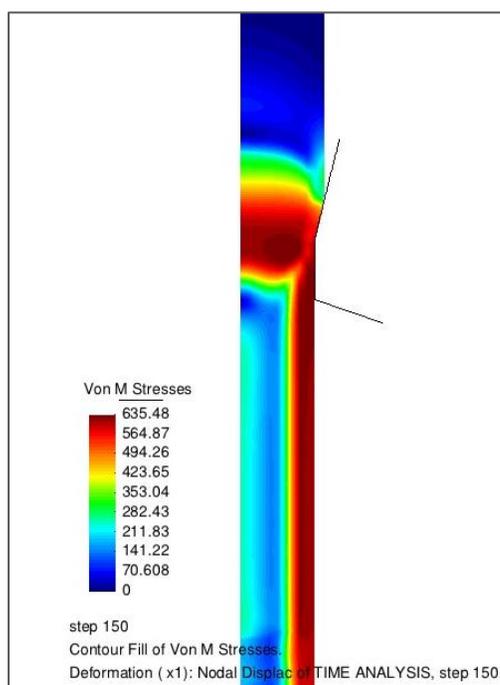
En la Figura 4-41, se puede apreciar cómo en el corte A el aumento en el semi ángulo produce un incremento en los valores de las tensiones, esta vez de un orden menor al registrado por las configuraciones anteriores (9%). De esta manera en las zonas internas del material se alcanzan tensiones muy similares a las alcanzadas en las etapas siguientes del proceso. Por otra parte, debido al incremento constante que experimenta esta variable, la tendencia radial no se modifica respecto de la configuración anterior.

Respecto a la tensión de von Mises en el corte B, se registra un incremento constante en los valores alcanzados del orden del 5% en toda la sección, manteniendo una tendencia similar a la configuración anterior. Además si se tiene en cuenta comportamiento de las tensiones en el corte C, donde se experimentan levas variaciones producto del aumento en el semi ángulo (incremento inferior al 0,5% en los nodos 1-6 y decrecimiento inferior al 1,5% en el resto de la sección), se puede apreciar que estos cortes se alcanzan valores de tensiones similares.

En cuanto al corte D, se puede decir que el aumento en el semi ángulo genera diferentes efectos a lo largo la sección del material. Incrementos importantes se registran entre los nodos 3-6, siendo del orden del 20%, mientras que entre los nodos 9-11 el aumento experimentado es apenas inferior al 1%. De la misma manera se produce un

decaimiento en las tensiones alcanzadas entre los nodos 1-2 y entre los nodos 7-8, siendo respectivamente del orden del 42% y 8%.

Sin embargo, estos cambios no producen grandes modificaciones en la tendencia mostrada por este corte, ya que se mantiene un aumento radial sostenido, distinguiéndose dos pendientes, para luego entre los nodos 9-11 permanecer constante.



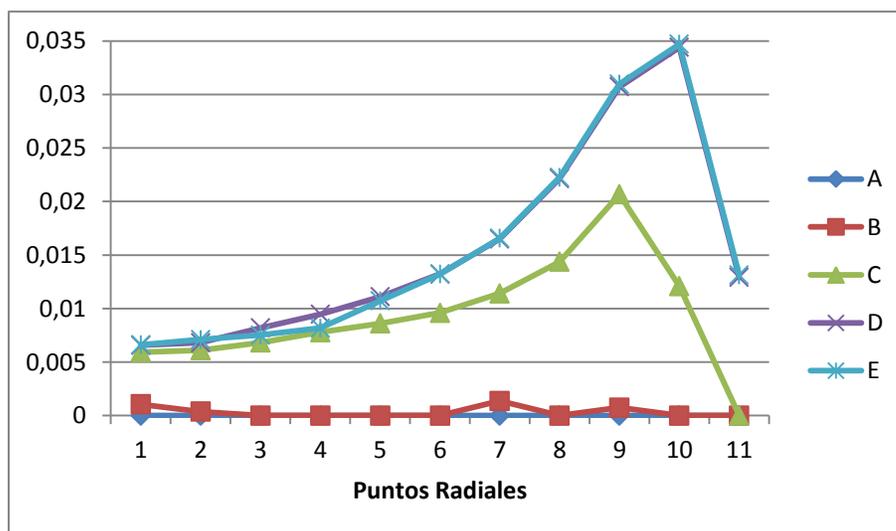
**Figura 4-42: Distribución de la tensión de von Mises configuración 4 reducción 21%**

Finalmente, el comportamiento de la tensión de von Mises en el corte E experimenta diferentes variaciones, de manera similar al corte anterior. Los incrementos registrados entre los nodos 1-3 y entre los nodos 9-11 son muy leves, siendo del orden del 0,5% y 1,1 % respectivamente. Por otra parte, entre los nodos 4-8, esta variable registra una disminución de los valores alcanzados del orden del 7% en promedio. Debido a estos cambios, la tendencia radial no se modifica respecto de la configuración anterior. Sin embargo al analizar en conjunto los efectos que genera el aumento en el semi ángulo en los corte D y E, se percibe que las tensiones son coincidentes a partir del nodo 7.

A modo de complemento, en la Figura 4-42, se aprecia el mapa de colores para esta variable, donde puede distinguirse el aumento axial de las tensiones es más acelerado producto de aumento en el semi ángulo. Además, de manera similar a la configuración anterior, a la altura del corte C se percibe un estado de altas tensiones, el cual se encuentra más localizado en una zona intermedia entre el eje y la superficie.

Por ultimo es posible apreciar cómo el comportamiento de las tensiones una vez que el alambre ha abandonado el dado refleja un estado de bajas tensiones en las zonas internas producto de la relajación elástica y un estado de altas tensiones en la superficie, brindándole al material un nuevo endurecimiento.

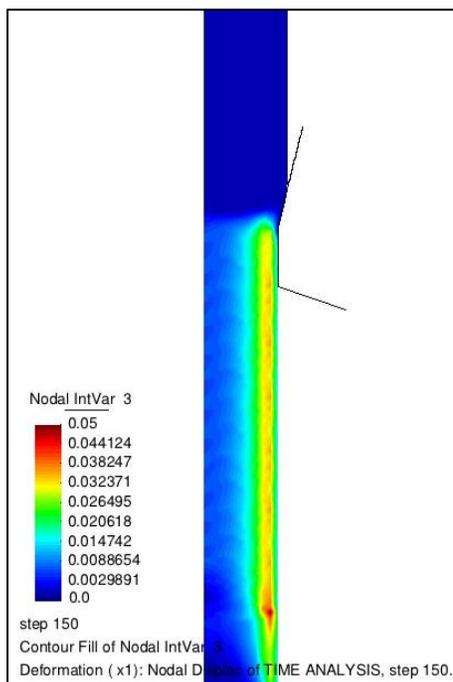
Utilizando la Figura 4-43 donde se muestra el daño experimentado por el material en los diferentes cortes y la Figura 4-44 que muestra el mapa de colores de esta variable, se realiza el análisis del daño para esta configuración obtenido utilizando el primer criterio de evolución.



**Figura 4-43: Daño con primer criterio de evolución configuración 4 reducción 21%**

Observando la Figura 4-43 se puede apreciar cómo el corte A no registra daño, siendo este comportamiento consistente con las configuraciones anteriores. Por otra parte, en el corte B, producto del aumento en el semi ángulo se manifiestan leves inicios de daño en algunos nodos de la sección. Sin embargo los valores alcanzados en este

corte son muy inferiores a los que se registran en los cortes siguientes y no superan el orden del 50% respecto del menor daño registrado con la primera configuración. Debido a esto no es posible afirmar que este aumento en el semi ángulo adelante la manifestación del daño.



**Figura 4-44: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 4 reducción 21%**

Respecto al corte C, donde sí se identifica el inicio de la manifestación del daño, el aumento en el semi ángulo produce diferentes efectos. Tanto incrementos como decrecimientos en los valores de daño alcanzados pueden identificarse en diferentes secciones del material. Entre los nodos 1-5, se registra un aumento en el daño, produciéndose la máxima variación en el nodo correspondiente al eje, del 59%. Este aumento disminuye a medida que se avanza radialmente. Un cambio en el comportamiento se produce entre los entre los nodos 6-7, donde se evidencia un decrecimiento en los valores de año alcanzados, siendo éste del orden del 2%. Nuevamente, entre los nodos 8-10, se produce un incremento en el daño, siendo incluso del 97% en el nodo 10. Cabe destacar que pese a los efectos producidos por el aumento

en el semi ángulo, la tendencia radial del daño en este corte no experimenta modificaciones, manteniéndose el máximo de daño en el nodo 9 para luego decaer a cero en la superficie.

Finalmente, en cuanto a los cortes D y E, el aumento en el semi ángulo produce un aumento en el daño en toda la sección del material, siendo en promedio del orden del 47% y 45% respectivamente. Cabe destacar que el máximo aumento en ambos cortes se produce en el nodo 10, siendo del 112% y 106% respectivamente. Debido a este comportamiento frente al cambio en la configuración, el daño modifica la pendiente con la que aumenta radialmente, ya que si bien entre los nodos 1-3 los cortes C, D y E registran valores similares, es a partir del nodo 4 donde estos últimos dos cortes comienzan a aumentar exponencialmente, registrando su valor máximo en el nodo 10, para luego decaer a valores de daño superiores a los alcanzados en el eje.

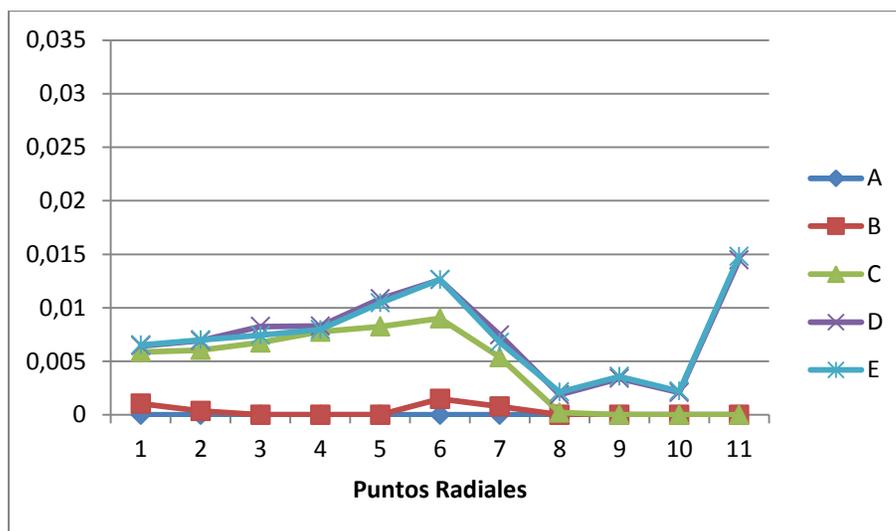
Cabe destacar que de manera similar a lo evidenciado en las configuraciones anteriores, el aumento porcentual experimentado por esta variable, no es suficiente para que el daño en el material alcance el punto crítico, no produciéndose el defecto del estallido central. Nuevamente este comportamiento es consistente con los resultados obtenidos en [14].

Adicionalmente, en la Figura 4-44, se aprecia el mapa de colores para la distribución del daño en el material. Gracias a éste se puede distinguir cómo el daño se desarrolla a partir del fin de la zona de deformación (corte C) y experimenta una localización en una zona más reducida cercana a la superficie del material de manera similar a la deformación plástica y donde el valor máximo alcanza el 35% del punto crítico. Por otra parte es interesante notar cómo el daño evidencia un comportamiento secuencial en el sentido axial, de manera similar a la configuración anterior.

A continuación, se presenta en las Figuras 4-45 y 4-46 el comportamiento en los diferentes cortes y el mapa de colores para el daño obtenido utilizando segundo criterio de evolución, a modo de poder compararlo, con los resultados ya expuestos, el daño obtenido al modificar el criterio de evolución.

Para esta configuración se puede apreciar que el daño en el corte A permanece sin manifestarse, mientras que, de manera similar a lo evidenciado al utilizar el primer

criterio de evolución, en el corte B se puede distinguir la presencia de daño (Figura 4-45). El daño alcanzado en el corte B utilizando el segundo criterio alcanza valores muy similares a los alcanzados con el primer criterio, registrando diferencias del orden del 1% en torno al eje del material.

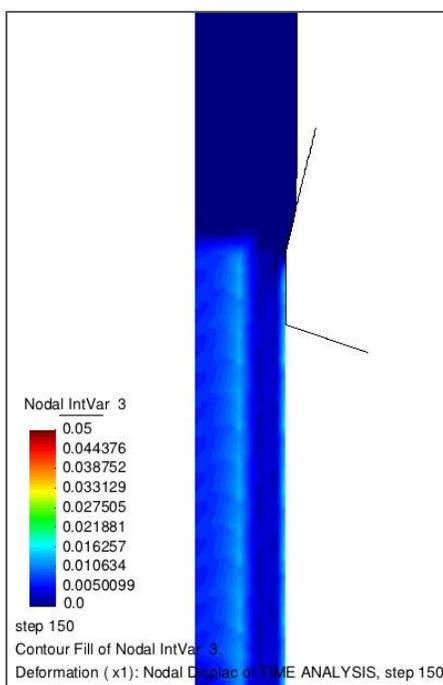


**Figura 4-45: Daño con segundo criterio de evolución configuración 4 reducción 21%**

Sin embargo el inicio de la manifestación del daño queda definido en el corte C, ya que es en este corte en donde el daño alcanza valores mayores. Es interesante notar que a medida que aumenta el semi ángulo, la diferencia en el daño registrada entre los dos criterios de evolución se reduce, produciendo a la vez que la tendencia radial sea similar. Para esta configuración el daño obtenido con ambos criterios es muy similar entre los nodos 1-6, registrándose una diferencia del orden del 2%. En el resto de la sección nuevamente se evidencia el aumento en la diferencia producto de que las tendencias obtenidas con los diferentes criterios de evolución divergen ya que el primer criterio de evolución registra un incremento radial del daño, mientras que el segundo registra un decrecimiento en este sentido. Cabe destacar que en este corte, al llegar a la superficie ambos criterios muestra un nivel de daño cero en este punto.

De manera similar al comportamiento evidenciado en el corte anterior, tanto en el corte D como en el corte E el daño en el material obtenido al utilizar el segundo

criterio de evolución registra valores similares a la configuración anterior entre los nodos 1-6, registrándose diferencias porcentuales del orden del 2% y 3% en promedio, respectivamente.



**Figura 4-46: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 4 reducción 21%**

Es interesante notar en estos tres cortes(C, D y E) el máximo daño no se registra en el eje, sino que se alcanza en el nodo 6, lo cual se debe al aumento en el semi ángulo. De todas maneras el máximo alcanzado en estos cortes se encuentra por debajo del punto crítico, descartándose el defecto del estallido central.

Adicionalmente, en la Figura 4-46 se muestra el mapa de colores para el daño obtenido con el segundo criterio de evolución. En este se puede apreciar cómo el daño se comienza a manifestar en una zona anterior al inicio del paso recto, lo cual coincide con lo evidenciado en el corte B (Figura 4-45). Por otra parte, es claro notar que el daño obtenido al utilizar el segundo criterio de evolución se localiza en una zona intermedia entre el eje y la superficie del material, alcanzando valores similares a los obtenidos con

el primer criterio, manteniendo el comportamiento axial y valores por debajo del punto crítico.

#### 4.3.1.5 Configuración 5

La última configuración ensayada corresponde a un semi ángulo de  $35^\circ$ , para el cual se obtienen los resultados mostrados a continuación

La presión hidrostática en los cortes A, B y C (Figura 4-47) presenta un estado de tracción en las zonas internas del material y compresión en la superficie, de manera similar a la configuración anterior. En el corte A, las variaciones porcentuales indican un aumento, tanto en el estado de tracción como en el de compresión, de un 26% (en el eje) y 35% (en la superficie), respectivamente. En cuanto al corte B, este aumento en ambos estados de tensiones se produce de manera más leve, registrando aumentos porcentuales de 3% y 10% en el eje y la superficie respectivamente. El corte C, por su parte, registra un marcado aumento en las tensiones positivas experimentadas en las zonas internas, con un incremento del 31% en el eje, mientras que en la superficie el incremento es inferior a un 4%.

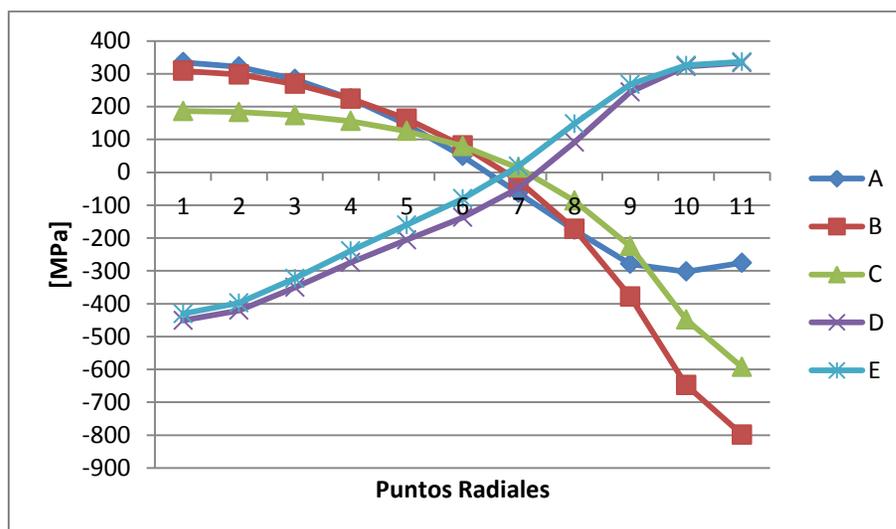
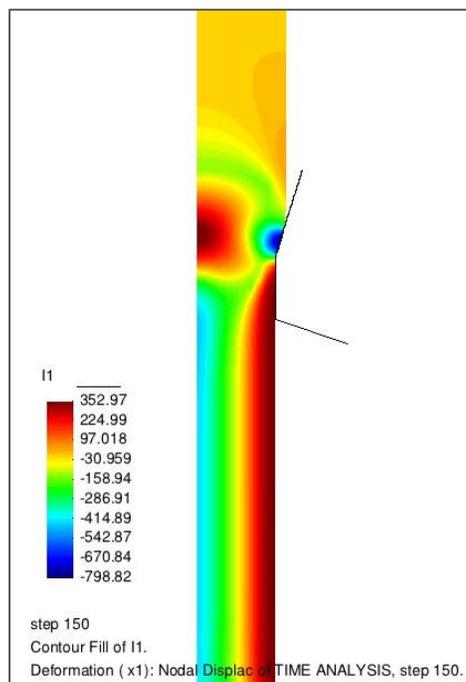


Figura 4-47: Presión hidrostática configuración 5 reducción 21%

Respecto a los cortes D y E, el aumento en el semi ángulo no ocasiona alteración en su comportamiento respecto de las configuraciones anteriores, mostrando claramente un estado de compresión en el eje y tracción en la superficie.

El mapa de colores, mostrado en la Figura 4-48, permite apreciar cómo la burbuja de tracción, ubicada en las zonas internas del material entre los cortes A y C , extiende su cobertura y se intensifica producto del aumento en el semi ángulo. Además, en la misma zona pero hacia la superficie, se aprecia la burbuja de compresión producida por el contacto entre el alambre y el dado. Esta burbuja registra valores más negativos y un comportamiento más localizado producto del cambio en la configuración.

Finalmente, a partir del corte C, que representa el inicio de la zona recta, se define una región de tracción en la superficie y de compresión en el eje, los cuales se ven relegados en los cortes D y E.

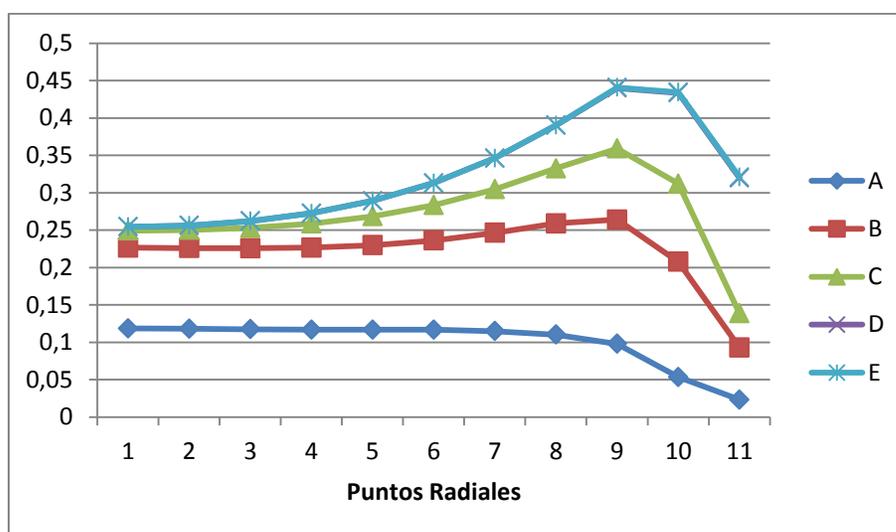


**Figura 4-48: Distribución de la presión hidrostática configuración 5 reducción 21%**

Las curvas obtenidas para la deformación plástica, Figura 4-49, muestran cómo en la entrada del material al proceso de trefilado, corte A, se alcanzan valores que representan un incremento porcentual del orden del 25% promedio en la sección.

Respecto al corte B, los valores que alcanza la deformación plástica han aumentado de tal manera que se encuentra muy próximo al corte C. Debido al aumento en el semi ángulo, el comportamiento de este corte ha cambiado y se asemeja al evidenciado por el C, registrando un valor máximo en el nodo 9 y posteriormente un decaimiento hacia la superficie donde se alcanza un valor menor al alcanzado en el eje.

En cuanto a los cortes C, D y E, su comportamiento no varía producto del incremento en el semi ángulo. Si lo hacen los valores máximos alcanzados en el nodo 9, registrándose incrementos del orden del 30% en el corte C y del orden del 12% en los cortes D y E.



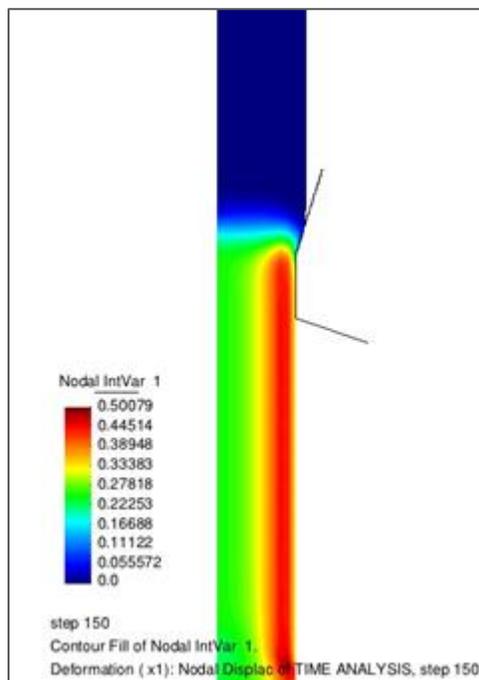
**Figura 4-49: Deformación plástica configuración 5 reducción 21%**

De manera complementaria se presenta el mapa de colores, Figura 4-50, donde se puede apreciar la distribución de esta variable en el material durante el proceso de trefilado, pudiendo observar cómo se adelanta el inicio de la deformación plástica a la zona correspondiente al corte A y como el aumento en el semi ángulo produce un

incremento en la variación radial y la localización de la deformación en una zona cercana a la superficie luego de pasar el corte C.

Los resultados obtenidos para la tensión de von Mises se muestran en las Figuras 4-50 y 4-51, donde se aprecian los cortes realizados al material y el mapa de colores respectivamente.

En el corte A (Figura 4-51), producto del incremento en el semi ángulo, el aumento experimentado en los valores de las tensiones no es superior al 3% en promedio. Es debido a esto que no se perciben cambios en el comportamiento de este corte, manteniendo valores similares a los cortes siguientes.



**Figura 4-50: Distribución de la deformación plástica configuración 5 reducción 21%**

De manera similar, en los cortes B y C, el incremento en la tensión de von Mises producto de cambio en la configuración no es superior al orden del 2% y 1% en promedio, respectivamente. Es por esto que el comportamiento de ambos cortes no experimenta cambios.

Asimismo, para los cortes D y E el aumento en el semi ángulo no representa una modificación en las tendencias mostradas, debido a que el efecto en las tensiones es pequeño, salvo en los nodos 1-2 del corte D donde se registra un incremento el 14% en promedio.

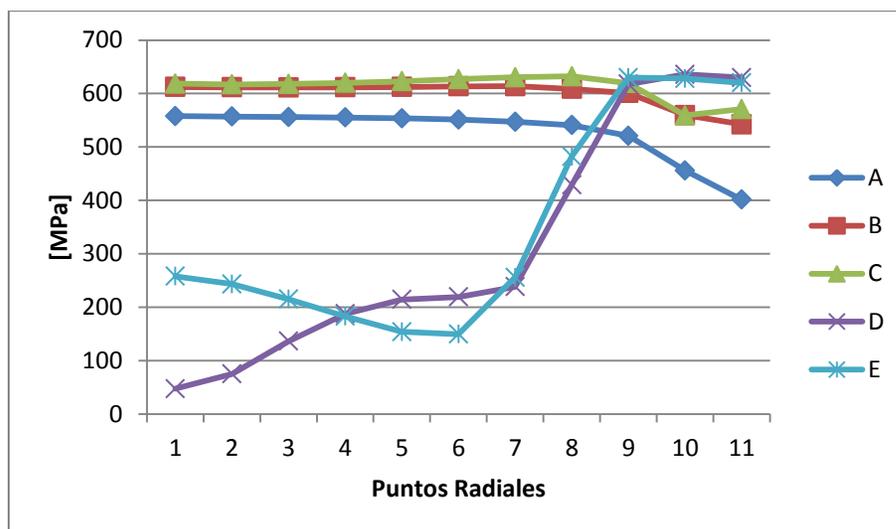


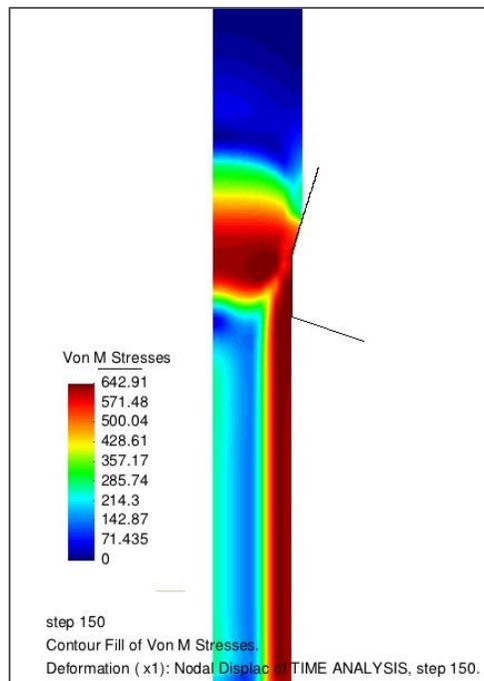
Figura 4-51: Tensión de von Mises configuración 5 reducción 21%

De la misma manera que no es posible percibir mayores cambios producto del incremento en el semi ángulo, en la Figura 4-52, donde se aprecia el mapa de colores para esta variable, tampoco es posible notar cambios considerables.

En las Figuras 4-53 y 4-54 se muestran los resultados obtenidos para el daño en el material al utilizar el primer criterio de evolución.

