

Evaluación de criterios de fractura dúctil para predecir la falla en conformado incremental de láminas de PVC

Luis Torres Valdés¹, Carlos Medina Muñoz¹, Cristian Canales Cárdenas¹

¹Departamento Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Chile. Email: ltorres2018@udec.cl, cmedinam@udec.cl, cristcanales@udec.cl

Resumen

El conformado incremental se presenta como una solución innovadora frente a los métodos tradicionales de conformado de lámina, ofreciendo una mayor adaptabilidad y menor costo de producción de lotes pequeños. La predicción de la falla durante el proceso es importante para una implementación real del conformado incremental en los procesos de manufactura. En esta instancia, se investiga la efectividad de diferentes modelos desacoplados para predecir el inicio de la fractura dúctil en láminas de Policloruro de vinilo (PVC). Para esto, se evalúan los parámetros operacionales del proceso y se determina el parámetro de falla de distintos criterios mediante pruebas de línea. A partir de esto, se evalúa la efectividad para predecir el inicio de la fractura dúctil en un tronco de cono. Se determina que el criterio de trabajo plástico es el que tiene la mayor precisión para predecir la fractura del prototipo.

Palabras clave: conformado incremental; predicción de falla; modelo desacoplado; fractura dúctil.

Abstract

Incremental forming is presented as an innovative solution compared to traditional sheet metal forming methods, offering greater adaptability and lower production costs for small batches. Predicting failure during the process is important for the real implementation of incremental forming in manufacturing processes. In this instance, the effectiveness of different decoupled models for predicting the onset of ductile fracture in Polyvinyl Chloride (PVC) sheets is investigated. For this purpose, the operational parameters of the process are evaluated, and the failure parameter of different criteria is determined from line tests. From this, the effectiveness in predicting the onset of ductile fracture in a conical trunk is evaluated. It is determined that the plastic work criterion has the greatest accuracy in predicting the fracture of the prototype.

Keywords: incremental forming; failure prediction; decoupled model; ductile fracture.

1. Introducción

Los procesos tradicionales para la fabricación de productos de polímeros están orientados a la producción en masa debido a las limitaciones económicas. La alta inversión en equipos y herramientas especiales, sumado a la flexibilidad limitada, hacen que los procesos tradicionales sean inviables económicamente para la producción de lotes pequeños [1]. Además, el proceso de calentamiento y enfriamiento para conformar el material implica altos costos de energía. En vista de estos antecedentes, surge la necesidad de desarrollar nuevas técnicas de

fabricación que se adapten a las demandas actuales, que tienen como característica principal la alta personalización de los productos.

El conformado incremental de lámina (*Incremental Sheet Forming*, ISF) ha sido objeto de estudio durante las últimas dos décadas por parte de muchos investigadores [2], [3], [4], [5]. El ISF tiene distintas variantes, una de ellas es el conformado incremental mono punto (*Single Point Incremental Forming*, SPIF), que se diferencia por no utilizar una matriz o contra herramienta para deformar la lámina. Una de las mayores ventajas del SPIF y que lo destaca por sobre

los procesos convencionales es su flexibilidad, dado que, manipulando la trayectoria de su herramienta de forma rápida y económica se pueden lograr diferentes resultados en la forma final de la pieza.

Existe una base teórica que ha sido utilizada por los distintos investigadores para comprender los mecanismos (límites) de deformación del SPIF que se puede dividir en tres categorías: la aplicación de metodologías de caracterización de la conformabilidad, como diagramas de límites de formación (*Forming Limit Diagram*, FLD), el estudio del efecto de parámetros específicos del proceso en la conformabilidad del material y la predicción de fracturas a través del método de elementos finitos (*Finite Element Method*, FEM) [6].

En cuanto a la caracterización de la conformabilidad experimental del PVC, V. Franzen concluye que, la conformabilidad es mejor que la del latón y muy similar a la de aleaciones de aluminio y acero dulce en aplicaciones de embutición [3]. P. Martins et al, llevaron a cabo experimentos para analizar la conformabilidad, la precisión, los modos de falla y las influencias en la conformabilidad de cinco polímeros termoplásticos. También, evaluó los cambios de color de la lámina durante el proceso formando gradualmente conos con ángulos de pared creciente [7]. Posterior a estos estudios, se tienen las investigaciones de la mecánica de deformación y la influencia de la fricción [8], los efectos de la profundidad incremental y la rotación de la herramienta en los modos de falla y las propiedades microestructurales [9].