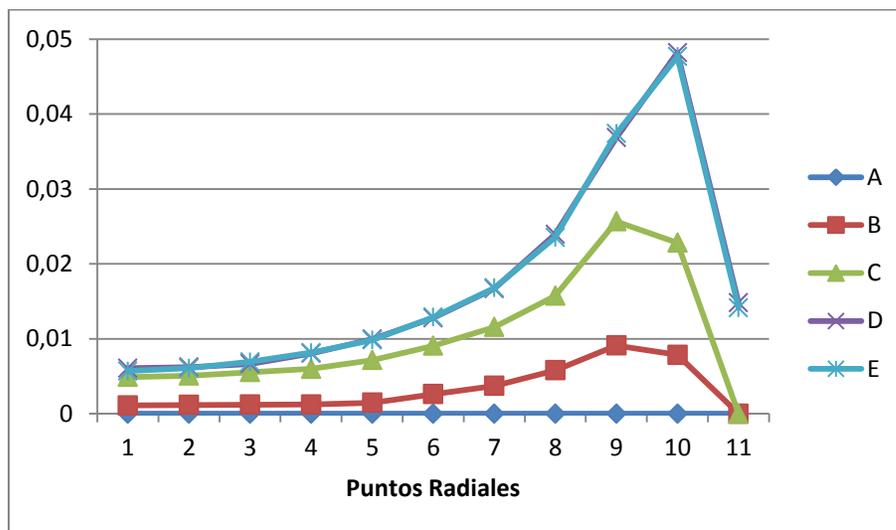
Gracias a la Figura 4-53, donde se aprecia el daño alcanzado en el material para los diferentes cortes realizados, se puede observar cómo en el corte A no se registra daño, de manera similar a las configuraciones anteriores. Avanzando axialmente, en el corte B puede evidenciarse la presencia de daño en toda la sección, de manera que el aumento en el semi ángulo produce que la manifestación de daño se adelante a esta zona. Se puede notar que la tendencia radial del daño en este corte mantiene un nivel de daño casi constante entre los nodos 1-5, siendo del mismo orden que el evidenciado en el mismo corte para la configuración anterior. Al avanzar hacia la superficie, se observa

como el daño comienza a aumentar, alcanzando su máximo en el nodo 9, siendo este superior al alcanzado en el eje del material en los siguientes cortes, para luego decaer a cero en la superficie.



**Figura 4-52: Distribución de la tensión de von Mises configuración 5 reducción 21%**

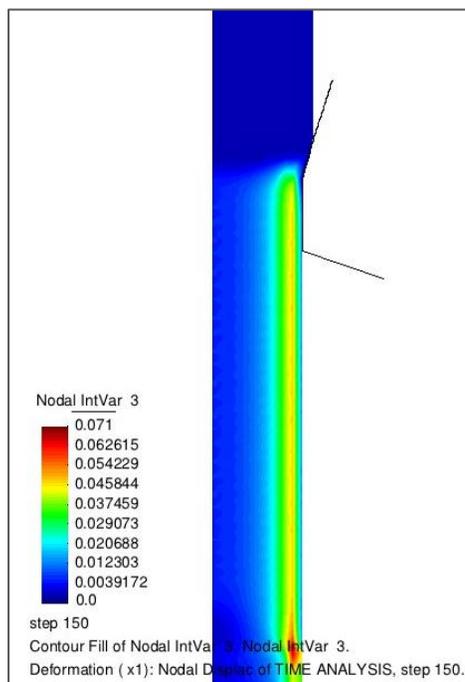
Debido al aumento en el semi ángulo el efecto ocasionado en los cortes C, D y E es similar. En todos estos cortes el daño experimentado entre los nodos 1-6 registra una disminución, la cual en promedio es del orden del 16%, 11% y 8% respectivamente. Del mismo modo el efecto que tiene el cambio en la configuración en el resto de la sección del material es similar para los tres cortes. Un incremento en los valores del daño alcanzado del orden del 31%, 17% y 15% en promedio respectivamente se registra en estos cortes. Cabe destacar que los incrementos máximos se experimentan en el nodo 10, donde tanto para el corte D como E se registra el máximo de daño, mientras que para el corte C esto ocurre en el nodo 9.



**Figura 4-53: Daño con primer criterio de evolución configuración 5 reducción 21%**

De esta manera se puede apreciar que el comportamiento radial de estos cortes permanece sin modificaciones respecto de la configuración anterior. Por otra parte es interesante destacar que si bien el aumento en el semi ángulo genera grandes aumentos en el daño alcanzado por el material, éste nuevamente se encuentra por debajo del punto crítico, no produciéndose el defecto del estallido central, lo que es consistente con los resultados obtenidos en [14].

A modo complementario, la Figura 4-54, muestra el mapa de colores para la distribución del daño en el material. Gracias a este se puede distinguir cómo el daño se desarrolla a partir de la zona comprendida entre los cortes B y C. Además se puede apreciar como radialmente el daño alcanzado en las zonas internas del material es casi despreciable en comparación con el daño que se registra en una zona cercana a la superficie, donde se localiza de manera similar a la deformación plástica y donde alcanza un máximo correspondiente al 50% del punto crítico.



**Figura 4-54: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 5 reducción 21%**

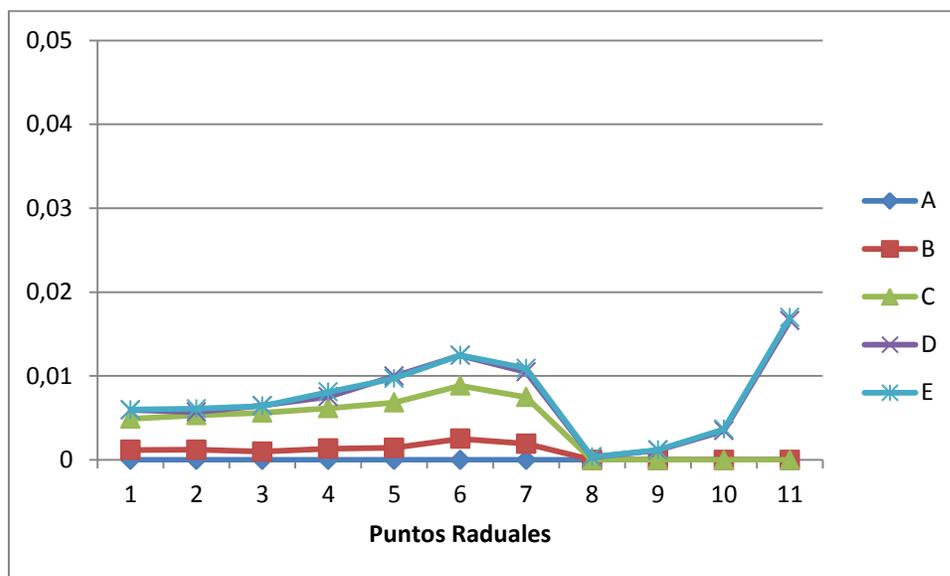
Para esta última configuración, luego de haber analizado el daño en el material al realizar la simulación utilizando el primer criterio de evolución, se muestra a continuación, en las Figuras 4-55 y 4-56 el comportamiento en los diferentes cortes y el mapa de colores para el daño obtenido utilizando segundo criterio de evolución.

En la Figura 4-55 se puede apreciar que de manera consistente a todas las configuraciones, en el corte A no se manifiesta presencia de daño.

En cuanto al corte B, se puede apreciar que en éste se alcanzan valores de daño entre los nodos 1-7, siendo estos similares a los obtenidos con el primer criterio de evolución. Por otra parte en el resto de la sección el daño registrado en el material es cero.

En el corte C se puede identificar un comportamiento similar al evidenciado en las configuraciones anteriores. En cuanto al daño experimentado entre los nodos 1-6 se registra una variación inferior al 4% en promedio respecto del daño alcanzado al utilizar el primer criterio de evolución y se evidencia una tendencia ascendente, hasta alcanzar el

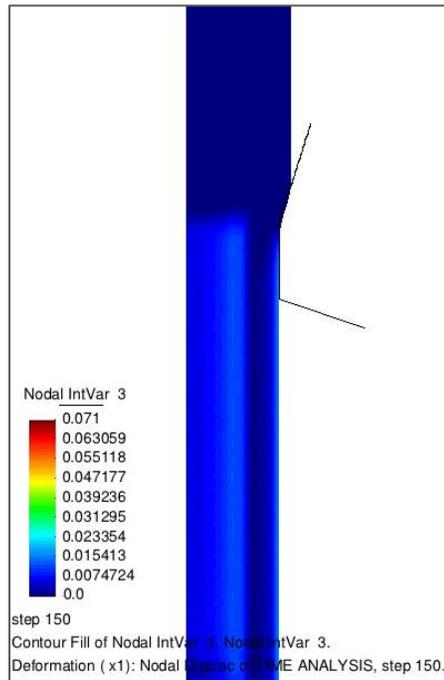
máximo en el nodo 6. Avanzando radialmente hacia la superficie el daño en este corte disminuye, alcanzando el cero en el nodo 8, manteniendo este valor hasta la superficie.



**Figura 4-55: Daño con segundo criterio de evolución configuración 5 reducción 21%**

Por otra parte en los cortes D y E, el daño alcanzado en las zonas internas del material (nodos 1-6) es muy similar entre sí y respecto al alcanzado al utilizar el primer criterio de evolución, registrándose diferencias inferiores al 5%. Cabe destacar que el aumento en el semi ángulo produce que entre los nodos 4-7 el daño en estos cortes registre valores levemente mayores en relación al experimentado en el corte anterior, produciendo que se perciba una tendencia radial ascendente hasta el nodo 6, para luego decaer alcanzando el cero en el nodo 8. A partir de este nodo, en ambos cortes es posible distinguir un comportamiento ascendente a medida que se avanza hacia la superficie, registrándose al llegar a ésta el máximo valor de daño, siendo incluso un 12% y un 20% superior al registrado al realizar la simulación con el primer criterio de evolución en el mismo nodo.

Teniendo en cuenta todos los cortes analizados, de manera similar a las configuraciones anteriores, el daño registrado en el material se encuentra por debajo del punto crítico, descartándose el defecto del estallido central.



**Figura 4-56: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 5 reducción 21%**

De manera de poder apreciar mejor la comparación entre el daño obtenido con los respectivos criterios de evolución, la Figura 4-56 muestra el mapa de colores para el daño obtenido con el segundo criterio. En éste se puede apreciar cómo el daño comienza a manifestarse en la misma zona y registra valores similares, en las zonas internas, a lo obtenido al utilizar el primer criterio de evolución. Es interesante destacar cómo el cambio en el criterio de evolución, al imponer que el daño solamente se desarrolla ante presiones positivas, modifica solamente el daño alcanzado en la zona cercana a la superficie, evidenciando un comportamiento completamente opuesto.

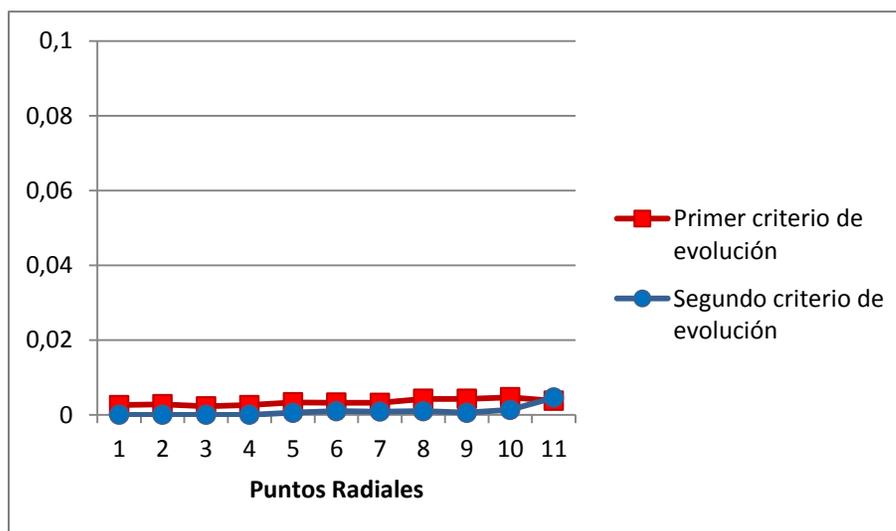
#### 4.3.1.6 Análisis de daño residual

Después de realizar el análisis de todas las configuraciones durante el proceso de trefilado, es interesante observar el estado del material una vez terminado este proceso, ya que en caso de diseñar un sistema de trefilado en tándem, éste es un factor a considerar para configurar las siguientes reducciones.

A continuación se presentan los valores del daño acumulado en el material para cada una de las configuraciones ensayadas, utilizando ambos criterios de evolución.

En la Figura 4-57 se puede apreciar el daño residual obtenido para la primera configuración. En ésta se destaca cómo el nivel de daño alcanzado con ambos criterios de evolución es muy bajo, lo que se logra apreciar mejor al colocar el valor crítico de daño como cota superior. Por otra parte, como se evidenció anteriormente en el análisis realizado a esta configuración, se puede notar que en toda la sección al utilizar el primer criterio se registra una mayor presencia de daño que al utilizar el segundo criterio.

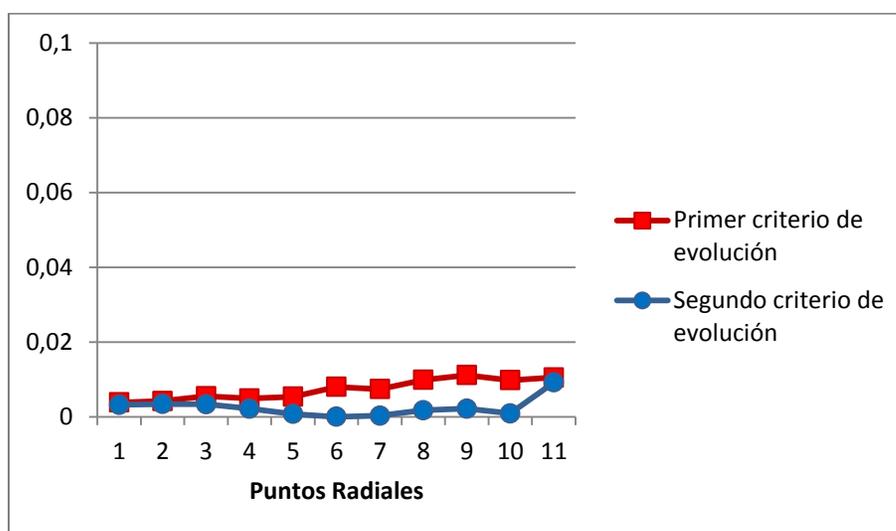
En vista al comportamiento del daño en esta primera configuración, cuyo valor máximo es inferior al 5% del valor de daño crítico, se puede decir que se descarta la manifestación del defecto del estallido central, lo cual es consistente con lo evidenciado en el análisis de cortes y en el mapa de colores, asimismo como en los resultados obtenidos en [14].



**Figura 4-57: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 1 reducción 21%**

Respecto al daño alcanzado en la segunda configuración, la Figura 4-58 muestra la distribución residual del daño para ambos criterios de evolución. Se puede apreciar que debido al aumento en el semi ángulo ambos criterios presentan valores de daño superiores respecto a la configuración anterior. Cabe destacar que este aumento en los

valores del daño alcanzados no es igual para ambos criterios. De hecho, es interesante notar cómo el daño obtenido al utilizar el primer criterio experimenta un incremento mayor a medida que se avanza radialmente. Por otra parte el daño alcanzado al utilizar el segundo criterio experimenta este aumento en las zonas internas (nodos 1-3) y en el nodo correspondiente a la superficie, manteniendo un nivel más bajo en el resto de la sección.

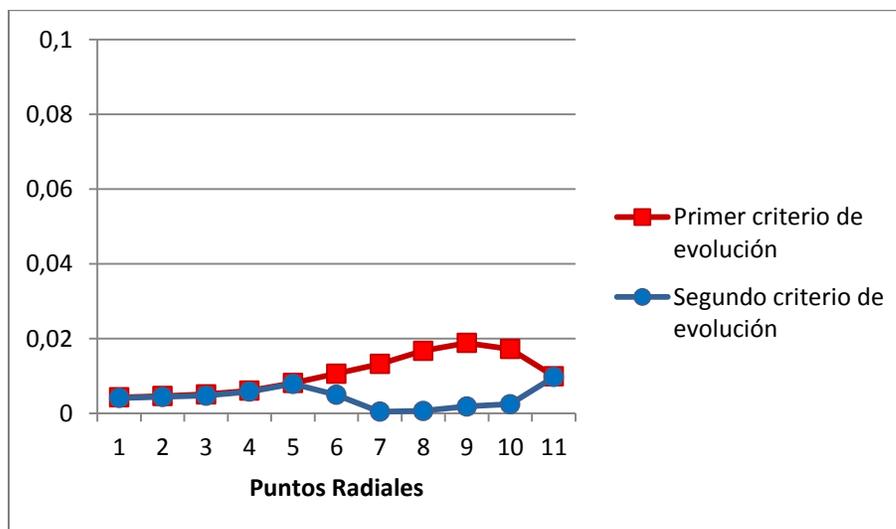


**Figura 4-58: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 2 reducción 21%**

De esta manera, debido al comportamiento del daño ante el aumento en el semi ángulo, se produce que entre los nodos 1-2 y en el nodo correspondiente a la superficie, ambos criterios registren valores de daño similares (con una diferencia porcentual del 18% en el eje y de 13% en la superficie), mientras que en el resto de la sección el primer criterio entrega valores superiores, aunque siempre muy por debajo del punto crítico.

Luego de estudiar el comportamiento del daño en esta configuración, cuyo valor máximo es inferior al 11% del valor de daño crítico, se puede decir que se descarta la manifestación del defecto del estallido central, lo cual es consistente con lo evidenciado en el análisis de cortes y en el mapa de colores, asimismo con los resultados obtenidos en [14].

Para la tercera configuración, el daño residual alcanzado en el material se muestra, para ambos criterios de evolución, en la Figura 4-59, donde se puede apreciar cómo el aumento en el semi ángulo produce cambios en la manifestación del daño en el material. De manera similar a la configuración anterior, se puede observar que ambos criterios registran valores de daño similares en las cercanías del eje. Debido al aumento en el semi ángulo la zona en la que ambos criterios evidencian valores similares se extiende, siendo para esta configuración entre los nodos 1-5 y además las diferencias porcentuales se reducen, registrándose diferencias inferiores al 6% (siendo el daño obtenido con el primer criterio mayor).



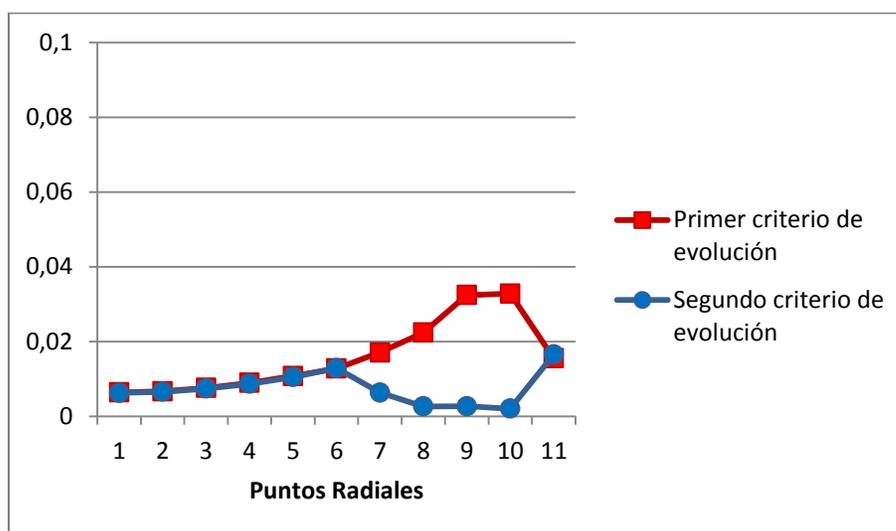
**Figura 4-59: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 3 reducción 21%**

Por otra parte al avanzar radialmente, entre los nodos 6-10, el comportamiento del daño obtenido con los distintos criterios de evolución registra tendencias opuestas. Se puede observar que el daño obtenido al utilizar el primer criterio de evolución aumenta a medida que se avanza hacia la superficie, mientras que el daño obtenido al utilizar el segundo criterio decrece, aproximándose al cero.

Es interesante destacar que luego de esta región en la que el daño experimenta un comportamiento opuesto dependiendo del criterio utilizado, al llegar a la superficie

ambos criterios registran un nivel de daño similar, con una diferencia porcentual del 2%, representando éste el máximo valor alcanzado por el segundo criterio.

Teniendo en cuenta el comportamiento del daño en la tercera configuración, cuyo valor máximo es inferior al 20% del valor de daño crítico (primer criterio) e inferior al 10% (segundo criterio), se puede decir que se descarta la manifestación del defecto del estallido central, lo cual es consistente con lo evidenciado en el análisis de cortes y en el mapa de colores, asimismo como en los resultados obtenidos en [14]. Además, observando el comportamiento entregado por ambos criterios se puede afirmar que el segundo criterio de evolución entrega una tendencia radial de daño más cercana a lo esperado.



**Figura 4-60: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 4 reducción 21%**

A continuación, para la cuarta configuración, se analiza el comportamiento del daño residual en el material obtenido con ambos criterios de evolución (Figura 4-60). Producto del aumento en el semi ángulo, el daño experimenta un incremento en los valores alcanzados respecto de la configuración anterior, efecto compartido por ambos criterios de evolución. En cuanto al comportamiento de esta variable, de esta figura se puede desprender que el daño obtenido con ambos criterios comparte una tendencia radial ascendente y alcanza valores muy similares entre los nodos 1-6, registrando una

diferencia porcentual del inferior al 3% (siendo el daño obtenido con el primer criterio mayor).

Es interesante destacar cómo, en las cercanías del eje, el aumento en el semi ángulo produce que la diferencia entre el daño alcanzado con los diferentes criterios se reduzca, además de aumentar la sección en la que son coincidentes.

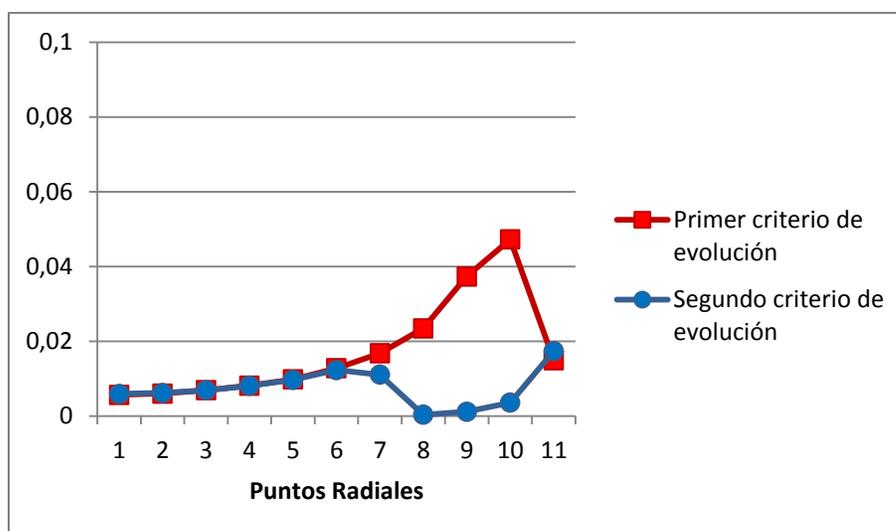
Por otra parte, respecto al daño en el resto de la sección, se puede apreciar cómo en aumento en el semi ángulo produce que el comportamiento opuesto mostrado por el daño obtenido con los diferentes criterios de evolución aumente, debido a que el primer criterio conserva el comportamiento ascendente a medida que se avanza hacia la superficie, alcanzando su valor máximo en los nodos 9 y 10, mientras que el daño obtenido al utilizar el segundo criterio registra un decrecimiento, alcanzando niveles cercanos a cero en los nodos 8-10.

De manera similar a la configuración anterior es interesante destacar cómo al llegar a la superficie ambos criterios registran un nivel de daño similar, con una diferencia porcentual del 6%, siendo nuevamente este el máximo valor alcanzado por el segundo criterio.

Luego de apreciar el comportamiento del daño en la cuarta configuración, donde el valor máximo es inferior al 35% del valor de daño crítico (primer criterio) e inferior al 17% (segundo criterio), se puede decir que se descarta la manifestación del defecto del estallido central, lo cual es consistente con lo evidenciado en el análisis de cortes y en el mapa de colores, asimismo como en los resultados obtenidos en [14]. Además, observando el comportamiento entregado por ambos criterios se puede afirmar que nuevamente el segundo criterio de evolución entrega una tendencia radial de daño más cercana a lo esperado.

Por último, para la quinta configuración, se aprecia en la Figura 4-61 el comportamiento del daño residual en el material obtenido con ambos criterios de evolución. En la Figura 4-61 se observa cómo producto del aumento en el semi ángulo, el daño experimentado en el material incremento respecto de la configuración anterior tanto en los resultados obtenidos al utilizar el primer criterio de evolución como al utilizar el segundo criterio. Respecto del comportamiento de esta variable, se aprecia

cómo el aumento en el semi ángulo produce que ambos criterios registren valores similares entre los nodos 1-6, con una diferencia porcentual inferior al 5% (siendo esta vez el daño obtenido con el segundo criterio mayor).



**Figura 4-61: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 5 reducción 21%**

De manera similar a las dos configuraciones anteriores, respecto al daño en el resto de la sección, se puede apreciar cómo en aumento en el semi ángulo produce que el comportamiento opuesto mostrado por el daño aumente. Esto se debe a que el primer criterio registra un comportamiento ascendente acelerado a medida que se avanza hacia la superficie, alcanzando su valor máximo en los nodos 10, mientras que el daño obtenido al utilizar el segundo criterio registra un comportamiento decreciente alcanzando niveles cercanos a cero en los nodos 8-10.

Finalmente, al llegar a la superficie, ambos criterios registran un nivel de daño similar, con una diferencia porcentual del 17%, siendo nuevamente este el máximo valor alcanzado por el segundo criterio y esta vez superior al alcanzado en el mismo nodo por el primer criterio.

De esta manera, luego de apreciar el comportamiento del daño en la última configuración ensayada, en la cual el valor máximo es inferior al 50% del valor de daño crítico (primer criterio) e inferior al 20% (segundo criterio), se puede decir que se

descarta la manifestación del defecto del estallido central, lo cual es consistente con lo evidenciado en el análisis de cortes y en el mapa de colores, asimismo con los resultados obtenidos en [14]. Además, asimismo como se observó para las dos configuraciones anteriores, el comportamiento del daño entregado por el segundo criterio es más cercano a lo esperado.

### 4.3.2 Reducción 31%

Para esta nueva reducción se ensayarán los mismos semi ángulos de aproximación, utilizando las mismas condiciones de simulación.

#### 4.3.2.1 Configuración 1

De la misma manera que para la reducción de 21%, la primera configuración corresponde al semi ángulo de  $7^\circ$ .

La Figura 4-62 muestra el comportamiento de la presión hidrostática experimentada por el material durante el proceso de trefilado.

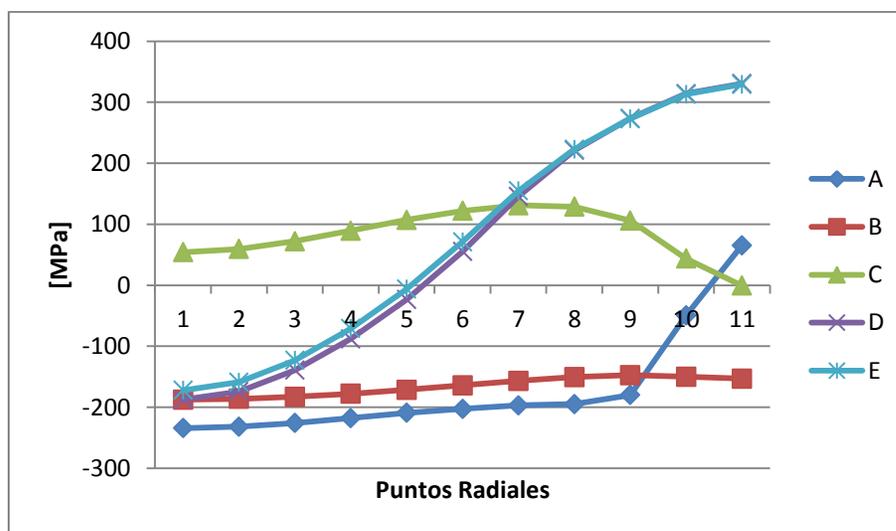
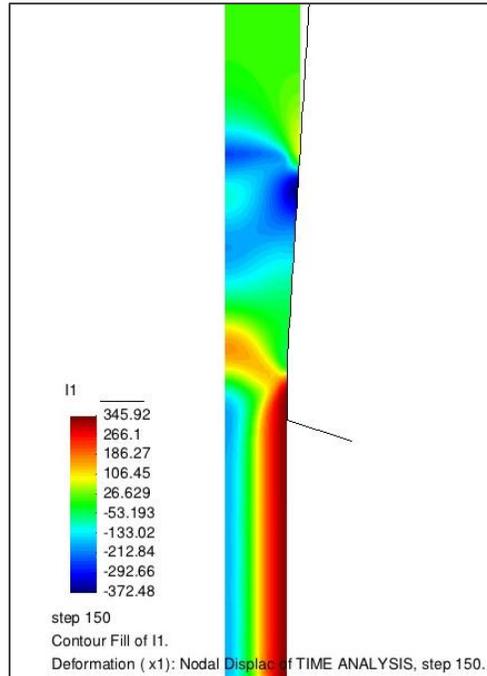


Figura 4-62: Presión hidrostática configuración 1 reducción 31%

La presión hidrostática experimentada en la zona de contacto entre el material y el dado (corte A) muestra una alta compresión en las zonas internas del alambre.

Radialmente, la tendencia mostrada por este corte muestra valores menos negativos a medida que se acerca a la superficie. Este aumento en las tensiones es leve hasta el nodo 9 donde se acelera, lo cual permite alcanzar valores positivos en la superficie, lo cual significa un pequeño estado de tracción en esta zona. Es interesante apreciar que, para este corte, los valores alcanzados con la reducción de 31% son menos negativos en toda la sección, o sea que el estado de compresión es menor al aumentar la reducción.

En el corte B se está en presencia de un estado de compresión en toda la sección del material, con una tendencia a ser menos negativo a medida que se acerca a la superficie. Los valores alcanzados por esta variable y su tendencia, muestran una clara variación con respecto a la reducción anterior. La presión hidrostática en el eje es más negativa (alrededor de un 21%), mientras que a medida que se acerca a la superficie del material, el estado de compresión es intenso que el alcanzado en la reducción de 21% (alrededor de un 38%).



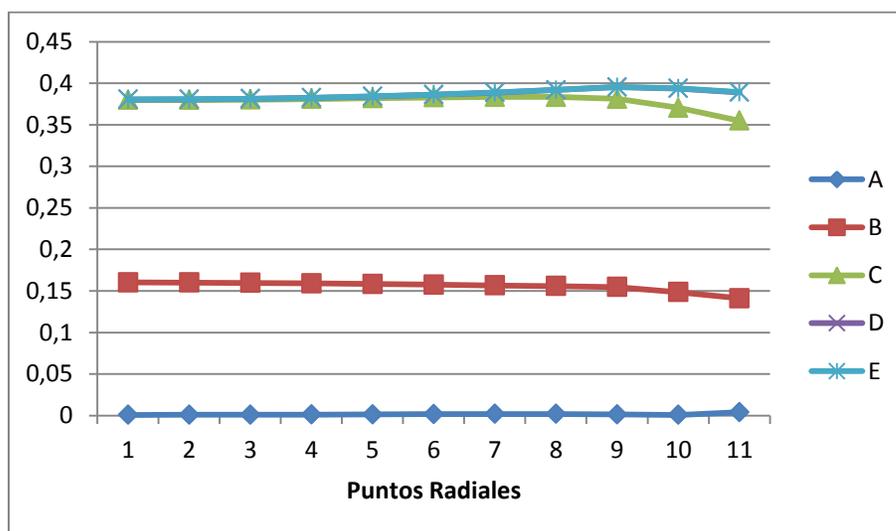
**Figura 4-63: Distribución de la presión hidrostática configuración 1 reducción 31%**

En cuanto al corte C, la presión hidrostática en el material cambia de signo al aumentar la reducción presentando un estado de tracción en todo el alambre. Respecto a la tendencia mostrada en este corte, se puede apreciar que es similar a la mostrada en la reducción anterior, con un aumento radial constante hasta llegar al punto máximo (nodo 7), desde donde, avanzando hacia la superficie, se produce un decaimiento, donde se alcanzan valores cercanos a cero.

Finalmente los cortes D y E muestran una tendencia paralela entre sí, de la misma manera que se evidenció con la reducción anterior, aunque para la reducción de 31% los valores alcanzados en estos cortes son más cercanos.

Producto del aumento en la reducción, los valores de la presión hidrostática generan un estado de tracción en la superficie más intenso, mientras que el estado de compresión experimentado en las zonas internas del material disminuye su intensidad.

La Figura 4-63 muestra el mapa de colores con la distribución de la presión hidrostática en el material. Gracias a éste es posible notar el momento en el que se produce el contacto entre el alambre y el dado (corte A) debido a la presencia de un estado de compresión en el interior.



**Figura 4-64: Deformación plástica configuración 1 reducción 31%**

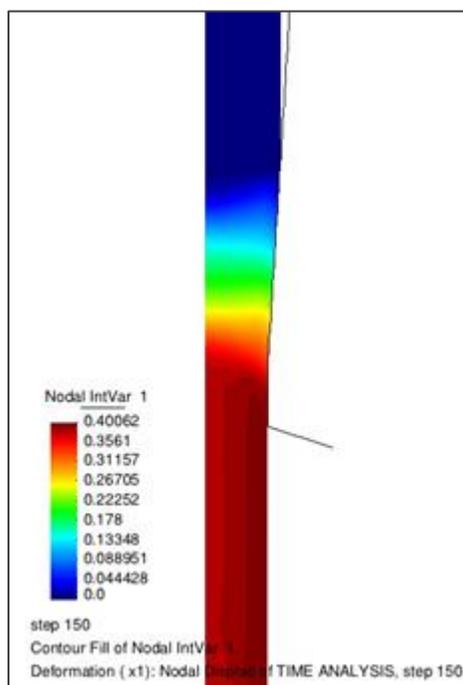
La zona en la que el material se encuentra en contacto con el dado, comprendida entre los cortes A y C, el estado de compresión se extiende a la totalidad del material, alcanzando valores más negativos en la superficie.

A partir del corte C, inicio de la zona recta, se puede apreciar el efecto de las tensiones residuales, notándose un aumento en el valor de la presión hidrostática en esta zona.

Por último, en la zona correspondiente a los cortes D y E, se muestra claramente la formación de los estados de compresión en el eje y de tracción en la superficie, este último producto de la relajación de las zonas externas del material.

La deformación plástica producto de esta reducción se aprecia en las Figuras 4-64 y 4-65, pudiéndose observar el comportamiento de esta variable en los diferentes cortes y su distribución en todo el material, respectivamente.

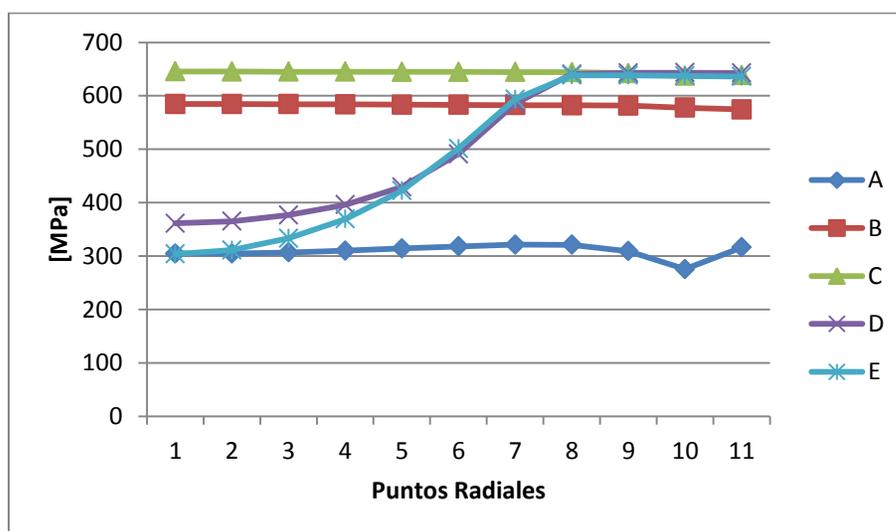
De manera consistente con la reducción anterior, en el corte A (zona en la que se inicia el contacto con el dado) se obtienen valores muy cercanos a cero para la deformación plástica (Figura 4-64).



**Figura 4-65: Distribución de la deformación plástica configuración 1 reducción 31%**

A partir de la zona marcada por el corte B puede notarse cómo el material comienza a deformarse plásticamente, alcanzando su valor máximo en el eje y con un comportamiento levemente decreciente en el sentido radial.

Respecto a la deformación plástica en los cortes C, D y E, se observa cómo en el eje el valor de la deformación plástica es similar. Sin embargo el primero de estos cortes experimenta una disminución a medida que nos acercamos a la superficie (a partir del nodo 9 donde se alcanza el máximo) registrando valores inferiores a los alcanzados en el eje, mientras que los otros dos cortes se mueven en forma paralela, con valores muy similares, lo cual indica que el material no se continúa deformando luego de haber salido del dado, y con una leve tendencia ascendente.



**Figura 4-66: Tensión de von Mises configuración 1 reducción 31%**

Gracias al mapa de colores (Figura 4-65), se puede apreciar cómo la deformación plástica inicia su manifestación en la zona comprendida entre los cortes B y C, correspondiente a la zona en la cual el material se encuentra en pleno contacto con el dado. Además es interesante notar como esta variable se distribuye axialmente, percibiéndose el incremento de la deformación a medida que el material pasa por el proceso de trefilado. Por otra parte la distribución radial evidencia un comportamiento uniforme, para las diferentes etapas del proceso.

El comportamiento de la tensión de von Mises experimentada en el material se muestra en las Figuras 4-66 y 4-67.

En el corte A (Figura 4-66), esta variable registra valores y un comportamiento similar al evidenciado al realizar la reducción de 21%, utilizando la misma configuración (con una diferencia porcentual máxima de 1,52%).

De la misma manera que para la reducción anterior, los cortes B y C presentan valores muy superiores al corte anterior, con un comportamiento radial casi constante. Este hecho confirma el comportamiento mostrado por la deformación plástica (Figura 4-64), ya que esta zona corresponde a la que el material se encuentra en contacto con el dado. Debido al aumento en la reducción se produce un incremento en las tensiones para estos cortes, con una variación máxima de un 9,38% y 5,22% respectivamente.

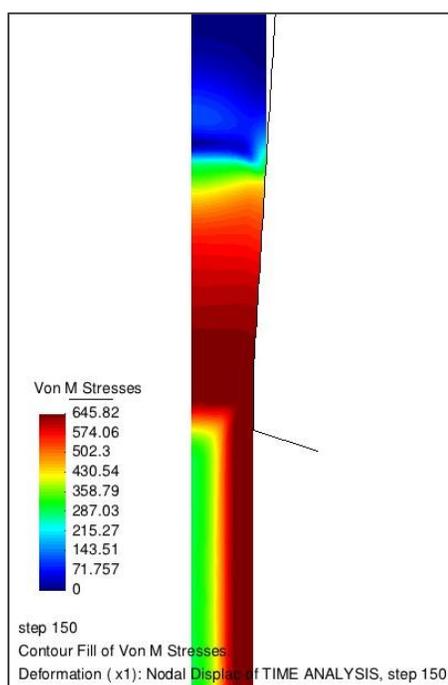
Para los cortes D y E, se puede notar una disminución en la tensión experimentada por las zonas internas del material alcanzando valores cercanos a los obtenidos en el corte A. Esto se debe a la descarga elástica que experimenta el material a la salida del dado. Debido al aumento en la reducción cabe destacar que los valores de las tensiones alcanzados en las zonas internas del material para estos cortes registran un aumento considerable (31,29% y 114,61% respectivamente. En cuanto a los valores alcanzados en la superficie, éstos se mantienen cercanos a los obtenidos en el corte C, proporcionando al material un nuevo endurecimiento y límite elástico. Producto del aumento en la reducción las tensiones experimentadas en las cercanías de la superficie también experimentan un aumento, aunque éste es menos significativo que el experimentado en las cercanías del eje (5,77% y 13,93% respectivamente).

Observando el mapa de colores mostrado en la Figura 4-67, se puede apreciar cómo las tensiones evolucionan, con un comportamiento similar al mostrado para la reducción de 21%, al utilizar la misma configuración. Es interesante distinguir como las tensiones van incrementándose al entrar en la zona de deformación y como en la salida del proceso de trefilado se marcan los estados de alta y bajas tensiones, estas últimas producto de la descarga elástica experimentada por las zonas internas del material.

A continuación, en las Figuras 4-68 y 4-69 se muestra el comportamiento de la variable de daño obtenido utilizando el primer criterio de evolución.

Se puede apreciar que tanto en el corte A como en el corte B (Figura 4-68), de la misma manera que en la reducción de 21%, no se manifiesta daño en el material.

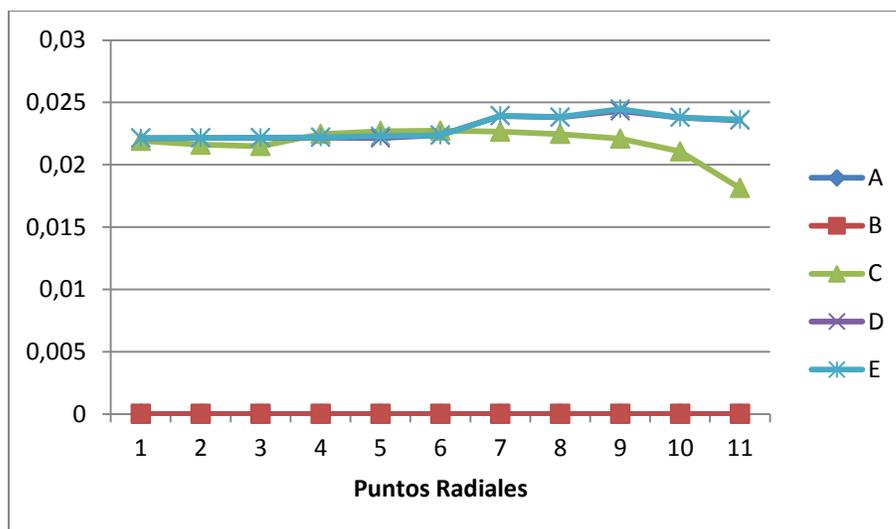
Es a partir del corte C donde se empieza a percibir la manifestación del daño. En este corte la variable de daño es casi constante radialmente hasta el nodo 7, desde el cual tiende a disminuir a medida que se avanza hacia la superficie. Producto del cambio en la reducción se produce un gran incremento en los valores alcanzados en este corte, siendo del orden del 700%.



**Figura 4-67: Distribución de la tensión de von Mises configuración 1 reducción 31%**

En cuanto a los cortes D y E, que experimentan un comportamiento paralelo, los valores de daño alcanzados son muy similares al corte C y presentan un comportamiento casi constante. Por otra parte, en la cercanía a la superficie los valores de daño alcanzados son mayores, debido a que se produce un leve incremento en el nodo 7, separándose estos cortes del corte C. Es interesante notar que, de la misma manera que el corte anterior, los cortes D y E registran un incremento del orden del 630% y 620% respectivamente, producto del cambio en la reducción.

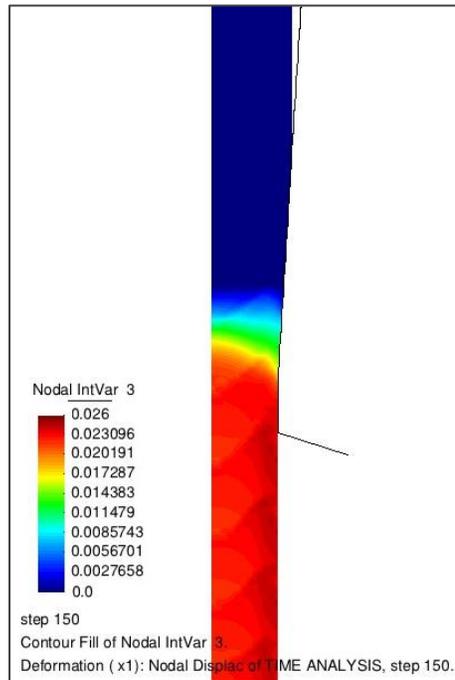
Cabe destacar que pese al gran aumento porcentual experimentado por el daño en el material debido del aumento en la reducción, éste aún se encuentra muy por debajo del punto crítico, no produciéndose el defecto del estallido central, siendo este resultado consistente con lo obtenido en [14].



**Figura 4-68: Daño con primer criterio de evolución configuración 1 reducción 31%**

Adicionalmente, en el mapa de colores (Figura 4-69) puede observarse la distribución de esta variable en el alambre, notándose que el daño empieza a manifestarse en la parte final de la reducción de sección e inicio de la zona muerta (corte C), desde donde se mantiene casi constante axial y radialmente, a diferencia del comportamiento localizado visto en la Figura 4-14, correspondiente al daño en el material efectuando la reducción de 21% con la misma configuración.

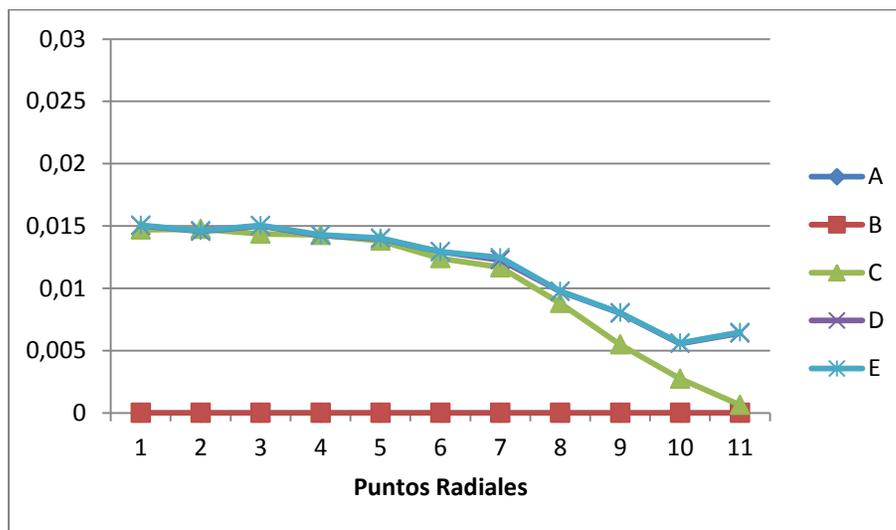
Luego de haber realizado la simulación del proceso de trefilado con el modelo de daño que contempla el primer criterio de evolución, se presenta a continuación el daño obtenido utilizando el segundo criterio de evolución, el cual depende del comportamiento de la presión hidrostática. Las Figuras 4-70 y 4-71 presentan el daño en los diferentes cortes realizados y al mapa de colores respectivamente.



**Figura 4-69: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 1 reducción 31%**

En la Figura 4-70 se puede notar que el comportamiento del daño en los cortes A y B es idéntico al obtenido con el criterio de evolución anterior (el daño no se manifiesta), ya que en esa zona la deformación plástica del material es cercana a cero.

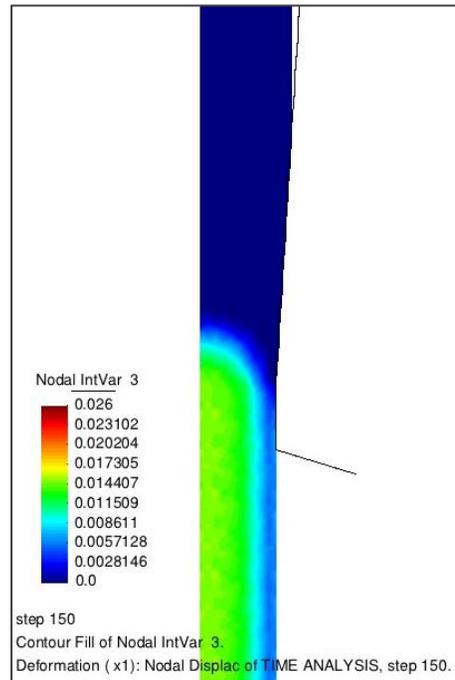
En el corte C, que corresponde al inicio de la zona recta, puede apreciarse la manifestación de daño y el efecto de modificar el criterio de evolución. En este corte se experimenta una fuerte disminución en los valores máximos alcanzados (registrándose un decrecimiento del orden del 33% en el eje) producto del cambio en el criterio de evolución. Además, otro efecto que se percibe es el cambio en el comportamiento radial, el cual evidencia un decrecimiento a medida que se avanza hacia la superficie, llegando a valores cercanos a cero en esta.



**Figura 4-70: Daño con segundo criterio de evolución configuración 1 reducción 31%**

Por otra parte, las variaciones experimentadas por los cortes D y E, los cuales tienen un comportamiento paralelo entre sí, producen que los valores de daño alcanzados y la tendencia radial, sean similares a los registrados en el corte anterior, al menos entre los nodos 1-7. En cuanto a la zona comprendida entre los nodos 8-11, en los cortes D y E se registran valores siempre superiores al corte anterior, producto de que la pendiente con la que decrecen radialmente es menor, produciéndose incluso en el nodo 10 un cambio en esta tendencia ya que al llegar a la superficie el daño es mayor que en el nodo anterior.

El mapa de colores (Figura 4-71) complementa el análisis de los cortes, mostrando cómo la variación en el criterio de evolución de daño modifica la manifestación de esta variable. Se puede notar que el daño se presenta de manera localizada en las zonas interiores del material, a diferencia del daño obtenido con el criterio anterior que manifiesta mayores valores de daño que se distribuyen de manera casi constante en toda la sección del material.



**Figura 4-71: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 1 reducción 31%**

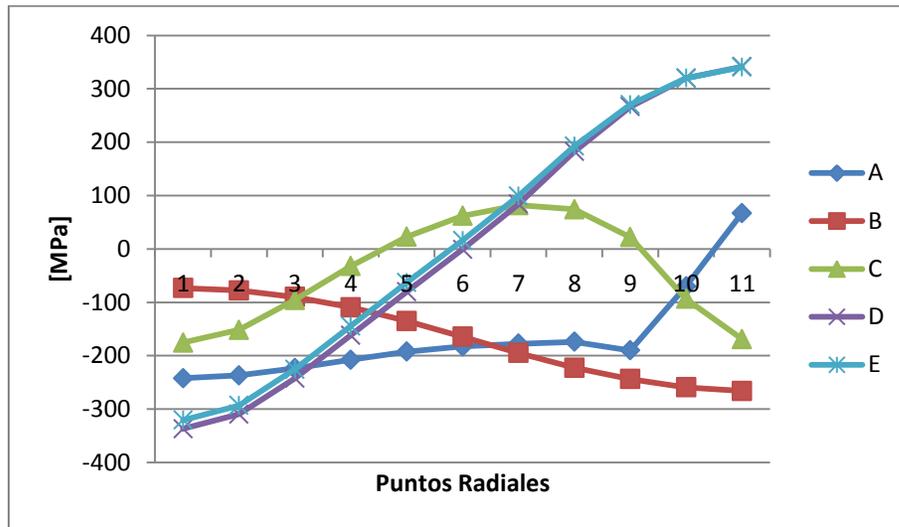
Cabe destacar que de igual manera a como ocurre en la reducción de 21%, la variable de daño varía su comportamiento al imponerse que éste se desarrolla solamente ante la presencia de presión hidrostática positiva. Sin embargo al apreciar los cambios antes descritos se puede decir que bajo este nuevo criterio de evolución, si bien se registra una localización de daño en las cercanías del eje del material, el nivel alcanzado se encuentra muy por debajo del punto crítico, descartándose la manifestación del estallido central.

#### 4.3.2.2 Configuración 2

Ensayando el segundo semi ángulo para la reducción de 31%, se obtienen los resultados mostrados a continuación.

De manera consistente a la configuración anteriormente ensayada, la presión en el corte A (Figura 4-72) muestra el mismo comportamiento. Cabe destacar que el

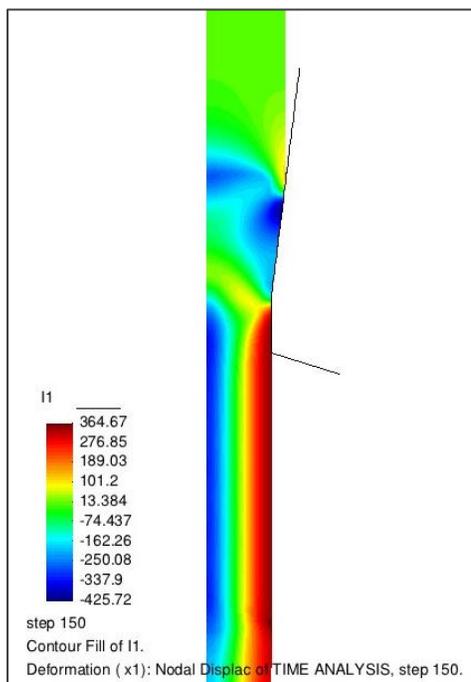
aumento en el semi ángulo del dado genera leves variaciones absolutas en esta variable, no alterando la tendencia ascendente a medida que se acerca a la superficie.



**Figura 4-72: Presión hidrostática configuración 2 reducción 31%**

Respecto al corte B, el estado de compresión se extiende en toda la sección del material. El aumento en el semi ángulo de aproximación produce que este estado de compresión sea menos intenso en el eje, pero se acentúe en la superficie del material, registrando una variación porcentual del -61% y 73%, respectivamente.

En el corte C, el aumento en el semi ángulo de aproximación tiene un gran efecto en el comportamiento de la presión hidrostática. Tanto en el eje como en la superficie del material se presentan estados de compresión, mientras que en la zona comprendida entre los nodos 5-9 se experimenta una burbuja de tracción. Esto se debe a que producto del aumento en el semi ángulo se reduce la presión hidrostática en toda la sección, produciéndose las mayores variaciones en el eje y en la superficie, originando el cambio de signo.



**Figura 4-73: Distribución de la presión hidrostática configuración 2 reducción 31%**

Por último, los cortes D y E muestran el mismo comportamiento que la configuración anterior. En estos cortes, el efecto del aumento en el semi ángulo produce que el estado de compresión en las zonas internas sea más intenso (con variaciones porcentuales de 80% y 86%, respectivamente), mientras que el estado de tracción en las zonas externas se mantiene para ambos cortes.

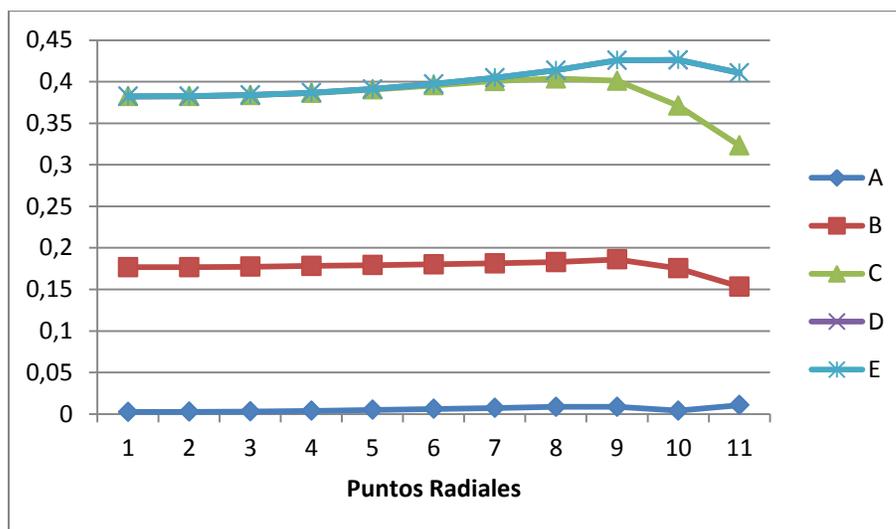
De manera complementaria, en el mapa de colores mostrado en la Figura 4-73, se aprecia la distribución de esta variable para esta configuración. Gracias a éste se puede apreciar cómo los estados de presiones, entre los cortes A y C, se distribuyen para ir formando una burbuja de compresión en la superficie, producto del contacto entre el alambre y el dado.

Avanzando hacia el corte C, también permite apreciar cómo las presiones se modifican producto del aumento en el semi ángulo, pudiendo así distinguir cómo se reducen las presiones en esta zona.

Por último, la zona correspondiente a los cortes D y E, si bien no muestran un cambio en su comportamiento, si permite apreciar cómo los valores de las presiones

aumentan tanto en el estado de compresión, localizado en las zonas internas, cómo en el estado de tracción, localizado en la superficie del material.

En la Figura 4-74 se muestra la distribución de la deformación plástica en los diferentes cortes realizados al material.

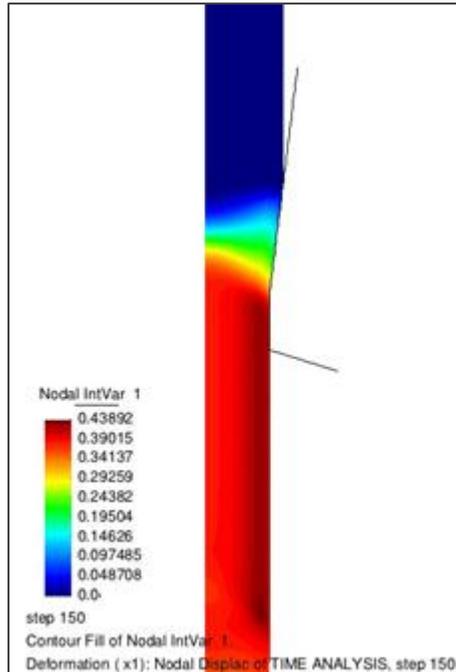


**Figura 4-74: Deformación plástica configuración 2 reducción 31%**

Se puede apreciar en el corte A cómo la deformación plástica sigue siendo muy pequeña, pese a que porcentualmente respecto de la configuración anterior registra un incremento promedio del orden del 280% en toda la sección.

De esta manera es en el corte B donde se confirma el inicio de la deformación plástica, ya que en el eje se alcanzan valores cercanos al 50% de la deformación alcanzada en los cortes siguientes. Respecto a la tendencia radial mostrada por este corte se puede observar que a medida que se avanza hacia la superficie, la deformación plástica registra leves aumentos (aunque gráficamente se percibe constante) hasta un punto (nodo 9) desde el cual comienza a decaer hasta alcanzar un valor menor al alcanzado en el eje. Los valores alcanzados en este corte, debido al aumento en el semi ángulo experimentan un incremento respecto de la configuración anterior del orden del 14% en promedio.

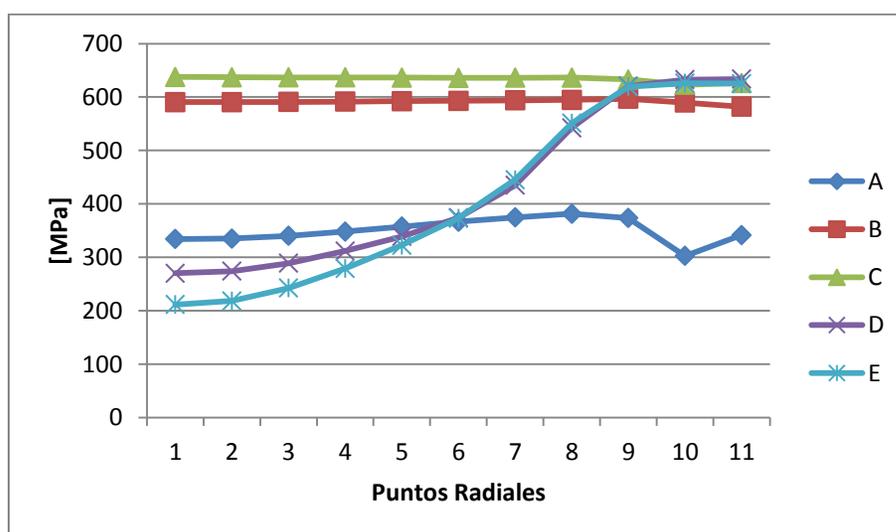
En cuanto a los cortes C, D y E, el valor obtenido en las zonas internas del material es muy similar entre sí y al obtenido con la configuración anterior (variación inferior al 1%). La diferenciación entre el primero de estos y los otros dos ocurre en las cercanías de la superficie (nodo 8), donde el corte C, tras un leve incremento radial, alcanza su máximo para luego experimentar un decaimiento, alcanzando valores menores a los obtenidos en el eje, al llegar a la superficie, mientras que los cortes D y E, experimentan un incremento sostenido hasta llegar al nodo 10, donde se registra el valor máximo, para luego decaer levemente al llegar a la superficie. Respecto a la variación experimentada por estos cortes debido al aumento en el semi ángulo se obtiene que el corte C registra un incremento del orden del 3% promedio en toda la sección, salvo en la superficie donde la deformación plástica decae un 9%. Para los cortes D y E este incremento no es superior al orden del 4% en promedio (con un incremento máximo del orden del 8% en el nodo donde se registra la máxima deformación plástica).



**Figura 4-75: Distribución de la deformación plástica configuración 2 reducción 31%**

Observando el mapa de colores de la Figura 4-75 se puede apreciar cómo el inicio de la deformación plástica se adelanta axialmente y el cómo el aumento en este sentido se acelera producto del incremento en el semi ángulo de aproximación. Además, esta figura permite notar la localización de la deformación en una zona cercana a la superficie, rompiendo la uniformidad mostrada en la configuración anterior.

Para el análisis de la tensión de von Mises los cortes y el mapa de colores se muestran en las Figuras 4-76 y 4-77, respectivamente.



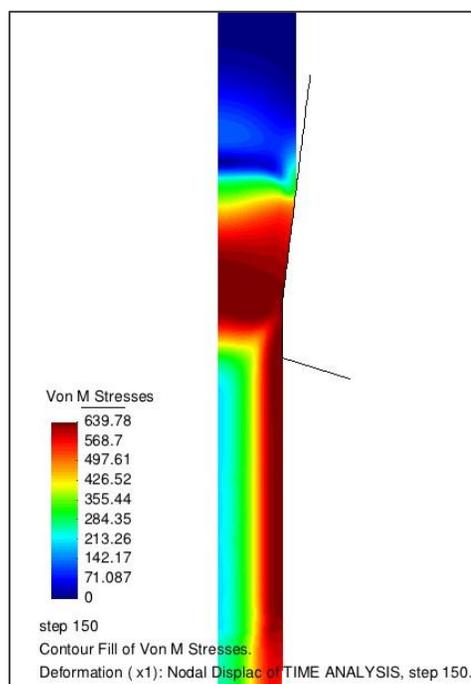
**Figura 4-76: Tensión de von Mises configuración 2 reducción 31%**

Como puede observarse en la Figura 4-76, en el corte A se experimenta un aumento en los valores alcanzados en toda la sección del orden del 14% en promedio (con un máximo del 21% en el nodo 9, donde se marca el máximo valor de la tensión de von Mises en este corte). Producto de este aumento en las tensiones, la tendencia radial mostrada por esta variable es ascendente a medida que se avanza hacia la superficie.

Un efecto similar experimenta el corte, producto del aumento en el semi ángulo. Sin embargo el incremento en los valores de las tensiones no es superior al 3% en toda la sección. Por su parte, el corte C experimenta tensiones levemente inferiores a las registradas con la configuración anterior, registrándose la mayor diferencia en el nodo

10, siendo ésta del orden del 2,28%. Es por esto que, en ambos cortes, la tendencia radial no se ve modificada respecto de la configuración anterior.

Finalmente, el comportamiento de la tensión de von Mises en los cortes D y E, correspondiente al momento en que el alambre está abandonando el proceso de trefilado, producto del aumento en el semi ángulo, registra un decrecimiento en toda la sección. Cabe destacar que este decrecimiento se percibe mejor entre los nodos 1-8, ya que entre estos nodos la variación porcentual promedio es del orden del 23% y 25% respectivamente, mientras que para los nodos 9-11, es del orden del 2% en ambos. Producto de este efecto es que se puede percibir cómo en el eje las tensiones registradas por estos cortes son inferiores a las alcanzadas en el corte A, mientras que en la zona cercana a la superficie, se mantienen por sobre el corte C. Cabe destacar que pese a todo esto, la tendencia radial no se modifica respecto de la configuración anterior.

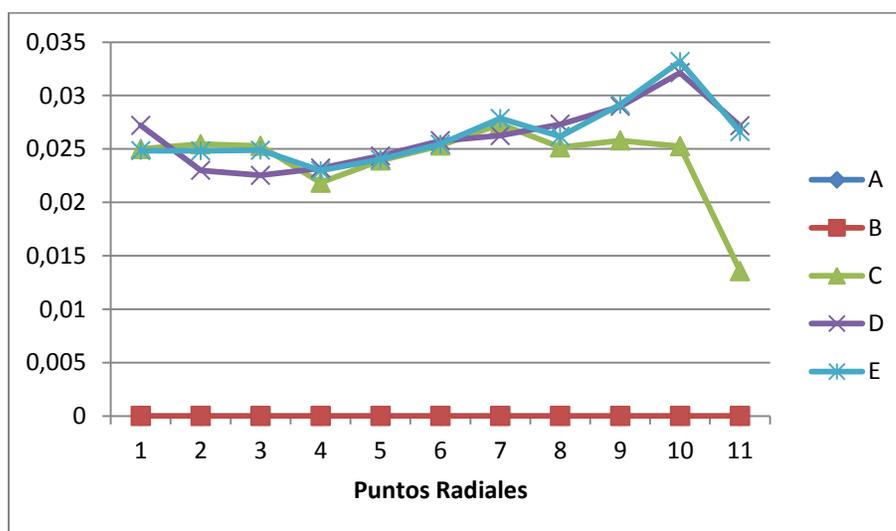


**Figura 4-77: Distribución de la tensión de von Mises configuración 2 reducción 31%**

De manera complementaria en la Figura 4-77, donde se muestra el mapa de colores para esta variable, se aprecia cómo la evolución axial de las tensiones se acelera producto del incremento en el semi ángulo. Además, gracias a este mapa es posible distinguir cómo a la altura del corte C se registra un estado de altas tensiones y como en la salida del proceso de trefilado se marcan claramente los estados de alta y bajas tensiones.

A continuación, en las Figuras 4-78 y 4-79 se muestra el comportamiento de la variable de daño obtenido utilizando el primer criterio de evolución.

En la Figura 4-78, donde se aprecia el daño en los diferentes cortes realizados, se puede notar que el aumento en el semi ángulo no afecta el comportamiento de los cortes A y B, permaneciendo esta zona libre de daño.



**Figura 4-78: Daño con primer criterio de evolución configuración 2 reducción 31%**

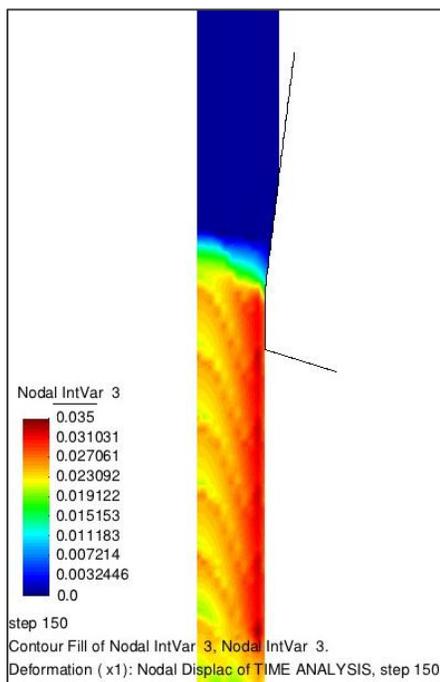
El efecto producido por el cambio en la configuración se percibe a partir del corte C, ya que es a partir de esta zona que se experimenta daño en el material. Este efecto se traduce en un aumento del orden del 13% en promedio de toda la sección, salvo en la superficie, donde el efecto es el contrario, registrándose un decrecimiento del daño en un 25%. De esta manera se puede apreciar como la tendencia radial permanece constante entre los nodos 1-10, para en la superficie registrarse una caída del daño

experimentado por el material. Cabe destacar que el efecto del cambio en la configuración genera una reacción muy inferior a la que se evidenció en la reducción de 21% al realizar el mismo aumento en el semi ángulo.

En cuanto al daño que se aprecia en los cortes D y E, se registra un incremento en toda la sección de un orden del 14% en cada corte, muy similar al efecto evidenciado en el corte anterior y manteniendo valores similares con este entre los nodos 1-8. Teniendo en cuenta que el aumento producto del cambio en la configuración no es el mismo para cada nodo, se puede apreciar que el daño evidencia variaciones en el sentido radial, dando origen a una tendencia ascendente, alcanzando su máximo en el nodo 10, para luego registrar un leve decaimiento en la superficie.

Cabe destacar que pese al aumento experimentado por esta variable, el daño en el material sigue encontrándose por debajo del punto crítico, lo cual indica que no se produce el defecto del estallido central, siendo consistente con los resultados obtenidos en [14].

Adicionalmente, en la Figura 4-79, se aprecia el mapa de colores para la distribución del daño en el material. En esta se puede distinguir como es a partir del fin de la zona de deformación (corte C) donde comienza a desarrollarse el daño. Además es interesante apreciar como el aumento en el semi ángulo modifica el comportamiento radial del daño, pudiéndose notar como en una zona cercana a la superficie se alcanzan valores superiores a los registrados en las zonas internas del material. Por otra parte, de manera similar a lo evidenciado al simular la reducción de 21% con esta misma configuración, se puede observar como el daño evidencia un comportamiento secuencial en el sentido axial.

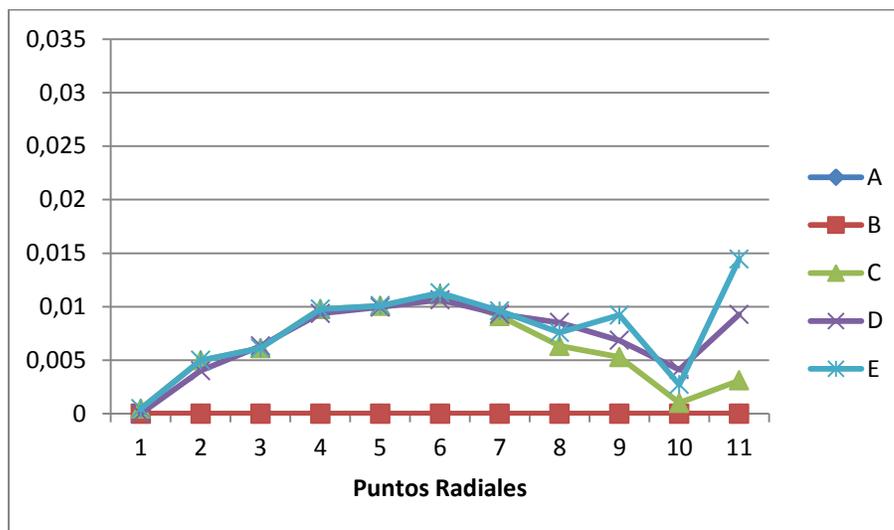


**Figura 4-79: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 2 reducción 31%**

A continuación, luego de observar los resultados entregados por la simulación del proceso utilizando el primer criterio de evolución de daño, se muestra en las Figuras 4-80 y 4-81 el daño obtenido utilizando el segundo criterio de evolución.

De manera consistente a lo obtenido con el criterio de daño anterior y con las configuraciones anteriores, en la Figura 4-80 se puede apreciar como los cortes A y B no registran presencia de daño.

En cuanto al daño experimentado por los cortes siguientes, C, D y E, se puede observar que para esta configuración el cambio en el criterio de evolución produce un decrecimiento generalizado en toda la sección del material, del orden del 70%, produciendo incluso que se registren valores de daño menores que los alcanzados en la configuración anterior. Sin duda la mayor diferencia se puede preciar en el nodo correspondiente al eje del material, ya que con el segundo criterio de evolución el daño experimentado en este punto es muy cercano a cero.



**Figura 4-80: Daño con segundo criterio de evolución configuración 2 reducción 31%**

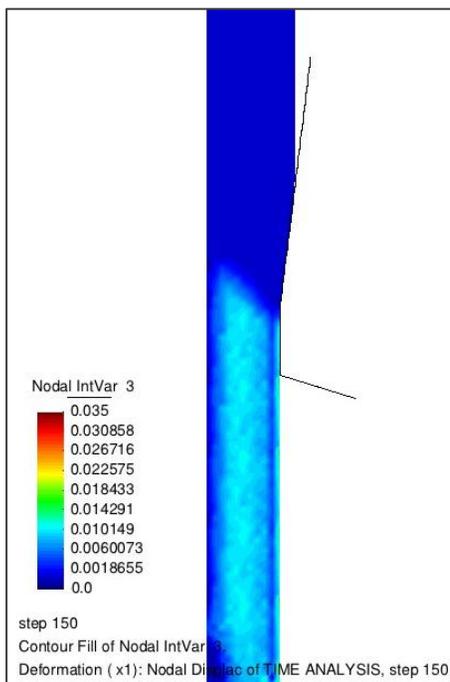
Respecto al comportamiento del daño reflejado en estos cortes se puede decir que la modificación en el criterio produce a su vez un cambio en la tendencia radial. Es claro apreciar cómo entre los nodos 1-10, estos tres cortes evidencian un comportamiento parabólico, alcanzando su máximo en el nodo 6. En cuanto al comportamiento de esta variable al llegar a la superficie, el corte C muestra un leve crecimiento en el daño, mientras que los cortes D y E experimentan un fuerte incremento, llegando incluso en el corte E a representar el máximo de daño en el material.

Observando el mapa de colores presentado en la Figura 4-81, es posible apreciar cómo se distribuye en el material el daño obtenido con el segundo criterio de evolución.

Gracias a este mapa de colores se puede distinguir cómo el nivel de daño alcanzado es muy inferior respecto del obtenido con el primer criterio. Además, es interesante notar como al imponer que el daño solamente se desarrolle ante la presencia de presión hidrostática positiva, el daño cambie su distribución radial y mantenga axialmente valores constantes. Todo esto manteniéndose siempre muy por debajo del punto crítico.

Por otra parte cabe destacar que el daño obtenido con el segundo criterio de evolución para esta configuración presenta un comportamiento diferente al evidenciado

en la reducción de 21% ante el aumento en el semi ángulo, ya que se espera que al ir incrementando este factor, el daño aumente.



**Figura 4-81: Distribución de daño con segundo criterio de evolución configuración 2 reducción 31%**

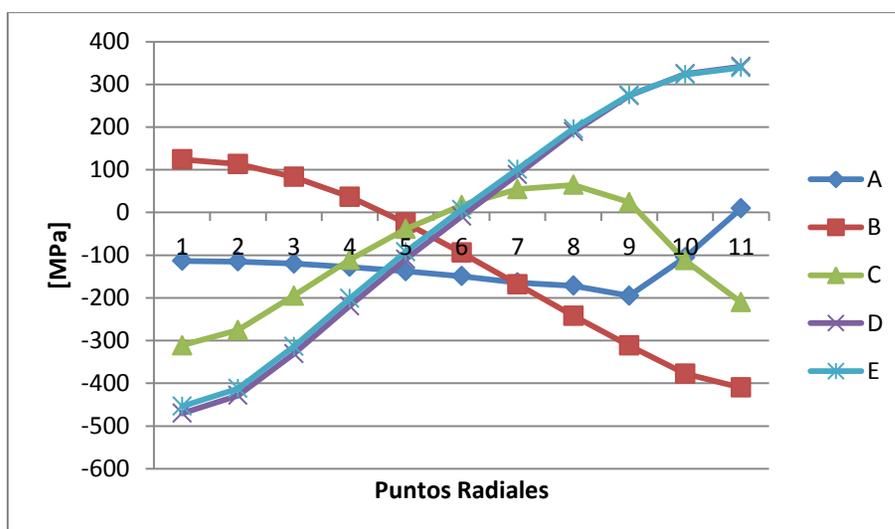
#### 4.3.2.3 Configuración 3

Ensayando el tercer semi ángulo para la reducción de 31%, se obtienen los resultados mostrados a continuación.

La presión hidrostática en el corte A (Figura 4-82), presenta un estado de compresión en toda la sección del material (salvo en la superficie) con valores menos negativos en las zonas internas (con una diferencia porcentual del 53%) y más negativos en la zona cercana a la superficie (en el nodo 9 se registra un aumento del 50%) que los obtenidos con la configuración anterior. Cabe destacar que a partir del nodo 9 se registra un acelerado incremento en la presión hidrostática hacia la superficie, el cual genera un estado de tracción al llegar a ésta. Sin embargo producto del aumento en el semi ángulo

este estado de tracción es muy pequeño, registrando una disminución del 86% respecto de la configuración anterior.

En cuanto al corte B, en éste se produce un cambio de tendencia. Debido al aumento en el semi ángulo, en las zonas internas del material (nodos 1-4), se experimenta un estado de tracción. Es interesante notar que este fenómeno se produce en la reducción de 21% al utilizar la segunda configuración. Para el resto de la sección del alambre (nodos 5-11) se evidencia un estado de compresión que alcanza su máximo en la superficie, registrando un aumento del 54% respecto de la configuración anterior.

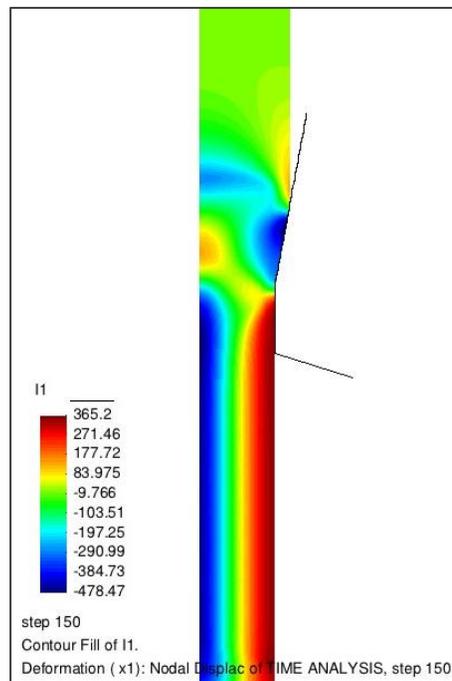


**Figura 4-82: Presión hidrostática configuración 3 reducción 31%**

Respecto a la presión hidrostática en el corte C, se puede apreciar una tendencia similar a la configuración anterior. El aumento del semi ángulo genera una nueva disminución en los valores de presión alcanzados en toda la sección, produciendo que, tanto en el eje como en la superficie, los estados de compresión se acentúen, registrando variaciones porcentuales de 77% y 25%, respectivamente. Además producto de esta disminución generalizada de la presión hidrostática, la transición al estado de tracción se produce en el nodo 6.

Por último, los cortes D y E, muestran el mismo comportamiento paralelo que las configuraciones anteriores. En cuanto a los valores alcanzados en el eje, estos son

menores, con una reducción porcentual promedio del 37% y 42% respectivamente. Por otra parte, los valores alcanzados en la superficie son muy similares a los obtenidos con la configuración anterior, con variaciones porcentuales menores al 1%.



**Figura 4-83: Distribución de la presión hidrostática configuración 3 reducción 31%**

Gracias al mapa de colores, mostrado en la Figura 4-83, puede notarse el cambio en el comportamiento del corte A, debido a que el estado de tracción presente en la superficie del material se registra en la región anterior a este corte.

En la zona en la que el alambre se encuentra en contacto con el dado (entre los cortes A y C) se puede apreciar la formación de una burbuja de tracción en el eje de éste, lo cual concuerda con lo observado en el corte B. Además, producto del aumento en el semi ángulo, el estado de compresión experimentado por las zonas externas del material se aprecia más intenso y más localizado.

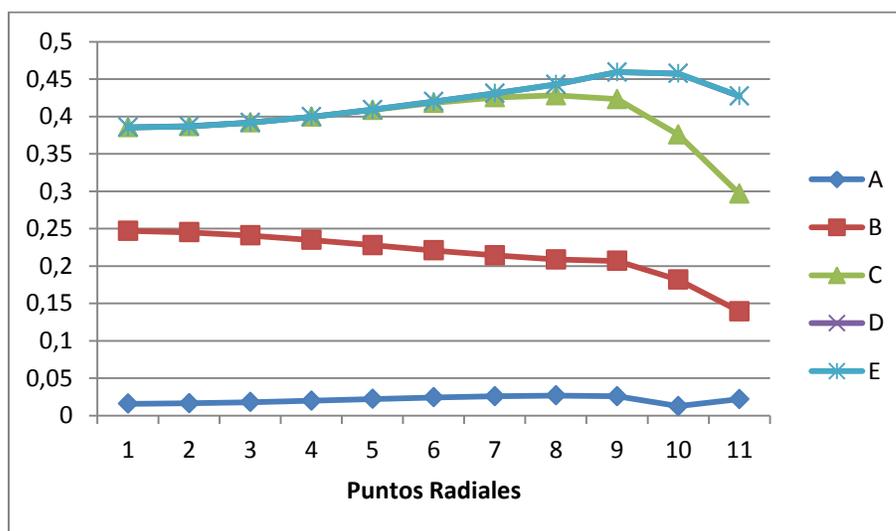
En cuanto a las zonas posteriores al inicio de la zona recta (corte C), el comportamiento de esta variable es similar al obtenido con la configuración anterior,

logrando distinguirse las zonas de compresión y tracción en las zonas internas y en la superficie, respectivamente.

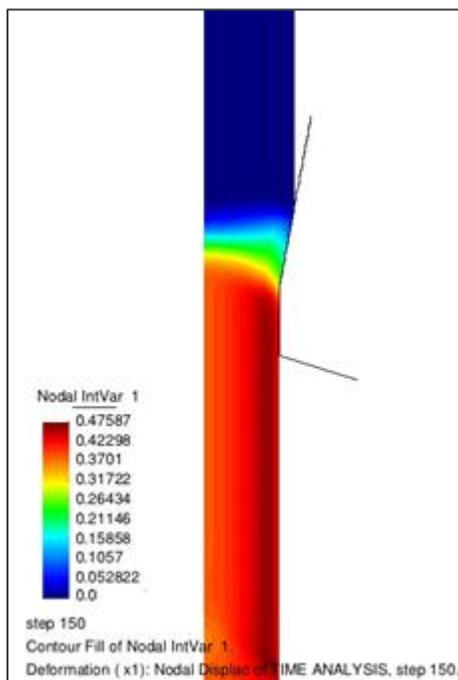
A continuación se analiza la deformación plástica experimentada por el material, mostrado en las Figuras 4-84 y 4-85.

De manera similar a la configuración anterior, en el corte A (Figura 4-84), si bien se percibe un alto incremento porcentual producto del aumento en el semi ángulo (del orden del 300%), los valores de deformación siguen siendo pequeños a esta altura del proceso. Debido a ésto nuevamente es en el corte B donde se aprecia el inicio de la deformación plástica.

Los valores alcanzados en el corte B muestran un cambio en la tendencia evidenciada en las configuraciones anteriores, debido a que el valor máximo de deformación se registra en el eje (producto de un incremento porcentual del 40%) y al avanzar radialmente hacia la superficie esta variable decae. Este cambio en el comportamiento se debe a que el aumento en el semi ángulo produce un incremento mayor en las zonas internas del material, el cual disminuye a medida que se avanza a la superficie, donde incluso se registra una disminución del 9%.



**Figura 4-84: Deformación plástica configuración 3 reducción 31%**

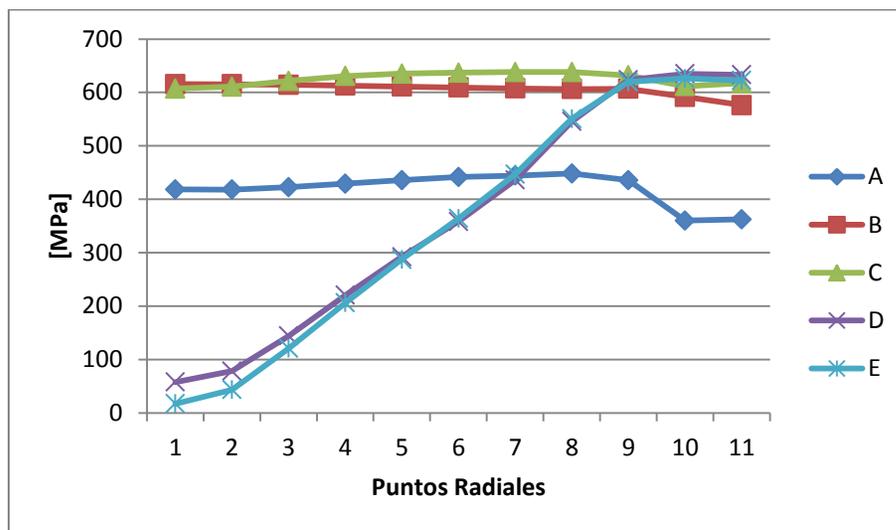


**Figura 4-85: Distribución de la deformación plástica configuración 3 reducción 31%**

Respecto a los cortes C, D y E, el valor de la deformación plástica en el eje no registra una variación significativa producto del aumento en el semi ángulo (inferior al 1%). Por otra parte la tendencia mostrada por estos cortes es similar a la evidenciada en la configuración anterior, registrándose variaciones del orden del 5% y del 8% en los valores máximos alcanzados en los cortes C y D respectivamente.

De manera complementaria, teniendo en cuenta el mapa de colores de la Figura 4-85 se puede notar cómo debido al incremento en el semi ángulo de aproximación, el incremento axial de la deformación plástica es más acelerado. Además, de manera similar a la configuración anterior, este aumento en el semi ángulo produce una localización de la deformación plástica en una zona cercana a la superficie.

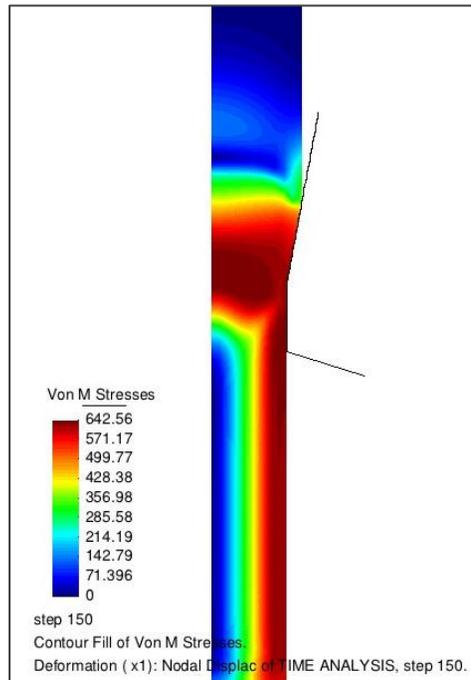
Para el análisis de la tensión de von Mises, obtenida con esta configuración, se muestra en las Figuras 4-86 y 4-87 los valores obtenidos para los diferentes cortes y el mapa de colores respectivamente.



**Figura 4-86: Tensión de von Mises configuración 3 reducción 31%**

En el corte A (Figura 4-86) se aprecia un cambio en la tendencia radial de esta variable, ya que si bien se mantiene el comportamiento ascendente hasta alcanzar el máximo en el nodo 9, a partir de este se experimenta un decrecimiento de los valores de las tensiones hasta alcanzar el mínimo en los nodos 10-11. Este fenómeno se explica debido a que producto del aumento en el semi ángulo las tensiones registran un incremento del orden del 21% en toda la sección salvo en la superficie, donde el incremento es apenas del 6%.

En cuanto a los cortes B y C, se puede apreciar que producto del cambio en la configuración, los valores de las tensiones alcanzados y las tendencias radiales son muy similares, siendo estos cortes coincidentes entre los nodos 1-3, mientras que en el resto de la sección el corte C siempre se encuentra por encima. Este hecho se debe a que, de manera similar a la configuración anterior, el aumento en el semi ángulo produce un leve incremento en las tensiones registradas en el corte B (del orden del 3% en promedio), mientras que en el corte C se registra una leve disminución de éstas (del orden del 2%).



**Figura 4-87: Distribución de la tensión de von Mises configuración 3 reducción 31%**

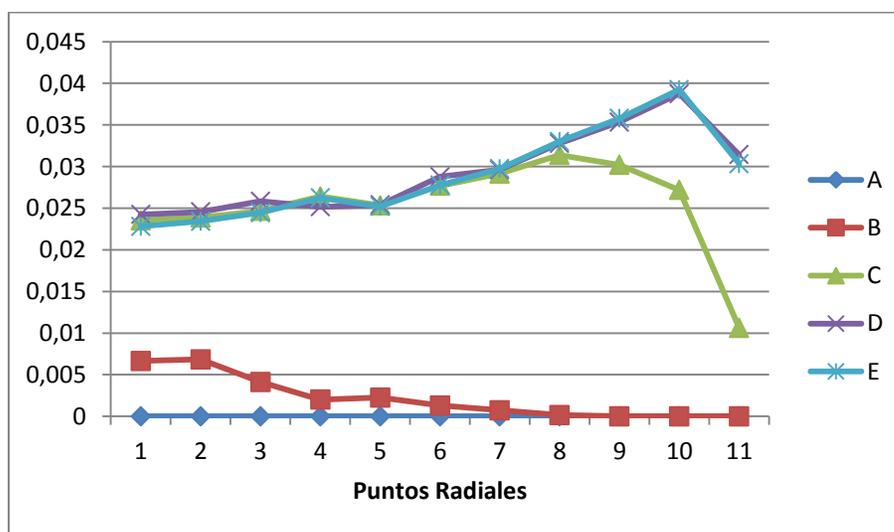
Por último, en los cortes D y E el aumento en el semi ángulo produce un fuerte decrecimiento de la tensión de von Mises registrada en las zonas internas del material (nodos 1-4). Este decrecimiento es mayor en el eje, siendo del orden del 79% y 92% respectivamente, y disminuye radialmente hasta ser del orden del 14% y 11% en el nodo 4. En el resto de la sección de estos cortes se registran variaciones menores, siendo éstas despreciables comparadas con los ya mencionados. Cabe destacar que producto del cambio en la configuración, la tendencia radial de estos cortes, si bien no se modifica su comportamiento ascendente, si lo hace la pendiente, debido al fenómeno ya explicado.

Adicionalmente, en la Figura 4-87, el mapa de colores para esta variable permite apreciar cómo en la salida del proceso de trefilado (corte D) el estado de bajas tensiones que se alcanza en las zonas internas del material disminuye producto del cambio en la configuración. Además permite distinguir como en las cercanías del corte C, el estado de altas tensiones comienza a localizarse de la misma manera que se aprecia en la reducción anterior.

Se muestra a continuación en las Figuras 4-88 y 4-89 el comportamiento del daño experimentado por el material obtenido utilizando el primer criterio de evolución.

Puede apreciarse en la Figura 4-88, como el aumento en el semi ángulo no produce modificaciones en el comportamiento del daño en el corte A, mientras que en el corte B es posible notar como en las zonas internas del material (nodos 1-6) se manifiesta el daño, alcanzando valores inferiores al 30% de los que se registran en los cortes siguientes. Sin embargo la presencia de daño se limita a los nodos ya mencionados, ya que a medida que se avanza radialmente disminuye, alcanzando el cero en el nodo 8.

El comportamiento del daño en el corte C, ante el aumento en el semi ángulo, muestra un leve decrecimiento en los valores alcanzados entre los nodos 1-3 (del orden del 5%). Sin embargo a partir del nodo 4 este comportamiento cambia, registrándose un incremento en el daño, alcanzado un promedio del orden del 13% hasta el nodo 10, ya que nuevamente en la superficie del material se registra un decrecimiento, esta vez del 22%.



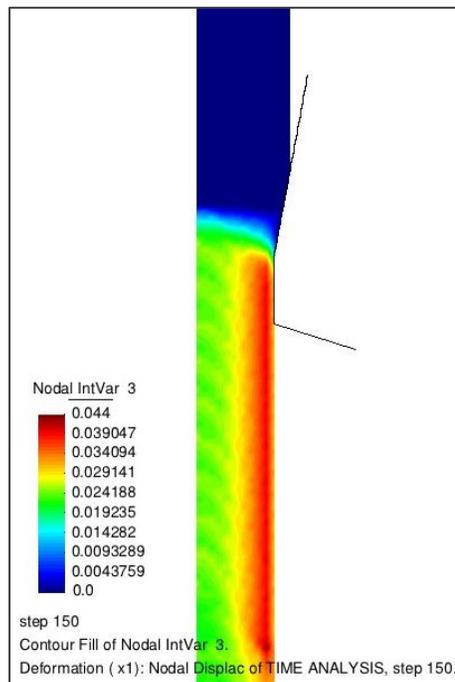
**Figura 4-88: Daño con primer criterio de evolución configuración 3 reducción 31%**

En cuanto al corte D, el cambio en la configuración provoca un decrecimiento del 10% en el daño alcanzado en el eje, mientras que en el resto de la sección se

experimenta un incremento, siendo del orden del 14% en promedio. Por otra parte el corte E registra un comportamiento similar al corte C, evidenciándose un decrecimiento del orden del 5% entre los nodos 1-3, pero manifestando un incremento del orden del 15% en el resto de la sección.

Producto del comportamiento del daño antes descrito para los cortes C, D y E, es que en la Figura 4-88 se observa una tendencia ascendente en el sentido radial, con valores muy similares entre los cortes hasta el nodo 8, ya que el corte C experimenta un fuerte decrecimiento hacia la superficie, mientras que los cortes D y E continúan aumentando, hasta en el nodo 10 alcanzar su máximo.

De manera similar a la configuración anterior, el daño en el material sigue encontrándose por debajo del punto crítico, por lo que no se produce el defecto del estallido central, siendo consistente con los resultados obtenidos en [14].



**Figura 4-89: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 3 reducción 31%**

Complementariamente a lo observado en la Figura 4-88, se aprecia el mapa de colores para la distribución del daño en el material en la Figura 4-89. Gracias a este

mapa se puede distinguir el inicio de la manifestación del daño en una región cercana al corte B.

Además, debido al aumento en el semi ángulo, se puede percibir cómo el daño, a partir del inicio de la zona recta, comienza a localizarse en una región cercana a la superficie, donde se registran valores muy superiores a los alcanzados en las zonas internas.

Por otra parte, es interesante notar como el comportamiento axial del daño no experimenta mayores variaciones y registra un comportamiento secuencial.

Luego de apreciar los resultados de daño en el material obtenidos con el primer criterio de evolución y de modo de poder comparar el daño en el material al modificar en la simulación del proceso de trefilado el criterio de evolución, se presenta a continuación los resultados entregados al utilizar el segundo criterio en las Figuras 4-90 y 4-91.

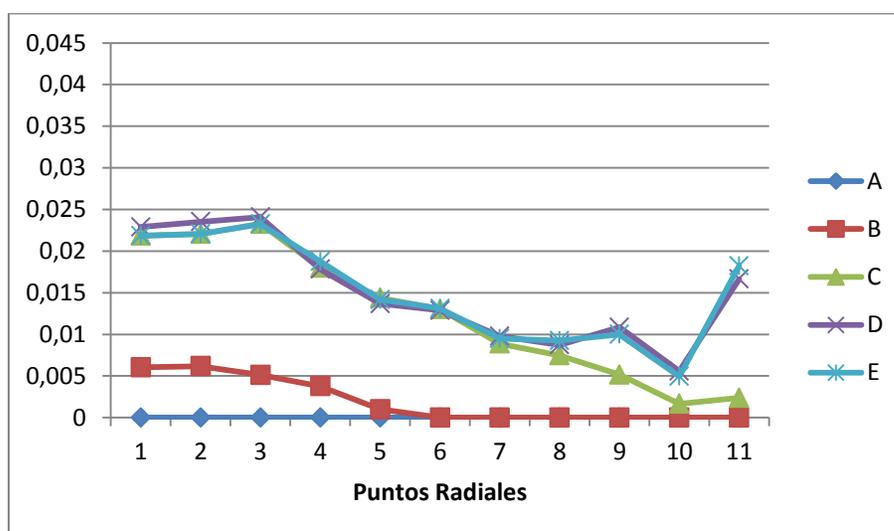
En la Figura 4-90 se puede apreciar cómo el cambio en el criterio y el cambio en el semi ángulo no modifican el comportamiento del daño en el corte A, manteniéndose en cero en toda la sección.

Por otra parte, de manera similar a lo observado en la Figura 4-88 donde el aumento en el semi ángulo produce que se manifieste daño en las zonas internas del material en el corte B, el daño obtenido al utilizar el segundo criterio de evolución evidencia el mismo comportamiento. Cabe destacar que el nivel de daño alcanzado en los nodos 1-2 para ambos criterios de evolución es muy similar, registrando una variación inferior al 10%. Avanzando radialmente se puede registrar que entre los nodos 3-4 el segundo criterio de evolución entrega valores de daño superiores, del orden del 24% y 89% respectivamente. Sin embargo a partir del nodo 5 el segundo criterio entrega valores inferiores, alcanzando el cero en el nodo 6, valor el cual se mantiene en el resto de la sección.

Respecto al daño experimentado en los cortes C, D y E se puede apreciar que el cambio en el criterio de evolución modifica la tendencia radial, produciéndose un decrecimiento a medida que se avanza radialmente. Cabe destacar que el daño alcanzado en las zonas internas (nodos 1-3), manifiesta un nivel similar al alcanzado con el criterio

anterior, registrándose una diferencia porcentual del orden del 7%, 6% y 5% para los cortes C, D y E, respectivamente. En cuanto al comportamiento de estos cortes, se puede apreciar que el segundo criterio de evolución muestra una tendencia radial descendente similar en los tres cortes, produciéndose una diferencia al llegar al nodo 7, ya que el corte C continua con el comportamiento decreciente alcanzando en los nodos 10-11 un valor muy cercano a cero, mientras que los cortes D y E registran un nivel de daño constante entre los nodos 7-9, para luego alcanzar el mínimo en el nodo 10 y en la superficie experimentar un incremento.

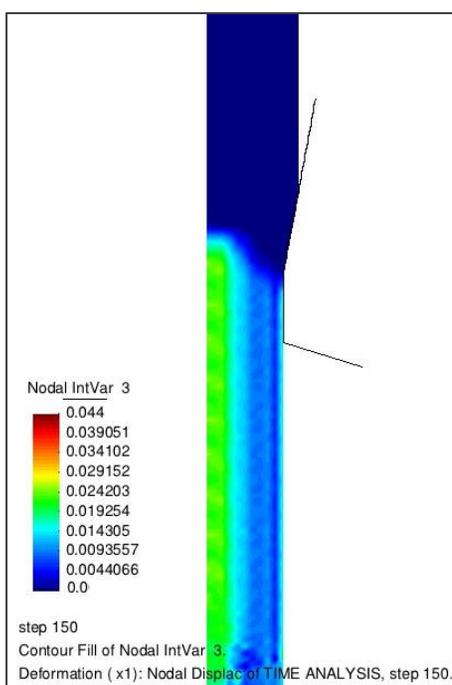
Es interesante destacar que el aumento en el semi ángulo modifica el comportamiento del daño obtenido con el segundo criterio mostrado en la configuración anterior, volviendo a mostrar valores de daño en el eje similares a los obtenidos con el primer criterio, de manera similar a lo evidenciado en la reducción de 21%. En cuanto al resto de la sección el daño obtenido con el segundo criterio de evolución es siempre inferior al obtenido con el primer criterio.



**Figura 4-90: Daño con segundo criterio de evolución configuración 3 reducción 31%**

A modo de complementar el análisis del daño ante la modificación del criterio de evolución, se muestra en la Figura 4-91, el mapa de colores con la distribución del daño obtenido con el segundo criterio.

Gracias a este mapa de colores se puede distinguir cómo el daño adelanta su manifestación a la zona de deformación (corte B), registrándose valores positivos en las zonas internas del material. Además, a partir del paso recto (corte C) el nivel de daño alcanzado en las cercanías del eje se aprecia similar al registrado con el primer criterio de evolución, siendo muy superior al registrado en el resto de la sección. De esta manera se puede decir que de manera similar a lo evidenciado en la Figura 4-71 para la primera configuración, el segundo criterio muestra una localización manteniéndose siempre muy por debajo del punto crítico.



**Figura 4-91: Distribución con segundo criterio de evolución configuración 3 reducción 31%**

#### 4.3.2.4 Configuración 4

Ensayando el cuarto semi ángulo para la reducción de 31%, se obtienen los resultados mostrados a continuación.

En la Figura 4-92, se observa cómo la presión hidrostática en el corte A experimenta un cambio en su comportamiento respecto de las configuraciones

anteriores. Para esta configuración se produce una zona de tracción entre los nodos 1-4, con una tendencia a disminuir radialmente. A partir del nodo 5 el material experimenta un estado de compresión que se extiende hasta la superficie.

Respecto del corte B, el estado de tracción que experimentan las zonas internas del material (nodos 1-5) registra un aumento considerable en los valores alcanzados con un incremento porcentual del 80% en el eje. Por su parte el comportamiento del estado de compresión que experimenta el alambre en el resto de la sección aumenta en menor grado su intensidad, registrando un aumento porcentual del 25% en la superficie.

En el corte C se aprecia cómo al cambio en la configuración produce, en las zonas internas del material (nodos 1-5), un efecto contrario al que se venía apreciando. Para esta zona, donde se evidencia un estado de compresión, se registra una disminución en la intensidad de este campo de presiones producto del aumento en el semi ángulo del orden del 60% en promedio). Para el resto de la sección, donde entre los nodos 6-8 se registra un estado de tracción y entre los nodos 9-11 un estado de compresión, el efecto del aumento en el semi ángulo produce la disminución de los valores de las tensiones positivas y una intensificación de las tensiones negativas, de la misma manera que en las configuraciones anteriores.

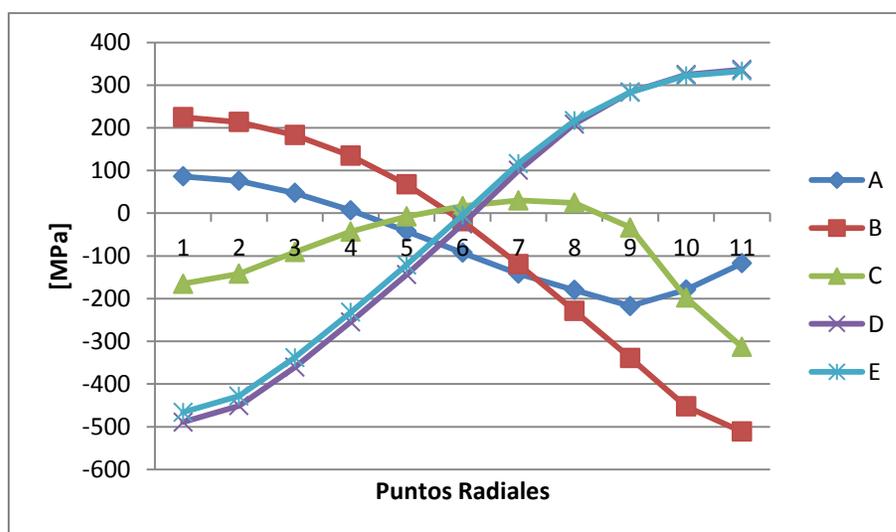
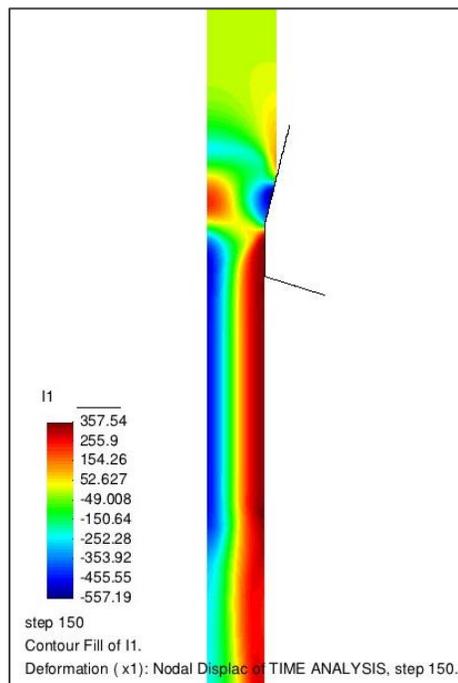


Figura 4-92: Presión hidrostática configuración 4 reducción 31%

Finalmente, los cortes D y E mantienen su comportamiento paralelo. El efecto que produce sobre la presión hidrostática, en estos cortes, el aumento en el semi ángulo se aprecia en leves variaciones experimentadas , tanto en el estado de compresión experimentado en las zonas internas como en el de tracción experimentado en la superficie del material..



**Figura 4-93: Distribución de la presión hidrostática configuración 4 reducción 31%**

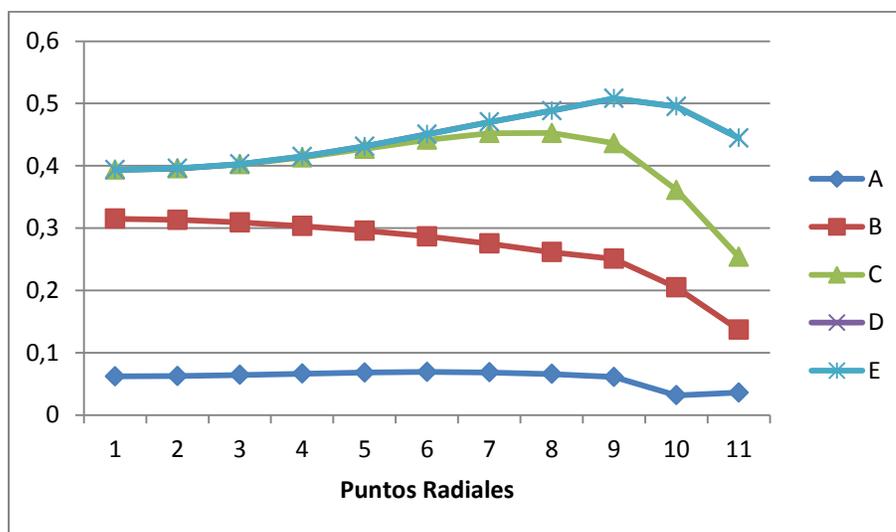
Complementariamente, en el mapa de colores mostrado en la Figura 4-93, puede notarse cómo la burbuja de tracción que se ha ido originando en las zonas internas del material entre los cortes A y C, se intensifica producto del aumento en el semi ángulo. Además, otro efecto producto cambio en la configuración evidenciado en las zonas externas del material entre los mismos cortes es la intensificación y localización de la burbuja de compresión.

Respecto del comportamiento de la presión hidrostática luego del corte C (inicio del paso recto), este es similar a las configuraciones anteriores.

A continuación se presenta en la Figura 4-94 el comportamiento de la deformación plástica experimentada por el material.

Puede notarse cómo, debido al aumento en el semi ángulo, la deformación plástica experimentada en el corte A alcanza valores mayores (registrando una variación porcentual del 200% en promedio). Sin embargo estos valores continúan siendo muy pequeños en comparación con los alcanzados en los cortes siguientes.

El corte B experimenta también un aumento en los valores de la deformación plástica producto del cambio en la configuración (del orden del 26% en promedio, salvo en la superficie donde se registra una leve variación decreciente), logrando aproximarse en el eje al valor de deformación alcanzado por los cortes siguientes. En cuanto al comportamiento decreciente a medida que se avanza radialmente evidenciado en este corte, no se registran modificaciones respecto de la configuración anterior

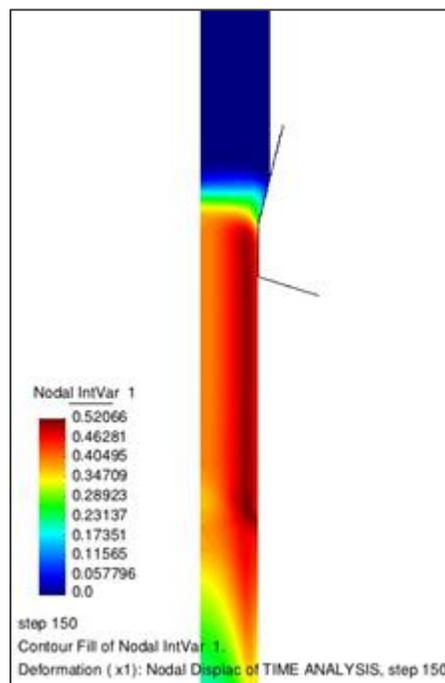


**Figura 4-94: Deformación plástica configuración 4 reducción 31%**

Observando los resultados obtenidos para los cortes C, D y E, se puede apreciar que el valor de la deformación plástica en el eje del material es el mismo para los cortes, experimentando una leve variación debido al aumento en el semi ángulo (del orden del 2%). En cuanto a la tendencia mostrada por estos cortes se puede apreciar que se conserva un comportamiento similar a las configuraciones anteriores, donde el corte C

se separa de los otros dos a partir del nodo 8 y experimenta un incremento del 8% promedio (salvo en los nodos 10 y 11 donde se registra una disminución del 4% y 15%, respectivamente), mientras que los cortes D y E se mueven en paralelo con valores casi idénticos en toda la sección del material alcanzando su valor máximo en el nodo 9 el cual registra un incremento porcentual del 11%.

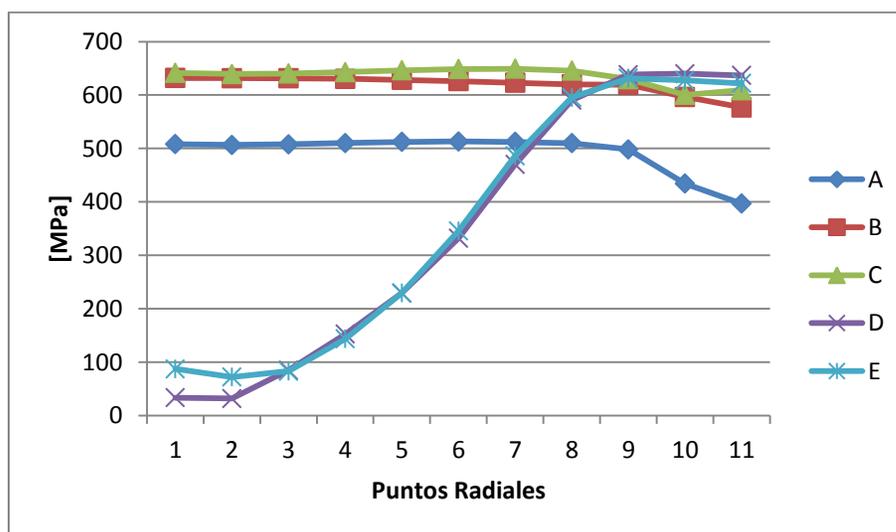
Teniendo en cuenta el mapa de colores de la Figura 4-95 se puede notar cómo debido al cambio en la configuración, el incremento axial de la deformación plástica sea más acelerado. Además, de manera similar a las configuraciones anterior, el aumento en el semi ángulo produce una localización de la deformación plástica en la zona cercana a la superficie, produciéndose una ruptura de la uniformidad radial mostrada en las primeras configuraciones.



**Figura 4-95: Distribución de la deformación plástica configuración 4 reducción 31%**

La tensión de von Mises se muestra en las Figuras 4-96 y 4-97 correspondientes a los valores obtenidos para los diferentes cortes y el mapa de colores respectivamente.

Se puede decir que en el corte A (Figura 4-96) la tendencia radial se mantiene similar a la configuración anterior, salvo en la superficie, donde en esta ocasión se registra el mínimo valor de la tensión de von Mises, acercándose a los alcanzados en los cortes siguientes. Este fenómeno se explica debido a que el aumento en el semi ángulo nuevamente produce un incremento en el valore de las tensiones alcanzadas del orden del 18% en promedio entre los nodos 1-10, mientras que en la superficie este incremento es apenas del 9%.

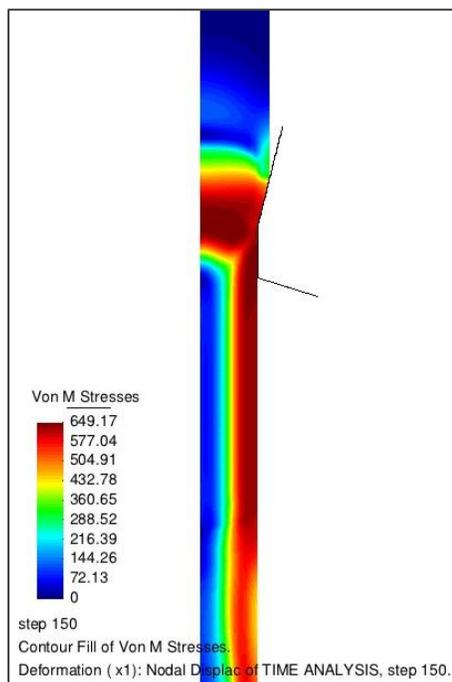


**Figura 4-96: Tensión de von Mises configuración 4 reducción 31%**

Para las tensiones registradas en los corte B y C, el cambio en la configuración produce un aumento de estas del orden del 2% en toda la sección del corte B y del orden del 3% entre los nodos 1-8 del corte C, ya que para los nodos 9-11 de este corte se registra un decrecimiento de la tensiones del orden del 1%. Debido a que estas variaciones son leves, el comportamiento radial de estas variables no se ve modificado.

Por su parte el corte D registra un comportamiento ante el aumento en el semi ángulo similar al experimentado en la configuración anterior. Esta vez el mayor decrecimiento en la tensión de von Mises se produce en el nodo 2, siendo del orden del 60%, mientras que el menor se registra en el nodo 6, siendo apenas del 7%. Cabe destacar que en promedio, este decrecimiento experimentado entre los nodos 1-6 alcanza un

orden del 33%. Al avanzar hacia la superficie el comportamiento ante el aumento en el semi ángulo cambia, registrando se incrementos en las tensiones alcanzadas, siendo del orden del 8% entre los nodos 7-8, mientras que para el resto de la sección son inferiores al 2%.



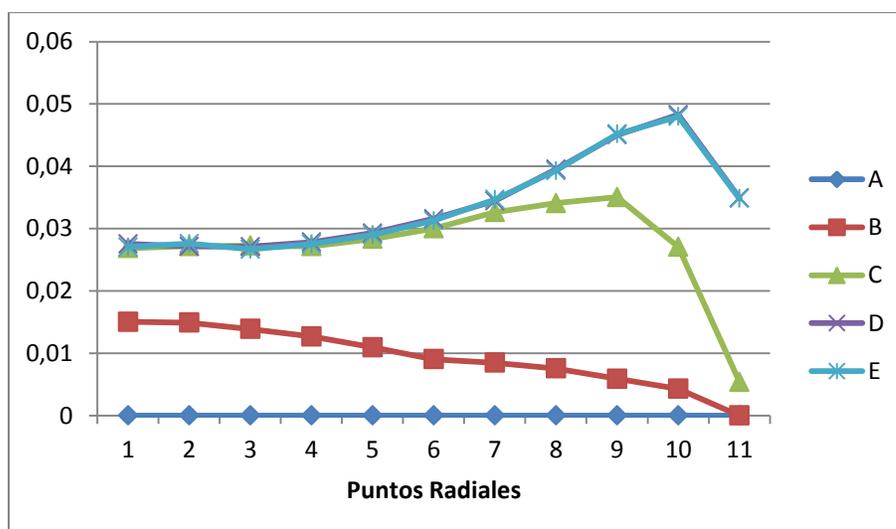
**Figura 4-97: Distribución de la tensión de von Mises configuración 4 reducción 31%**

En cuanto al corte E, la tensiones evidencian efectos de incremento y decrecimiento a lo largo de la sección. El incremento más importante se experimenta en el eje, siendo del 400%, mientras que en el nodo 2 y entre los nodos 7-8 el aumento en las tensiones es del orden del 65% y 8% respectivamente. Respecto al decrecimiento, éste se produce entre los nodos 3-6, con un orden promedio del 22%. Cabe destacar que respecto a las variaciones antes mencionadas, las que se registran en el resto de la sección (nodos 9-11) son despreciables.

Debido al comportamiento de estos últimos cortes (cortes D y E), se puede distinguir en la Figura 4-96, cómo las tensiones alcanzadas por el corte D son menores que las alcanzadas por el corte E en las zonas internas del material (nodos 1-2). Este

hecho concuerda con lo visto en la reducción anterior, donde un estado de bajas tensiones se empieza a localizar en esta zona.

Finalmente, de manera complementaria, en la Figura 4-97, el mapa de colores permite apreciar como en la salida del proceso de trefilado (corte D) se produce la localización de un estado de bajas tensiones en las zonas internas del material, levemente inferiores a las registradas en el corte siguiente. Además, de la misma manera que con la configuración, el aumento en el semi ángulo produce la localización del estado de altas tensiones experimentado por el material a la altura del corte C.



**Figura 4-98: Daño con primer criterio de evolución configuración 4 reducción 31%**

Para el análisis del daño en esta configuración, se muestra a continuación en las Figuras 4-98 y 4-99 el comportamiento de esta variable obtenido utilizando el primer criterio de evolución.

De manera similar a las configuraciones anteriores, el corte A (Figura 4-98) no registra presencia de daño.

Por otra parte, el corte B experimenta un aumento considerable en los valores de daño alcanzado, pudiéndose afirmar que el aumento en el semi ángulo adelantó el inicio de la manifestación del daño, debido a que se registra un incremento porcentual del orden del 300% respecto a la configuración anterior. Además, el comportamiento radial

de este corte se modifica, ya que si bien se mantiene el decrecimiento del daño a medida que se avanza hacia la superficie, el cero solamente se alcanza al llegar a ésta

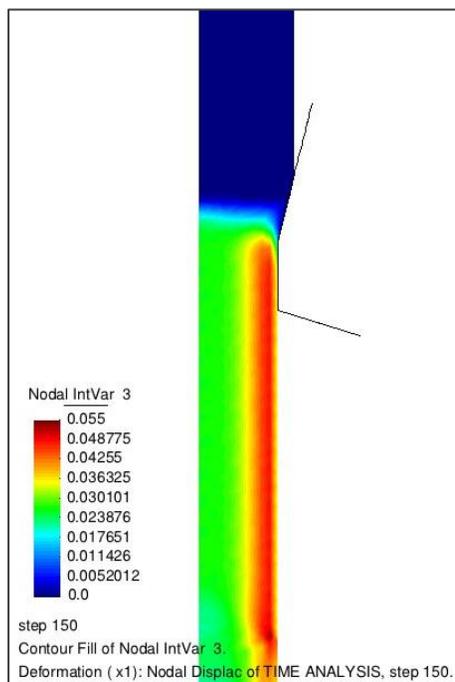
Respecto al comportamiento del corte C, el cambio en la configuración produce un incremento del daño experimentado por el material entre los nodos 1-9, siendo del orden del 11% en promedio. En cuanto a los nodos 10 y 11, el daño experimenta una disminución en el valor alcanzado, siendo más significativa la evidenciada en el nodo 11 que es del 49%. Debido a este comportamiento, el daño en este corte conserva una tendencia radial ascendente hasta el nodo 9, para luego decaer al llegar a la superficie registrando valores inferiores a los alcanzados en el eje.

Teniendo en cuenta lo antes descrito para el corte C y el echo de que el aumento en el semi ángulo produce un incremento del daño en toda la sección de los cortes D y E, siendo del orden del 15% y 16% respectivamente, se puede observar que estos tres cortes registran valores similares para esta variable entre los nodos 1-7. A partir de este punto, los cortes D y E evidencian un ascenso sostenido, de manera similar a las configuraciones anteriores, hasta alcanzar el máximo en el nodo 10. Cabe destacar que este máximo corresponde al 50% del punto crítico, el cual aun no se logra alcanzar, descartando la manifestación del defecto del estallido central, siendo de esta manera consistente con los resultados obtenidos en [14].

A modo de complemento, en la Figura 4-99, se aprecia el mapa de colores para la distribución del daño en el material, donde se puede distinguir como se adelante el inicio de la manifestación del daño a la región cercana al corte B.

Además, debido al aumento en el semi ángulo, se puede percibir cómo el daño, a partir del inicio de la zona recta, se localiza aun más en una región cercana a la superficie, registrando valores muy superiores a los alcanzados en las zonas internas.

Finalmente, es interesante notar como el comportamiento axial del daño no experimenta variaciones a partir de la zona recta, perdiéndose además el comportamiento secuencial mostrado en las configuraciones anteriores.



**Figura 4-99: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 4 reducción 31%**

Continuando con el análisis del daño, en las Figuras 4-100 y 4-101 se presentan los resultados de daño obtenidos al realizar la simulación del proceso de trefilado incorporando el segundo criterio de evolución.

Se puede apreciar en la Figura 4-100 cómo el cambio en el criterio de evolución no altera el comportamiento del daño experimentado en el corte A. En este corte, de manera similar a las configuraciones anteriores, no se manifiesta presencia de daño.

En cuanto al comportamiento del corte B, se puede observar cómo el desarrollo de daño en las zonas internas del material (nodos 1-4), obtenido con el segundo criterio de evolución es similar al evidenciado en la Figura 4-98. Para estos nodos se registra, con este nuevo criterio, valores de daño levemente superiores, con una diferencia porcentual del orden del 3% en promedio. En cuanto al comportamiento radial, a partir del nodo 4 se registra un decrecimiento que tiene una pendiente mayor a la evidenciada para el mismo corte con el primer criterio de evolución, produciendo que en el nodo 7 se alcance el nivel cero de daño, valor el cual se mantiene en el resto de la sección.

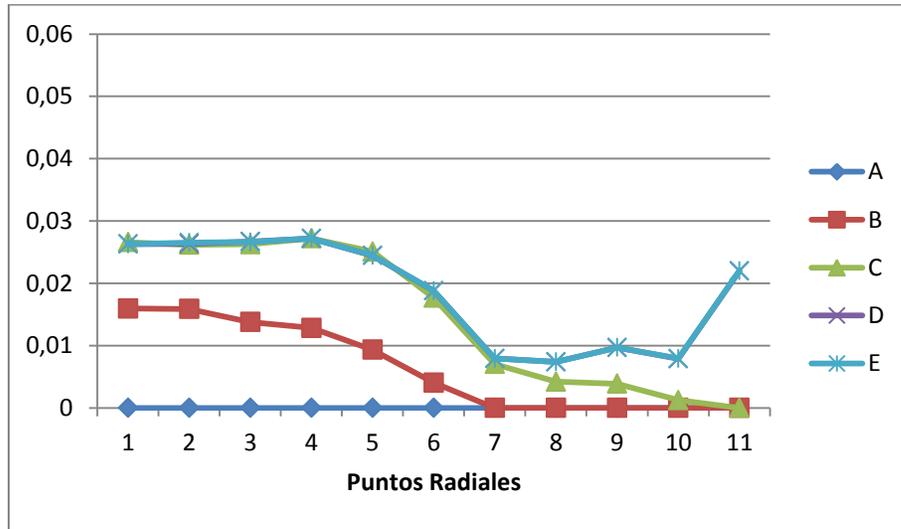


Figura 4-100: Daño con segundo criterio de evolución configuración 4 reducción 31%

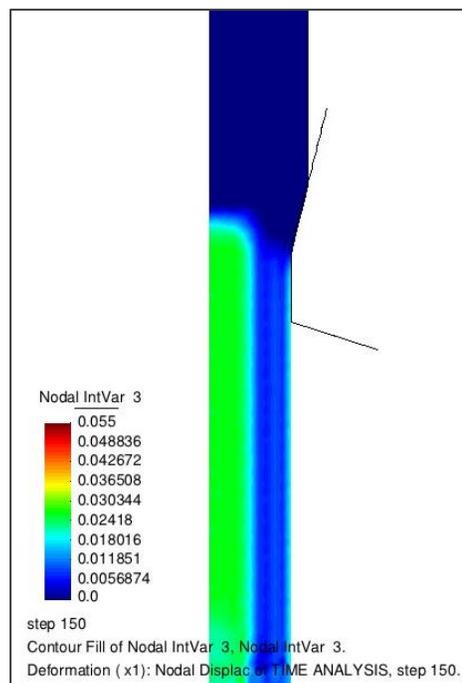


Figura 4-101: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 4 reducción 31%

Por otra parte el comportamiento mostrado por el daño en los cortes C, D y E, producto del cambio en el criterio de evolución, permite decir que en las zonas internas del material (nodos 1-4) se alcanza un nivel de daño constante y similar al alcanzado al utilizar el primer criterio, registrándose diferencias porcentual del orden del 2%, 3% y 2% respectivamente. En cuanto a la tendencia en estos cortes se puede apreciar que se mantiene un comportamiento decreciente a medida que se avanza hacia la superficie, el cual se mantiene en toda la sección para el corte C, alcanzando cero daño al llegar a la superficie, mientras que para los cortes D y E este decrecimiento se detiene al llegar al nodo 7, a partir del cual se registra un valor de daño constante hasta el nodo 10, desde donde se registra un incremento en el valor de daño al llegar a la superficie.

Complementariamente al análisis de los cortes, se muestra en la Figura 4-101 el mapa de colores con la distribución del daño obtenido con el segundo criterio. En este mapa se puede apreciar cómo se adelanta la manifestación del daño en las cercanías del eje al corte B, aumentando su valor respecto de la configuración anterior. Además, a partir del inicio del paso recto (corte C) se percibe cómo el daño alcanza una distribución radial en la que se registra un alto nivel de daño en las zonas internas del material (permaneciendo en todo momento muy por debajo del punto crítico), mientras que al avanzar hacia la superficie éste decae considerablemente. Cabe destacar que este comportamiento es completamente opuesto al reflejado en los mismos cortes al realizar la simulación utilizando el primer criterio de evolución, lo cual se debe a la imposición de que el daño solamente se desarrolla ante la presencia de presión hidrostática positiva.

#### 4.3.2.5 Configuración 5

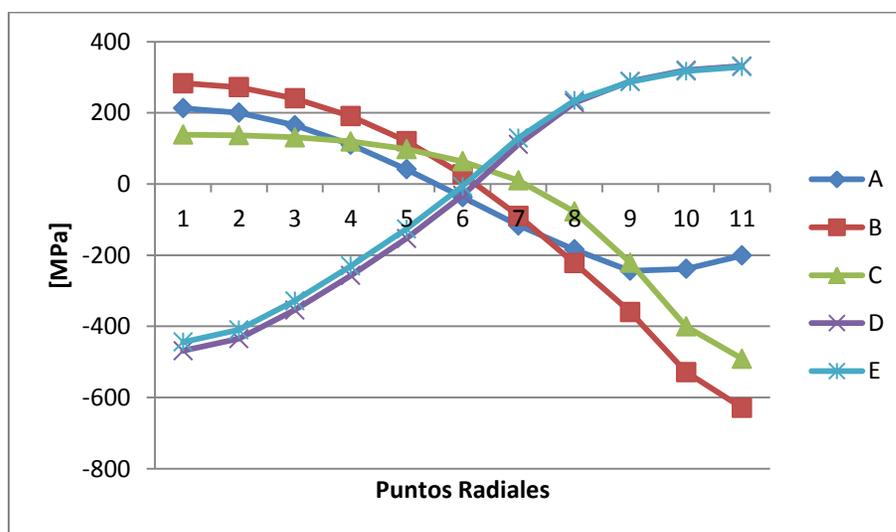
Ensayando el último semi ángulo para la reducción de 31%, se obtienen los resultados mostrados a continuación.

La presión hidrostática (Figura 4-102) en el corte A, de igual manera que para la configuración anterior, registra un estado de tracción en las zonas internas del material, el cual se extiende entre los nodos 1-5. Producto del aumento en el semi ángulo los valores de este estado de tracción aumenta, registrándose un incremento porcentual del 185% en promedio. Al avanzar radialmente, en este corte se evidencia un estado de

compresión que aumenta hacia la superficie. Este estado se intensifica también producto del cambio en la configuración, registrando un incremento porcentual máximo del 71% en la superficie del material.

En cuanto al corte B, la presión hidrostática experimenta un comportamiento similar a la configuración anterior, identificándose un incremento tanto en el estado de tracción (nodos 1-6), como en el estado de compresión (nodos 7-11), registrando variaciones porcentuales en los puntos máximos de 26% y 23%, respectivamente.

La presión hidrostática en el corte C presenta un gran cambio en la tendencia mostrada por las configuraciones anteriores. En este corte el estado de presiones experimentado por las zonas internas (nodos 1-7) es de tracción, producto del aumento de las presiones en esta sección (comportamiento similar al realizar el proceso con la configuración 4). Al avanzar radialmente, a partir del nodo 8, producto del comportamiento decreciente de esta variable se genera un estado de compresión el cual alcanza su máximo en la superficie, registrando un aumento porcentual del 56% en este punto.

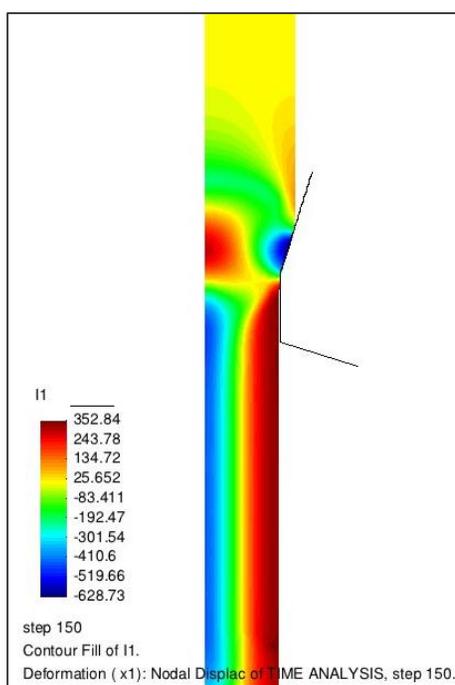


**Figura 4-102: Presión hidrostática configuración 5 reducción 31%**

Respecto a los cortes D y E, estos no registran modificación en su tendencia. En cuanto a los valores de presión hidrostática alcanzados, se puede apreciar que en ambos

estados, de compresión en las zonas internas y tracción en la superficie zonas, se registran leves disminuciones, del orden del 4% al 2% en promedio, respectivamente

Adicionalmente, en el mapa de colores (Figura 4-103), se puede apreciar el aumento que experimenta la burbuja de tracción que se extiende en las zonas internas del material entre los cortes A y C y la localización de la burbuja de compresión en la superficie del material en la misma zona. En cuanto a la presión hidrostática luego del inicio de la zona recta (corte C), el comportamiento de esta variable es similar al evidenciado en las configuraciones anteriores.



**Figura 4-103: Distribución de la presión hidrostática configuración 5 reducción 31%**

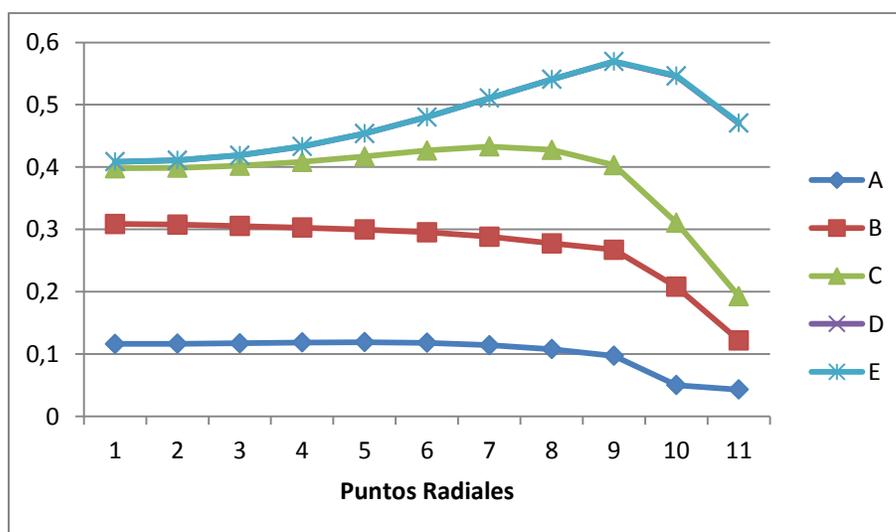
Los resultados obtenidos para la deformación plástica se reflejan en las Figuras 4-104 y 4-105.

Puede apreciarse cómo en la entrada del material al dado, corte A, debido a esta configuración (Figura 4-104), los valores alcanzados son superiores a los obtenidos anteriormente, registrando un incremento porcentual del orden del 70% en promedio de

la sección. Sin embargo los valores de deformación plástica continúan siendo pequeños a esta altura del proceso.

En cuanto al corte B, a diferencia de las configuraciones anteriores, el aumento en el semi ángulo produce una leve disminución de los valores de deformación plástica en las zonas internas del material (nodos 1-4), de un orden inferior al 2%. Sin embargo en el resto de la sección se retoma la tendencia a aumentar, registrando un incremento promedio del orden del 4%, salvo en la superficie donde nuevamente se registra una disminución, esta vez del 11%. Sin embargo, pese a esta perturbación en el comportamiento de esta variable ante el aumento en el semi ángulo, el decrecimiento radial no se modifica.

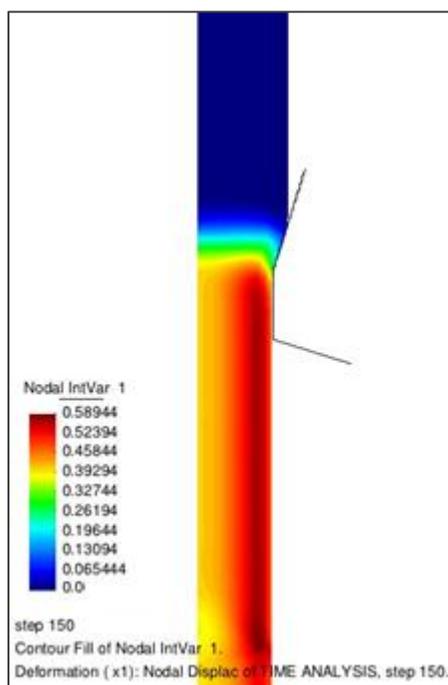
Respecto al corte C, producto del aumento en el semi ángulo, se presenta un leve aumento en la deformación plástica en el eje, mientras que en el resto de la sección se aprecia una disminución de esta variable, lo cual produce que la separación entre esta curva y la de los cortes D y E se adelante al nodo 6. Cabe destacar que la disminución experimentada por la deformación plástica en este corte se incrementa radialmente, alcanzando una variación máxima del orden del -24% en la superficie, lo cual genera que el valor registrado en este punto tienda a ser similar al registrado en el corte B.



**Figura 4-104: Deformación plástica configuración 5 reducción 31%**

Finalmente, respecto a los cortes D y E, la deformación plástica presentan un aumento generalizado en toda la sección similar al evidenciado en las configuraciones anteriores, lo cual contribuye a que la separación entre estos cortes y el corte C se adelantara al nodo 6. Cabe destacar que el máximo aumento porcentual (del 12%) se registra en el nodo 9, lugar donde se alcanza el máximo valor de la deformación plástica.

De manera complementaria el mapa de colores presentado en la Figura 4-105 muestra la distribución de esta variable en el material durante el proceso de trefilado, pudiendo observarse como se acelera el aumento axial y como producto del aumento en el semi ángulo se localiza la deformación plástica en una zona cercana a la superficie, rompiendo definitivamente con la uniformidad radial evidenciada en las primeras configuraciones.

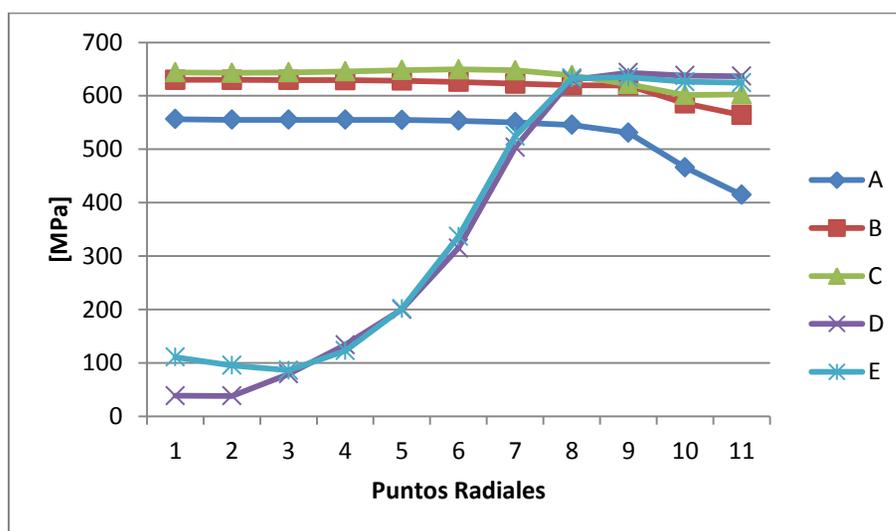


**Figura 4-105: Distribución de la deformación plástica configuración 5 reducción 31%**

La tensión de von Mises se muestra en las Figuras 4-106 y 4-107 correspondientes a los valores obtenidos para los diferentes cortes y el mapa de colores respectivamente.

En el corte A, Figura 4-106, puede apreciarse cómo producto del aumento en el semi ángulo las tensiones alcanzadas en el eje son muy similares a las etapas siguientes del proceso. Este acercamiento se debe a que en toda la sección se experimenta un incremento de las tensiones del orden del 8%. Al ser constante este crecimiento en toda la sección se conserva el comportamiento radial de este corte respecto a la configuración anterior.

Tanto para los cortes B como C, el cambio en la configuración no significa variaciones (tanto incrementos como decrecimientos) significativas en la tensión de von Mises, siendo inferiores al 0,5% en promedio para ambos cortes. Este hecho contribuye a que la tendencia radial no se vea modificada producto del aumento en el semi ángulo.



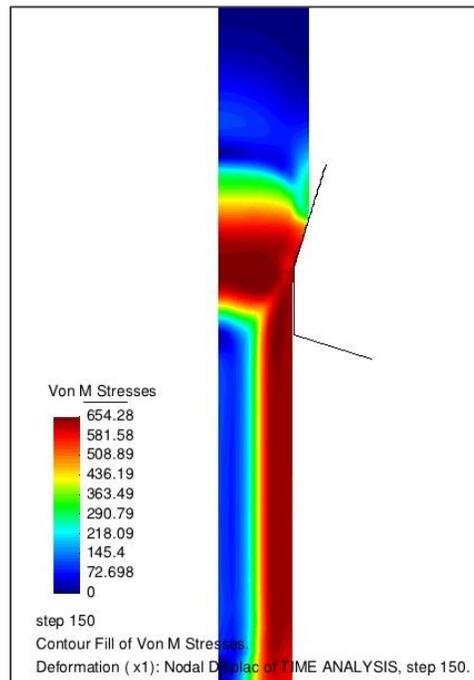
**Figura 4-106: Tensión de von Mises configuración 5 reducción 31%**

Por otra parte, para los cortes D y E, el efecto del cambio en la configuración es similar entre sí, ya que se registran tanto incrementos como decrecimientos a lo largo de la sección, siendo éstos de proporciones similares. Se destaca un aumento en las tensiones entre los nodos 1-2 del orden del 18% en el corte D, mientras que este incremento es del orden del 21% entre los nodos 1-3 del corte E. De la misma manera se percibe un decrecimiento en la tensión de von Mises entre los nodos 3-6 del orden del 9% en el corte C y del mismo orden entre los nodos 4-6 del corte E. Avanzando

radialmente, para ambos cortes entre los nodos 7-8 se registra un incremento en el valor alcanzado por las tensiones del orden del 7%, para luego en el resto de la sección registrar variaciones despreciables (inferiores al 1%). Este comportamiento mostrado por ambos cortes no produce modificaciones en la tendencia radial respecto de la configuración anterior.

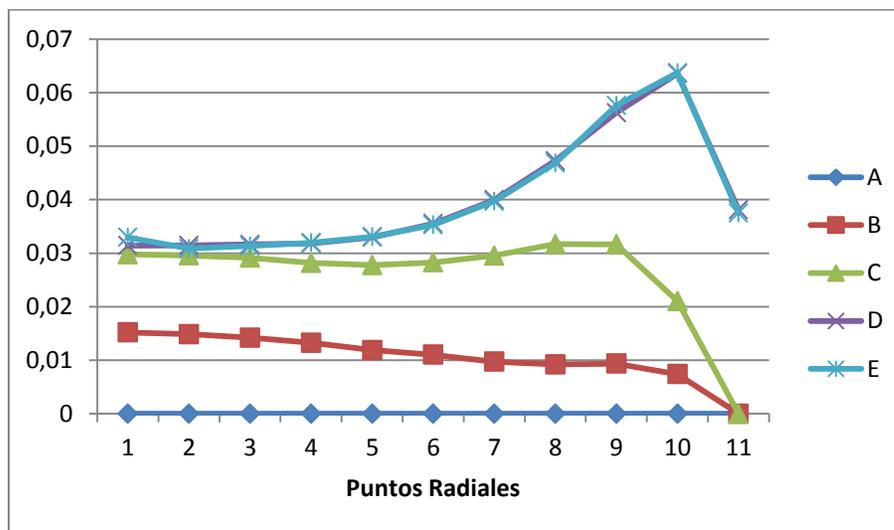
A modo de complemento, en la Figura 4-107, el mapa de colores permite apreciar cómo en la salida del proceso de trefilado (corte D) se percibe una leve localización de un estado de bajas tensiones en las zonas internas del material.

A continuación se muestra en las Figuras 4-108 y 4-109 el comportamiento del daño obtenido utilizando el primer criterio de evolución.



**Figura 4-107: Distribución de la tensión de von Mises configuración 5 reducción 31%**

De la misma manera que para las configuraciones anteriores, el corte A no registra presencia de daño pese al aumento en el semi ángulo (Figura 4-108).



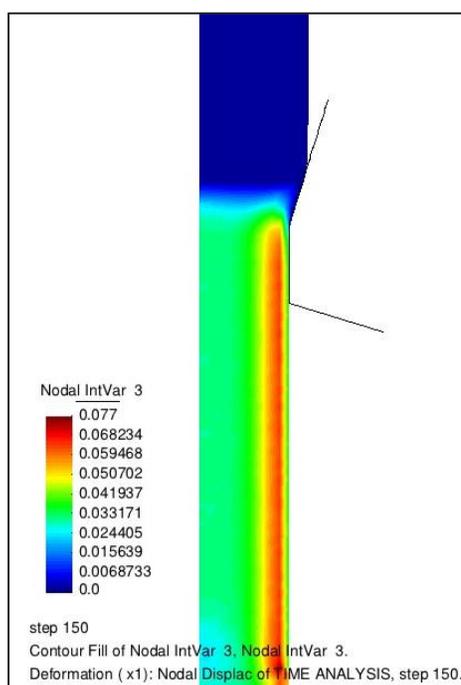
**Figura 4-108: Daño con primer criterio de evolución configuración 5 reducción 31%**

Por otra parte, en cuanto al daño alcanzado en el corte B, éste experimenta leves variaciones entre los nodos 1-5, siendo del orden del 3% en promedio, mientras que en el resto de sección, si bien se registran altos aumentos porcentuales, siendo el máximo del 73%, debido al orden de magnitud del daño alcanzado en esta zona, no se percibe un cambio en la tendencia radial de este corte. De esta manera se conserva una tendencia decreciente a medida que se avanza hacia la superficie, alcanzando el cero al llegar a ésta.

En cuanto al corte C, en éste se evidencia un comportamiento diferente al de la configuración anterior, ya que si bien se registra un aumento en los valores del daño, éste está limitado a los nodos 1-4, siendo del orden del 8%, mientras que en el resto de la sección se registra una disminución, la cual aumenta a medida que se avanza hacia la superficie, produciendo al llegar a ésta un decaimiento del 135%. Este comportamiento produce que el daño en este corte sea casi constante hasta llegar al nodo 9 para desde allí decaer a cero al llegar a la superficie.

Finalmente, debido al aumento en el semi ángulo, en los cortes D y E se produce un incremento en el daño alcanzado, siendo del orden del 17% y 18% respectivamente. Este incremento en el daño registrado en los cortes D y E sumado con el comportamiento evidenciado por el corte C permiten explicar el hecho de que estos tres

cortes registren valores similares entre los nodos 1-3 y al avanzar hacia la superficie los cortes D y E, que registran valores similares en toda la sección entre si, mantengan el comportamiento ascendente evidenciado en las configuraciones anteriores y alcanzan su máximo en el nodo 10, para luego decaer al llegar a la superficie. Sin embargo, cabe destacar que el máximo alcanzado en estos cortes corresponde al 62% del punto crítico, descartando la manifestación del defecto del estallido central, siendo de esta manera consistente con los resultados obtenidos en [14].

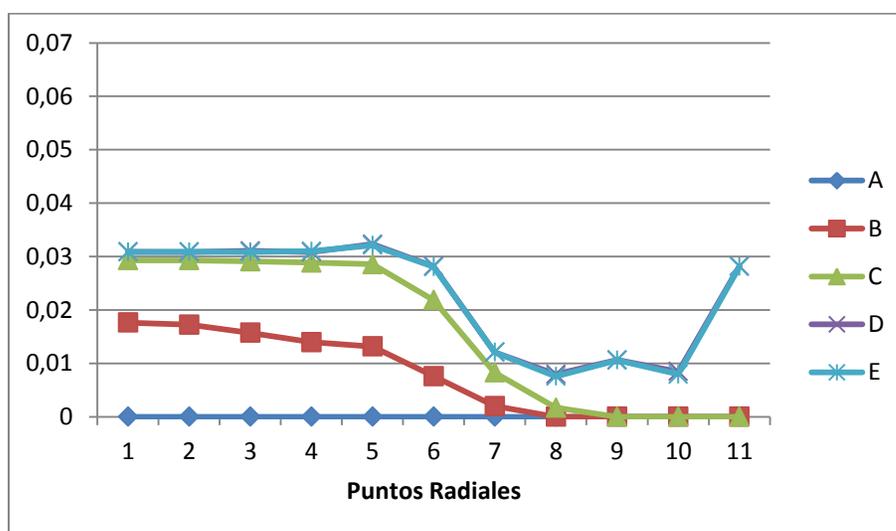


**Figura 4-109: Distribución del daño con primer criterio de evolución configuración 5 reducción 31%**

De manera de complementar el análisis del daño obtenido con el primer criterio de evolución, se muestra en la Figura 4-109, el mapa de colores para la distribución del daño en el material, pudiéndose apreciar cómo el daño alcanza su máximo en una zona cercana a la superficie, luego de haber abandonado la zona de reducción de área. Además, para esta configuración se acentúa el hecho de que este máximo alcanzado es muy superior al daño que se registra en las zonas internas del material.

Para esta última configuración, se muestra a continuación en las Figuras 4-110 y 4-111 el comportamiento en los diferentes cortes y el mapa de colores para el daño obtenido utilizando segundo criterio de evolución.

En la Figura 4-110 se puede apreciar que, de manera consistente a todas las configuraciones y para ambos criterios de evolución, en el corte A no se manifiesta presencia de daño.



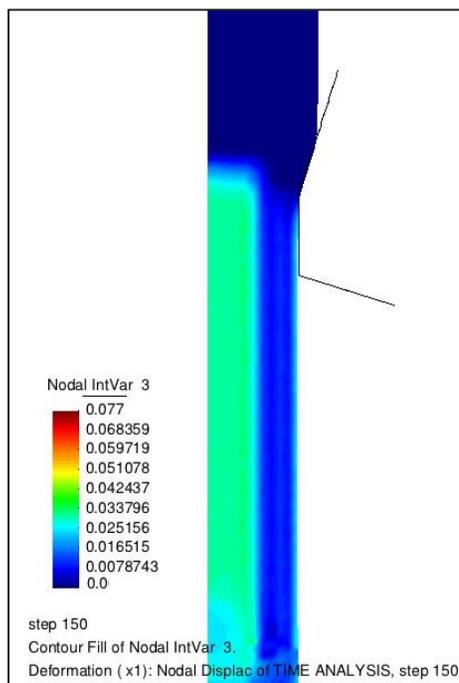
**Figura 4-110: Daño con segundo criterio de evolución configuración 5 reducción 31%**

Respecto al comportamiento del daño en el corte B, se puede apreciar cómo el nivel de daño en las cercanías al eje alcanza valores superiores a los registrados al utilizar el primer criterio de evolución, sin embargo las máximas variaciones manifestadas (nodos 1-2) son del orden del 16%. Avanzando radialmente, este corte evidencia una disminución en el daño experimentado por el material con una pendiente mayor a lo evidenciado para el mismo corte con el primer criterio (Figura 4-98). Esto produce que a partir del nodo 6 el daño registrado con el segundo criterio de evolución sea menor al registrado con el primer criterio, alcanzando el cero en el nodo 8, nivel el cual se mantiene hasta la superficie.

En cuanto al daño experimentado en los cortes C, D y E, producto del cambio en el criterio de evolución se percibe, de manera similar a las configuraciones anteriores,

una localización del daño entre los nodos 1-5, con valores muy similares a los alcanzados al utilizar el primer criterio de evolución, registrándose diferencias porcentuales inferiores al 2% en promedio.

De la misma manera que para las configuraciones anteriores, la tendencia radial del daño en el corte C señala un comportamiento constante entre los nodos 1-5, para luego manifestar un rápido decrecimiento, registrando un nivel de daño cero a partir del nodo 9. Por otra parte los cortes D y E, los cuales registran el mismo nivel de daño en toda la sección del material, manifiesta un leve incremento en el valor del daño entre los nodos 1-5, para luego manifestar un rápido decrecimiento. Sin embargo a diferencia del corte C este decrecimiento radial se detiene en el nodo 8, para manifestar un nivel de daño constante hasta el nodo 10, donde se registra un incremento al llegar a la superficie



**Figura 4-111: Distribución del daño con segundo criterio de evolución configuración 5 reducción 31%**

De manera de complementar la comparación entre el daño obtenido con ambos criterio de evolución, se presenta en la Figura 4-111 el mapa de colores con la

distribución del daño obtenido al utilizar el segundo criterio. Este mapa permite apreciar claramente cómo el daño alcanza valores positivos desde el eje del material, presentando un leve comportamiento ascendente hasta llegar a una zona intermedia entre el eje y la superficie, donde se percibe una localización de esta variable. Además, este mapa permite identificar cómo en la superficie se manifiesta otra vez un nivel alto de daño, similar al experimentado en las zonas internas del material. Cabe destacar que estos niveles de daño son muy similares a los registrados con el primer criterio de evolución, encontrándose muy por debajo del punto crítico. Por otra parte debido al cambio en el criterio de evolución la tendencia radial mostrada por esta variable cambia de sobre manera, presentando un comportamiento opuesto al experimentado al utilizar el primer criterio en la zona cercana a la superficie.

#### 4.3.2.6 Análisis de daño residual

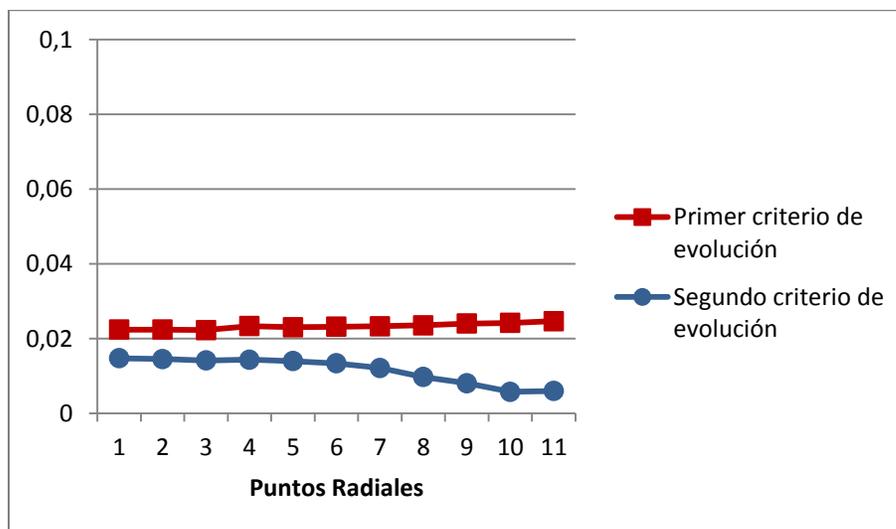
Luego de haber analizado el comportamiento del material durante el proceso de trefilado, es interesante observar el estado al finalizar el proceso. De manera similar al análisis realizado para la reducción de 21%, se muestra a continuación el daño residual registrado en el material para cada configuración ensayada y con ambos criterios de evolución.

Para la primera configuración ensayada, el daño residual experimentado por el material se muestra en la Figura 4-112. En esta se puede apreciar como el nivel de daño alcanzado para al realizar la simulación de la reducción de 31% es muy superior al alcanzado para la reducción de 21%. Este comportamiento se puede apreciar en con ambos criterios.

Por otra parte un comportamiento en común que se aprecia en esta figura respecto de la reducción de 21% es que en toda la sección el primer criterio de evolución registra un mayor desarrollo de daño que el segundo criterio. En cuanto al comportamiento radial del daño obtenido con ambos criterios se puede decir que mientras el primer criterio de evolución registra un daño casi constante del orden del 23% del valor crítico, el daño obtenido con el segundo criterio evidencia un comportamiento decreciente a medida que se avanza hacia la superficie. Cabe destacar

que el daño máximo alcanzado con el segundo criterio se obtiene en el nodo correspondiente al eje del material, registrando un valor cercano al 15% respecto del valor crítico, mientras que el mínimo se alcanza en el nodo 10, justo antes de la superficie con un valor que representa el 6% del valor crítico.

En vista del comportamiento del daño descrito para la primera configuración, si bien registra un nivel de daño muy superior al alcanzado para la misma configuración al realizar la reducción de 21%, se puede decir que se descarta la manifestación del defecto del estallido central, lo cual es consistente con lo evidenciado en el análisis de cortes y en el mapa de colores, asimismo con los resultados obtenidos en [14].



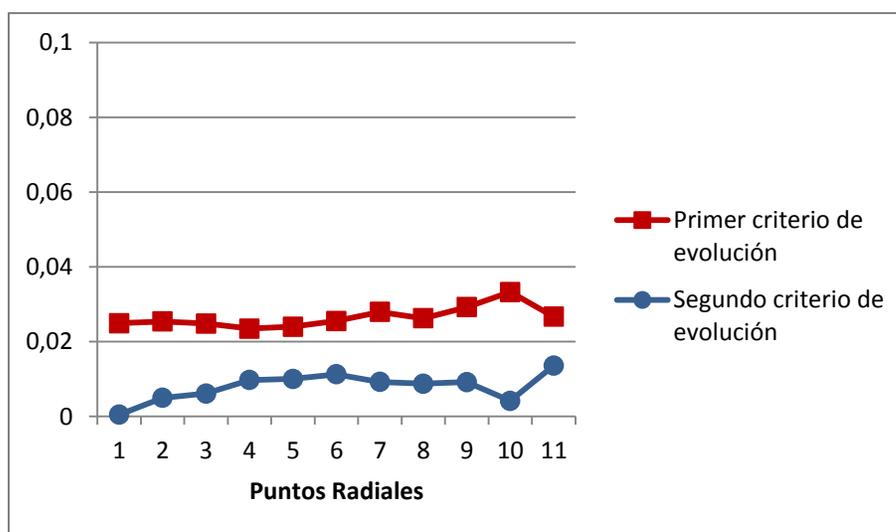
**Figura 4-112: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 1 reducción 31%**

Respecto al daño alcanzado en la segunda configuración, la Figura 4-113 muestra la distribución del daño residual experimentado por el material, para ambos criterios de evolución. De esta figura se puede apreciar que el comportamiento de los diferentes criterios de evolución ante el aumento en el semi ángulo es diferente. Esto se evidencia en el hecho de que el primer criterio de evolución ante el aumento en el semi ángulo registra valores de daño superiores respecto de la configuración anterior, mismo comportamiento observado en la simulación de la reducción de 21%. Por otra parte, el daño obtenido al utilizar el segundo criterio de evolución experimenta un decrecimiento

respecto de la configuración anterior en casi toda la sección (nodos 1-8) y solamente en la zona cercana a la superficie se percibe un aumento en el nivel de daño alcanzado.

Debido a estos comportamientos, el daño experimentado por el material al simular la segunda configuración mantiene una tendencia radial casi constante con un valor promedio que corresponde al 27% del valor crítico de daño (alcanzando un máximo correspondiente al 33% del punto crítico) al utilizar el primer criterio de evolución, mientras que al utilizar el segundo criterio, el daño registrado en el material muestra una tendencia parabólica entre los nodos 1-10, alcanzando un valor máximo y un mínimo inferiores al 12% y 4% respecto del punto crítico respectivamente. Cabe destacar que debido al comportamiento del daño mostrado en las cercanías de la superficie al utilizar el segundo criterio, el máximo valor alcanzado se registra en el nodo 11, correspondiente a la superficie, con un valor correspondiente al 14% del valor crítico.

Después de estudiar el comportamiento del daño en la segunda configuración, se puede decir que se descarta la manifestación del defecto del estallido central, lo cual es consistente con lo evidenciado en el análisis de cortes y en el mapa de colores, asimismo con los resultados obtenidos en [14].

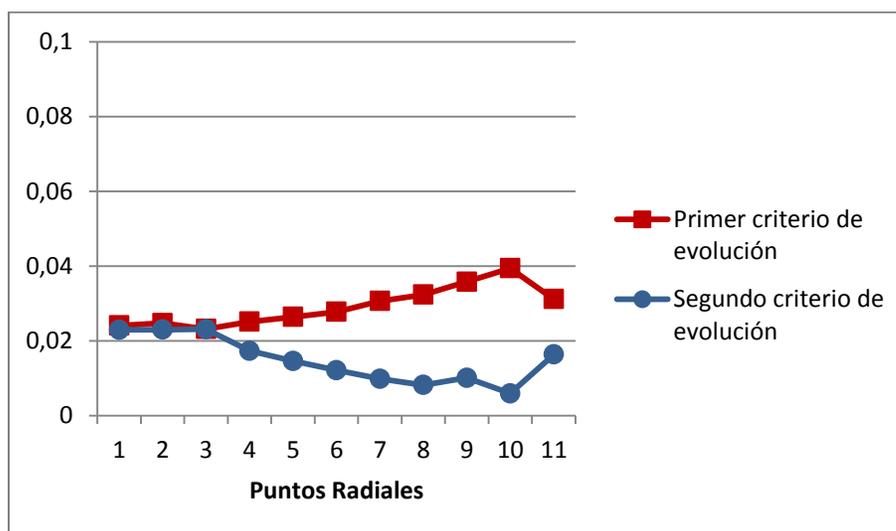


**Figura 4-113: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 2 reducción 31%**

A continuación, para la tercera configuración, el daño residual obtenido con ambos criterios de evolución se muestra en la Figura 4-114. De esta se puede desprender cómo el comportamiento del daño se modifica ante el aumento en el semi ángulo, manifestando una tendencia similar a la evidenciada al simular la reducción de 21% con la misma configuración.

El daño registrado con el primer criterio de evolución presenta una leve disminución en las zonas internas del material (nodo 1-3), siendo esta del orden del 4%. Por otra parte, en el resto de la sección el daño obtenido con este criterio registra un aumento el cual se incrementa a medida que se avanza hacia la superficie, lo cual produce que la tendencia radial se modifique respecto de la configuración anterior, evidenciando un aumento en el daño en este sentido, hasta alcanzar su valor máximo en el nodo 10 (correspondiente al 40% del valor crítico).

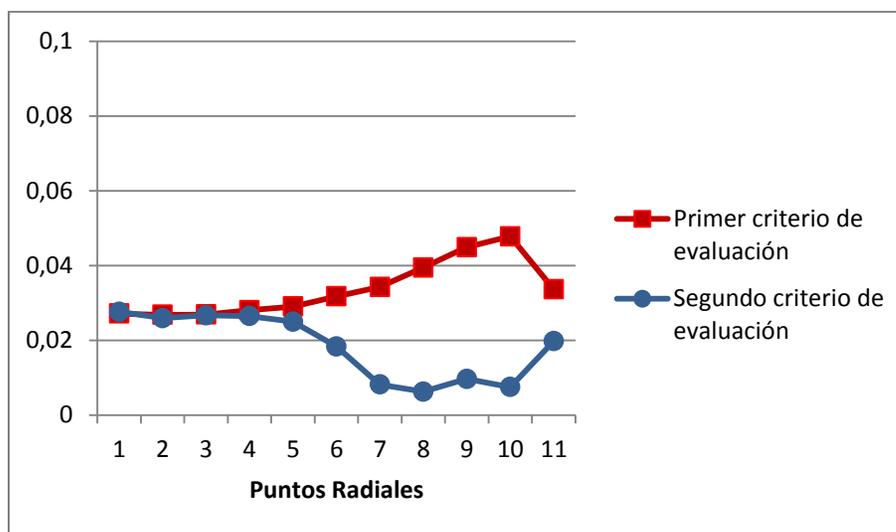
En cuanto al daño obtenido al utilizar el segundo criterio de evolución, se registra en las zonas internas un fuerte incremento en el daño alcanzado producto del aumento en el semi ángulo. Este efecto permite que entre los nodos 1-3 ambos criterios entreguen niveles de daño similares (del orden del 23% del valor crítico).



**Figura 4-114: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 3 reducción 31%**

Respecto de la tendencia radial, el aumento en el semi ángulo produce que se mantenga un comportamiento decreciente en los niveles de daño alcanzados a medida que se avanza hacia la superficie. Este decrecimiento se ve interrumpido en el nodo 10 debido a que en el nodo correspondiente a la superficie se registra un nivel de daño mayor, de manera similar a lo observado en la configuración anterior.

De esta manera, teniendo en cuenta el comportamiento del daño obtenido para la tercera configuración se puede decir que se descarta la manifestación del defecto del estallido central, siendo consistente con lo evidenciado en el análisis de cortes y en el mapa de colores, asimismo con los resultados obtenidos en [14]. Además, observando el comportamiento entregado por ambos criterios se puede afirmar que el segundo criterio de evolución, de manera similar a lo observado en la reducción de 21% para la misma configuración, entrega una tendencia radial de daño más cercana a lo esperado.



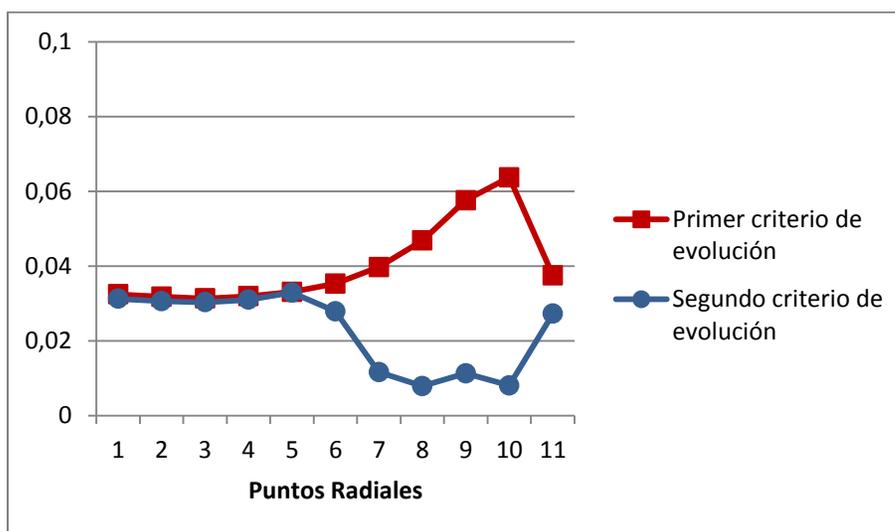
**Figura 4-115: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 4 reducción 31%**

Aumentando nuevamente el semi ángulo se observa en la Figura 4-115 el comportamiento del daño residual obtenido con ambos criterios de evolución para la simulación de la cuarta configuración. De esta figura se puede decir que, de la misma manera que para la configuración anterior, el aumento en el semi ángulo produce un

aumento en el daño experimentado en el material obtenido con ambos criterios de evolución.

En cuanto al comportamiento radial del daño se observa que este mantiene la misma tendencia que la mostrada en la configuración anterior. Cabe destacar que el aumento en el semi ángulo produce que ambos criterios de evolución registren valores de daño similares en las zonas internas del material (nodos 1-5), aumentando la zona de coincidencia y alcanzando un valor correspondiente al 27% del valor crítico de daño. Otro efecto del aumento en el semi ángulo apreciable es el aumento en el valor máximo de daño obtenido con el primer criterio, el cual se alcanza en el nodo 10 y registra un valor correspondiente al 48% del punto crítico.

A la vista de este comportamiento se puede decir que se descarta la manifestación del defecto del estallido central para esta configuración, siendo consistente con lo evidenciado en el análisis de cortes y en el mapa de colores, asimismo con los resultados obtenidos en [14]. Además, de la misma manera que para la tercera configuración, se puede afirmar que el segundo criterio de evolución entrega una tendencia radial de daño más cercana a lo esperado.



**Figura 4-116: Daño residual con ambos criterios de evolución configuración 5 reducción 31%**

Finalmente, para la última configuración ensayada se muestra el daño residual obtenido al utilizar ambos criterios de evolución en la Figura 4-116. En ésta se observa como producto del aumento en el semi ángulo, el daño experimentado en el material incremento respecto de la configuración anterior tanto en los resultados obtenidos al utilizar el primer criterio de evolución como al utilizar el segundo criterio. Producto de este incremento se puede apreciar como el daño en las zonas internas (nodos 1-5) corresponde al 32% del valor de daño crítico para ambos criterios de evolución. En cuanto al resto de la sección el daño obtenido con los diferentes criterios muestra un comportamiento opuesto similar al evidenciado en las configuraciones anteriores. Mientras que el primer criterio de evolución registra una distribución de daño que aumenta hasta alcanzar un máximo del orden del 64% del valor de daño crítico en el nodo 10, el segundo criterio disminuye a valores cercanos al 10% del punto crítico.

De esta manera, luego de apreciar el comportamiento del daño en la última configuración ensayada, se puede decir que se descarta la manifestación del defecto del estallido central, lo cual es consistente con lo evidenciado en el análisis de cortes y en el mapa de colores, asimismo con los resultados obtenidos en [14]. Además, asimismo como se observó para las dos configuraciones anteriores, el comportamiento del daño entregado por el segundo criterio es más cercano a lo esperado.

## 5 CONCLUSIONES

En esta tesis se analizó el comportamiento del material en el proceso de trefilado para las reducciones y configuraciones previamente ensayadas y reportadas en la literatura, utilizando un modelo matemático que incorpora la medición de la variable de daño.

En una primera instancia se pudo apreciar cómo la simulación del proceso de trefilado representa de manera adecuada a las curvas de fuerza obtenidas en [14], manteniéndose en la mayoría de los casos dentro de los rangos de fuerza experimentales. Los resultados obtenidos para ambas reducciones conservan el comportamiento decreciente a medida que aumenta el semi ángulo, teniendo un punto de inflexión en el ángulo de  $21^\circ$  para la reducción de 21% y en el ángulo de  $28^\circ$  para la reducción de 31%, para ambos criterios de evolución. Cabe destacar que si bien al utilizar el primer criterio de evolución para la reducción de 31% se obtienen valores menores para la fuerza de trefilado para los ángulos de  $28^\circ$  y  $35^\circ$ , esta variación es inferior al 2% respecto de la fuerza obtenida con la simulación sin considerar la variable de daño.

Respecto a la presión hidrostática experimentada por el material se pudo apreciar cómo a medida que aumentaba el semi ángulo se producía en las zonas internas del material un estado de tracción que se localiza en la zona de deformación, entre el corte A y C. Además, en la misma zona pero en la cercanía de la superficie se localiza un estado de compresión, el cual se intensifica con el aumento en el semi ángulo. Avanzando axialmente, a partir del paso recto del dado, se observó cómo en todas las configuraciones se marca un estado de compresión en las zonas internas, mientras que en la cercanía de la superficie se produce un estado de tracción, los cuales varían su intensidad al modificar el semi ángulo.

Por su parte, la deformación plástica experimenta la ruptura de su comportamiento uniforme radialmente mostrado en las primeras configuraciones producto del aumento del semi ángulo. Además, es posible observar cómo en una zona cercana a la superficie se produce una localización de la deformación plástica,

alcanzando valores máximos (configuración 5) que representan un 76% y un 42% de la deformación en el eje del material para las reducciones de 21% y 31% respectivamente.

En cuanto a la tensión de von Mises el comportamiento ante el aumento en el semi ángulo mostró cómo el material experimenta una localización de altas tensiones en la zona de deformación (entre los cortes A y C). Además se pudo distinguir cómo en el paso recto del dado, entre los corte C y D, el material experimenta una relajación elástica en las zonas internas del material, produciendo la localización de un estado de bajas tensiones, mientras que en las cercanías de la superficie se mantiene un estado de altas tensiones, otorgándole un nuevo límite elástico y endurecimiento al material.

Respecto al daño experimentado por el material, en esta tesis se presentó la implementación de un modelo matemático que permite cuantificar esta variable, utilizando dos criterios de evolución. Cabe mencionar que el comportamiento de las variables antes mencionadas no experimenta mayores variaciones al utilizar en la simulación los diferentes criterios de evolución de daño y que evidencian un comportamiento similar respecto de los resultados obtenidos en [14].

En cuanto al inicio de la manifestación del daño, independiente del criterio de evolución utilizado, se logró observar cómo para los ángulos menores ensayados en ambas reducciones ésta se produce al final de la zona de deformación e inicio del paso recto (corte C). El aumento en el semi ángulo produce que la manifestación de daño se adelante, apreciándose valores positivos en las cercanías del corte B para los semi ángulos mayores.

Al observar la simulación de la reducción de 21% utilizando el primer criterio de evolución se puede decir que el daño experimenta un comportamiento ascendente en la dirección radial, alcanzando su máximo una zona cercana a la superficie. Este comportamiento se asemeja al mostrado por la deformación plástica, ya que el daño también evidencia una localización en las cercanías de la superficie. En cuanto al nivel de daño alcanzado se logró apreciar que éste es muy bajo para los semi ángulos menores y que a medida que aumenta el semi ángulo se produce un incremento del daño en toda la sección del material, especialmente en la zona cercana a la superficie, aumentando así la localización del daño y acercándose al daño crítico.

Observando a continuación la misma reducción, esta vez realizando la simulación con el segundo criterio de evolución, se puede decir que comportamiento del daño es diferente al registrado con el primer criterio, ya que radialmente el daño tiende a mostrar un decrecimiento, produciéndose que el máximo daño se alcanza en las zonas internas del material. Este comportamiento se entiende observando la presión hidrostática, ya que el segundo criterio limita la evolución del daño solamente ante estados de tracción. Sin embargo el comportamiento del daño ante el aumento del semi ángulo es consistente con el criterio anterior, evidenciándose un incremento del daño al cambiar de configuración. Pese a todo esto el nivel del daño obtenido con ambos criterios se mantiene muy por debajo del daño crítico, pudiendo descartarse la presencia de chevrones, siendo consistente con los resultados obtenidos en [14].

Al analizar el daño residual para la reducción de 21% se pudo observar de mejor manera el bajo nivel de daño registrado, especialmente para los semi ángulos menores ( $7^\circ$  y  $14^\circ$ ). Además, a partir de la tercera configuración se logró apreciar cómo el daño registrado con ambos criterios de evolución alcanza niveles similares y a medida que se avanza radialmente se experimenta un comportamiento opuesto del daño obtenido con los diferentes criterios de evaluación. Es interesante observar cómo el aumento en el semi ángulo aumenta el número de nodos en el que ambos criterios son coincidentes y a la vez acentúa el comportamiento opuesto en el resto de la sección.

Para la reducción de 31% se logró observar que el aumento en la reducción impacta fuertemente en el nivel de daño registrado por el material, apreciándose niveles de daño del orden de 7 veces a los experimentados en la reducción de 21%.

En cuanto al daño obtenido con el primer criterio de evolución para esta nueva reducción, se logró apreciar cómo para los semi ángulos menores se registra un comportamiento uniforme radialmente, de manera similar que la deformación plástica. Del mismo modo que para la reducción de 21%, el aumento en el semi ángulo produce que radialmente el daño experimente un incremento, alcanzando valores máximos en las cercanías de la superficie, imitando nuevamente el comportamiento de la deformación plástica.

Al realizar la simulación de la reducción de 31% con el segundo criterio de evolución se logró observar un comportamiento similar a la reducción de 21%. Nuevamente se manifestó el daño máximo en las cercanías del eje, manteniéndose constante en las zonas internas del material, para luego decrecer a valores cercanos a cero en el resto de la sección. El efecto producto del aumento en el semi ángulo es un incremento en el nivel de daño alcanzado, de manera consistente a lo evidenciado anteriormente.

De igual manera que la reducción de 21%, los resultados obtenidos con ambos criterios de evolución para la reducción de 31% indican un nivel de daño que se encuentra por debajo del daño crítico, pudiendo descartarse la presencia de chevrones, siendo consistente con los resultados obtenidos en [14].

Al analizar el daño residual para la reducción de 31% se pudo observar de mejor manera que el daño se encuentra por debajo del valor crítico. Además, de la misma manera que para la reducción de 21%, desde la tercera configuración se pudo apreciar cómo ambos criterios de evolución registran valores similares de daño en las zonas internas del material y al avanzar radialmente se experimenta un comportamiento opuesto del daño obtenido. Consistentemente a lo evidenciado en la reducción anterior, el aumento en el semi ángulo aumenta el número de nodos en el que ambos criterios son coincidentes y a la vez acentúa el comportamiento opuesto en el resto de la sección.

Teniendo en cuenta el daño obtenido al realizar la simulación del proceso de trefilado se puede decir que el modelo matemático utilizado es consistente con los resultados experimentales, ya que las configuraciones y reducciones ensayadas se encuentran dentro de la zona segura de operación, no manifestándose el defecto del estallido central. Finalmente es interesante destacar que el comportamiento del daño obtenido con el segundo criterio de evolución se asemeja más a lo esperado, indicando que el daño se localiza en las zonas internas del material, ya que la bibliografía indica que el estallido central se produce por la propagación de una microfractura producida en el centro del material.

## **6 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN**

Con el objetivo de continuar en el tema de investigación del daño y la formación de chevrones en el proceso de trefilado de alambre de acero, se proponen las siguientes ideas:

- Implementar la simulación del proceso de trefilado de alambre con una reducción de 41%, utilizando las mismas configuraciones, características del material, modelo mecánico con daño y ambos criterios de evolución, con el objetivo de poder determinar las zonas de operación segura e insegura en función de la reducción y el semi ángulo.
- Incorporar en el modelo mecánico el método de separación de elementos al detectar que se ha alcanzado el daño crítico.
- Realizar la simulación del proceso de trefilado de alambre de las reducciones y configuraciones estudiadas en esta tesis utilizando un modelo mecánico de daño diferente, de manera de poder comparar el alcance y las imitaciones. Se propone la utilización de un modelo tipo Gurson.

**BIBLIOGRAFÍA**

Avitzur, B. (1983). Handbook of metal forming processes.[1]

Avitzur, B, (1968). Metal Forming: processes and analysis.[2]

Mcallen, P y Phelan, P. (2005). Ductile fracture by central bursts in drawn 2011 aluminium wire. *International Journal of Fracture*, Vol 135, pp 19-33.[3]

Luis, C., Leon, J. y Luri, R. (2005). Comparation between finite element method and analytical methods for study wire drawing processes. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165, pp 1218-1225.[4]

Celentano, D., Palacios, M., Rojas, E., Cruchaga, M., Artigas, A. y Monsalve A. (2009). Simulation and experimental validation of multiple-step wire drawing processes. *Finites Elements in Analysis Desing*, Vol 45, pp163-180.[5]

Celentano, D. (2010). Thermomechanical simulation and experimental validation of wire drawing processes. *Materials and Manufacturing Processes*, Vol 25, pp 546-556.[6]

Norasethasopon, S. y Yoshida, K. (2008). Prediction of chevron crack initiation in inclusion copper shaped-wire drawing. *Engineering Failure Analysis*, Vol 15, pp 378-393.[7]

Komori, K. (2003). Effect of ductile fracture criteria on chevron crack formation and evolution in drawing. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol 45, pp 141-160.[8]

Komori, K. (1999). Simulation of chevron crack formation and evolution in drawing. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol 41, pp 1499-1513.[9]

Tang, K., Li, Z. y Wang, J. (2011). Numerical simulation of damage evolution in multi-pass wire drawing process and its applications. *Materials and Desing*, Vol 32, pp 3299-3311.[10]

Saxena, R. y Dixit, P. (2011). Numerical analysis of damage for prediction of fracture initiation in deep drawing. *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol 47, pp 1104-1117.[11]

Boudifa, M., Saanouni, K. y Chaboche, J.-L. (2009). A micromechanical model for inelastic ductile damage prediction in polycrystalline metals for metal forming. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol 51, pp 453–464.[12]

Celentano, D. y Chaboche, J.-L. (2007). Experimental and numerical characterization of damage evolution in steels. *International Journal of Plasticity*, Vol 23, pp 1739–1762.[13]

Fernandez L. (2009). Estudio de la formación de “chevrons” en alambres finos de acero trefilado. Tesis de Ingeniería Civil en Mecánica. Universidad de Santiago de Chile.[14]

**ANEXOS**

## **ANEXO A: ENSAYO DE TRACCIÓN UNIAXIAL**

### **Introducción**

Los métodos de elementos finitos son una herramienta que en los últimos años han permitido analizar y comprender de mejor manera los procesos de conformado en metales y sus aleaciones.

Los resultados obtenidos con estos métodos han logrado reproducir los resultados experimentales con errores mínimos, logrando así su validación.

En el estudio del daño existen muchos modelos, los cuales hacen referencia a la generación y evolución de este, mediante mecanismos de daño continuo. Por otra parte existen estudios que, debido a que el daño puede generar una pequeña discontinuidad en el material, buscan estudiar este fenómeno mediante métodos discontinuos, los que presentan nuevas dificultades. Sin embargo, los modelos que asumen débiles discontinuidades pueden desarrollarse utilizando las actuales aproximaciones locales, aunque debe tenerse en consideración que esto presenta la dificultad de que la solución obtenida aparece como inaceptable y dependiente de la discretización empleada.

Debido a esto, recientemente, varios autores han desarrollado métodos de estabilización, que cumplen con los objetivos de existencia y unicidad de la solución y además de la independencia de los parámetros de la malla.

Ante este hecho se hace necesario analizar la dependencia de los modelos continuos de daño respecto de la discretización utilizada, para así asegurar la objetividad de estos.

### **Simulación**

A continuación se simulará el proceso de tracción uniaxial utilizando el modelo matemático con daño definido en el Capítulo 3, aplicado al mismo material cuyas características están definidas en el Capítulo 4.

Para analizar la objetividad de este método plantea la utilización de tres mallas para la discretización axisimétrica de dos dimensiones del dominio.

El dominio a discretizar corresponde a un probeta de 25 mm de alto y 4,5 mm de radio.

Debe tenerse en consideración que existe una pequeña variación axial en el radio (del 1%), con el objetivo de provocar la formación del cuello en el centro del material.

Todas estas mallas están construidas con elementos tetraédricos de cuatro nodos y cuatro puntos de integración. Además se incorpora la técnica b-barr, para evitar el efecto de bloqueo. Por otra parte cabe destacar que todas mallas hacen un refinamiento de la zona próxima a la formación del cuello, en relación 2:1 en el número de elementos utilizados en el resto del dominio, utilizando elementos de transición.

El uso de estas 3 mallas permite apreciar el efecto del refinamiento de la malla en la solución del modelo de daño, buscando medir la objetividad de este. Las características de las mallas se aprecian en la Tabla A-1:

Malla	Elementos	Nodos
1	360	412
2	1408	1510
3	5508	5770

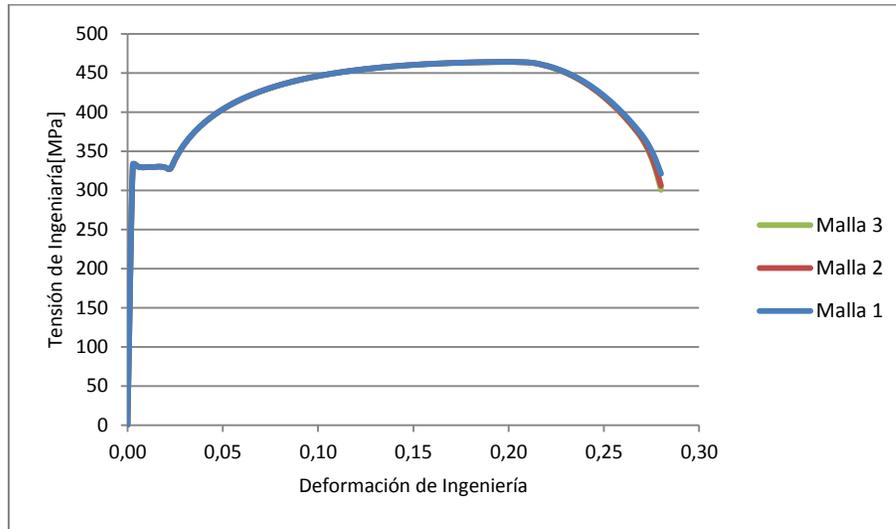
**Tabla A-1: Descripción del mallado**

## **Resultados y Discusión**

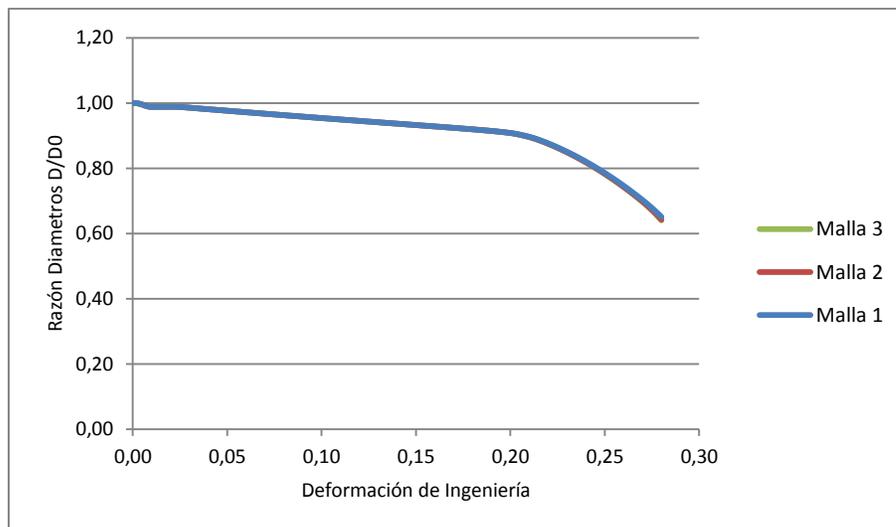
El proceso de simulación corresponde a imponer un desplazamiento al borde superior del material hasta el valor correspondiente a la fractura (28%), el cual es determinado experimentalmente.

En la Figura A-1 se puede apreciar el comportamiento de la curva de tensión – deformación del material al realizar la simulación con las diferentes mallas. En esta se observa como el comportamiento del material es independiente de la malla utilizada y la curva obtenida se ajusta a los datos experimentales.

De la misma manera, en la Figura A-2 se observa como la formación del cuello en el material ensayado es independiente de la malla utilizada y se comporta de manera consecuente a lo evidenciado experimentalmente.

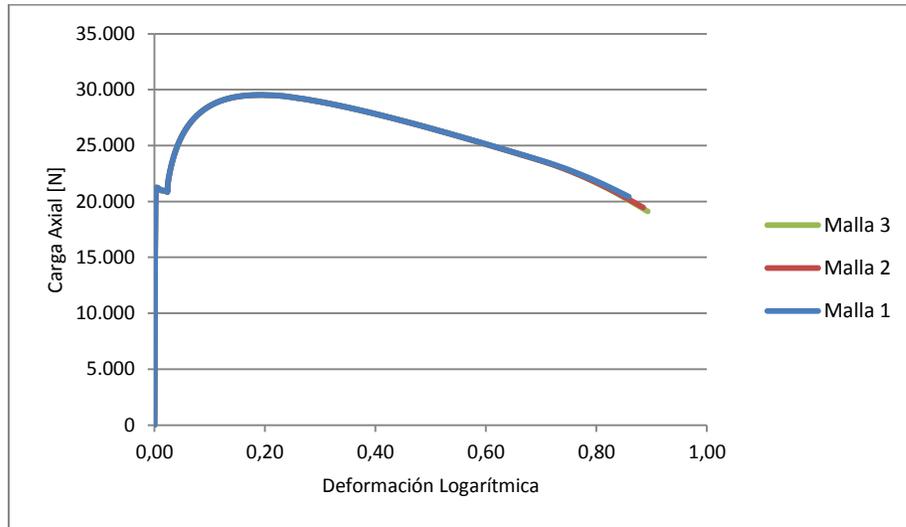


**Figura A-1: Curvas de tensión-deformación ensayo de tracción uniaxial**

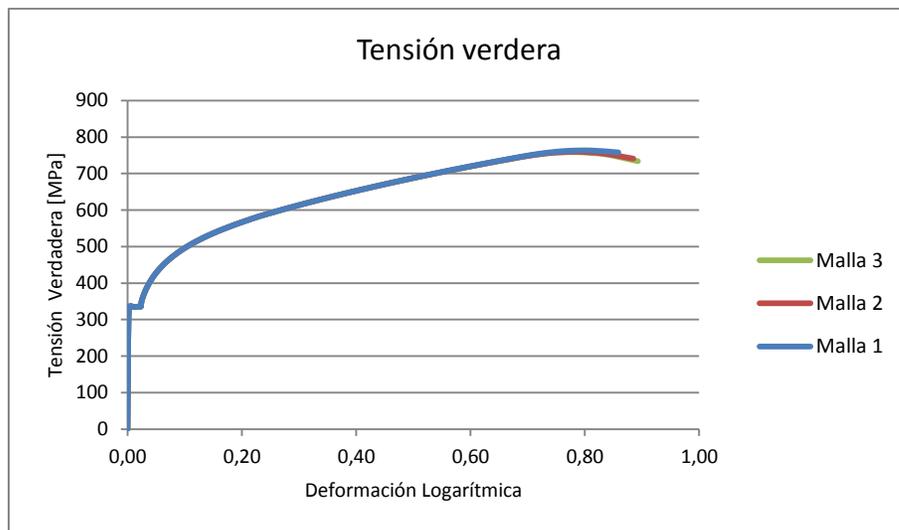


**Figura A-2: Razón de diámetros respecto de la deformación logarítmica**

Por su parte, el comportamiento de la carga axial experimentado por el material, el cual se aprecia en la Figura A-3, muestra como esta variable es independiente del mallado utilizado en la simulación del proceso de tracción y se muestra una tendencia similar a lo obtenido experimentalmente.



**Figura A-3: Carga axial respecto de la deformación logarítmica**

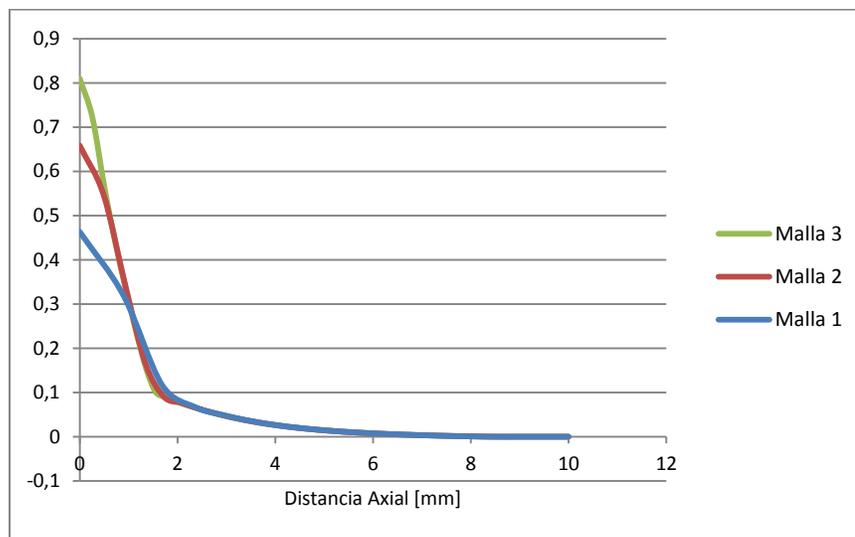


**Figura A-4: Tensión respecto de la deformación logarítmica**

Por último, la tensión verdadera obtenida con este modelo (Figura A-4) muestra claramente como su comportamiento es independiente de la malla empleada en la simulación y se ajusta a los resultados experimentales.

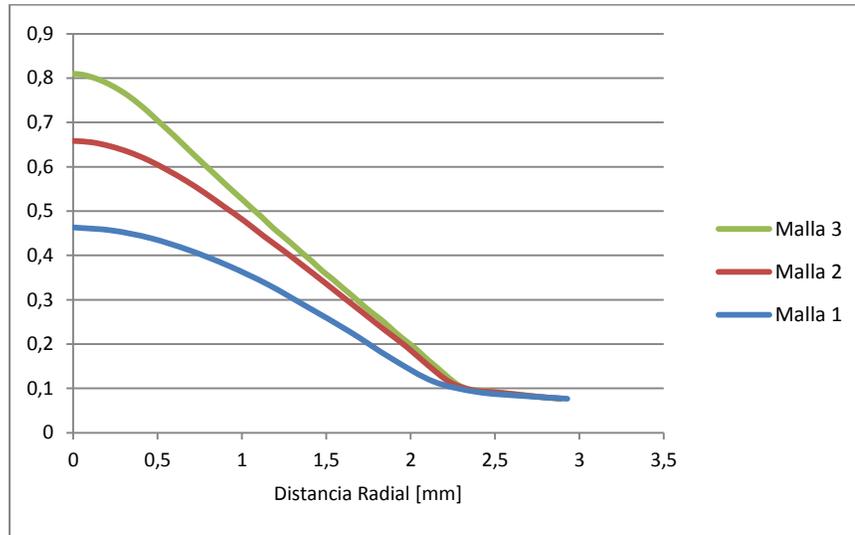
A continuación se muestra el comportamiento del daño en el material obtenido en la simulación.

En la Figura A-5 se puede apreciar el comportamiento axial del daño. De esta figura se desprende que en la zona correspondiente a la formación del cuello (distancia axial cero) para las tres mallas ensayadas se registra el máximo valor de daño, lo cual se esperaba.



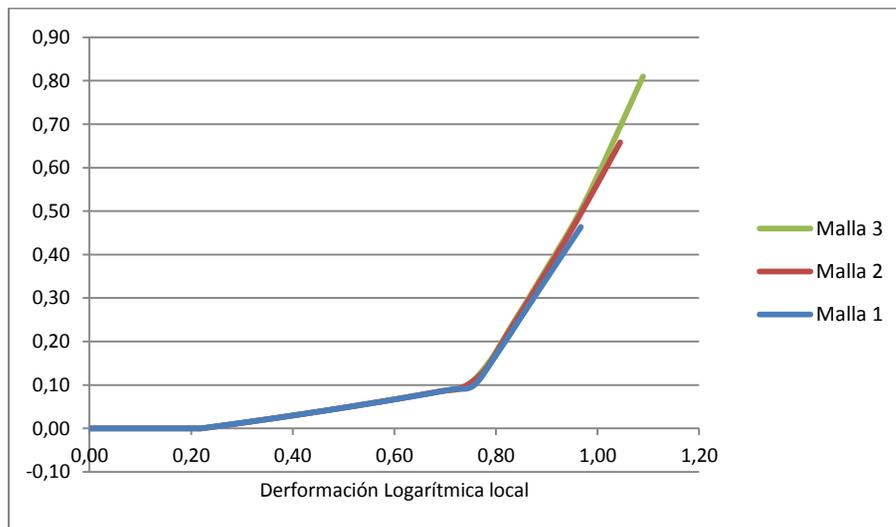
**Figura A-5: Distribución axial del daño**

Por otra parte, observando el comportamiento radial del daño (Figura 8-5) en la zona de formación del cuello, se puede apreciar que el máximo daño se registra en las zonas internas del material, comportamiento el cual se esperaba ya que en esta zona se espera el inicio de la fractura.



**Figura A-6: Distribución radial del daño**

Teniendo todo esto en cuenta, en la Figura 8-6 se muestra la evolución del daño experimentado en el nodo 1 correspondiente al eje del material en la zona de formación del cuello, ya que este es el punto en el cual el daño experimenta su máximo desarrollo.



**Figura A-7: Evolución del daño en el nodo 1**

Como se puede apreciar el daño permanece en cero hasta que se alcanza la deformación umbral. A partir de este punto se comienza a percibir el desarrollo del daño en el material. Es interesante notar como el desarrollo del daño hasta que se alcanza el punto crítico de 0,1, obedece a la ecuación simplificada para al caso uniaxial:

$$d^p = \frac{d_r}{(e_r - e_g)} < e^p - e_g > \quad (\text{A.1})$$

Observando el comportamiento del daño para los diferentes mallados simulados se puede decir que este comportamiento es independiente de la malla seleccionada hasta que se alcanza el valor crítico. Debido a esto se puede decir que el método es objetivo en cuanto a la medición del daño dentro del rango de interés.