Sobre la aplicación de los FLD, La forma clásica de analizar la conformabilidad dentro de este tipo de diagrama puede ayudar a comprender el efecto de los parámetros del proceso. Sin embargo, la complejidad del SPIF va más allá de del alcance de este enfoque [4]. Efectos como la disminución del espesor antes de la estricción o falla sin estricción son difíciles de capturar mediante este método. Además, Es sensible a la historia de deformación y solo es aplicable cuando las deformaciones en la región crítica siguen trayectorias de deformación lineales. Por lo tanto, el FLD debe considerarse como una herramienta útil que brinda información importante sobre la conformabilidad del material, pero no como la herramienta definitiva para su caracterización [6].

Respecto a la predicción de fracturas apoyada por FEM, la observación física y el análisis micromecánico han llevado al desarrollo de una serie de criterios que permiten predecir la fractura dúctil [10]. En vista de la interacción entre los modelos teóricos y las respuestas de los materiales, estos criterios se clasifican en categorías de desacoplados (que no tienen en cuenta los efectos de los daños en la superficie de fluencia de los

materiales) y acoplados (que incorporan la acumulación de daños en las ecuaciones constitutivas) [11]. Los estudios de aplicación de criterios de falla generalmente se han preocupado por su costo computacional y la dificultad de calibración. En este aspecto, destacan los modelos desacoplados debido a su formulación simple y facilidad de calibración, lo que los ha llevado a ser ampliamente aplicados [12].

En 1968, McClintock analizó el crecimiento y la unión de dos huecos cilíndricos largos en un material rígido-plástico y concluyó que el crecimiento del vacío dependía en gran medida de la triaxialidad de la tensión [13]. Un año después, se propone un modelo teórico para el crecimiento de vacíos esféricos en un material rígido-plástico infinito bajo una tensión de tracción hidrostática, donde su análisis mostró que la ductilidad de la fractura disminuye rápidamente con el aumento de la tensión hidrostática [14]. Desde entonces, se han propuesto muchos modelos de fractura dúctil que estiman el inicio de la falla. Algunos de estos criterios fueron desarrollados para problemas específicos, por lo que su validez es limitada. Cockcroft y Latham (1968) desarrollaron un criterio empírico de daño energético para la predicción de la fractura. Más tarde, Brozzo et al. (1968), Introdujeron explícitamente la dependencia de la tensión hidrostática, mientras que Clift et al. (1969) consideraron solo la dependencia de la tensión equivalente. El criterio de Cockcroft y Latham fue modificado por Oh et al, normalizando la tensión máxima con la tensión equivalente [15]. Todos estos criterios indican que el fallo se produce cuando la medida ponderada de la deformación plástica acumulada alcanza un valor crítico C . La expresión (1) resume todos estos modelos:

$$\int_0^{\epsilon^t} f(\epsilon_p) d\epsilon_p = C \quad (1)$$

Estos criterios son capaces de considerar los historiales no lineales de tensión y deformación en la deformación plástica. Sin embargo, sigue siendo escaso un conocimiento sistemático de su fiabilidad y aplicabilidad, y su correlación con los fenómenos de fractura dúctil, lo que limita su aplicación industrial [16]. Algunos estaban orientados a evaluar límites de deformación en operaciones de forja, como consecuencia, son precisos en condiciones de baja triaxialidad.

Existen diversos criterios desacoplados utilizados para la predicción de falla en procesos típicos, en este caso se busca evaluar la capacidad de predecir la falla en el SPIF. Proceso en el cual se presenta un amplio rango de triaxialidad, por lo que se hace difícil reproducir las en ensayos típicos. Para este caso se propone estudiar la mejora de conformabilidad de la lámina de PVC en el SPIF y a partir de esto determinar los límites en una

prueba de línea. Esta será usada para calibrar los criterios y determinar si es posible predecir el inicio de la falla en un tronco de cono fabricado mediante SPIF.

2. Metodología

En primera instancia se busca establecer los parámetros operacionales que maximizan la conformabilidad del PVC a partir del estudio de los efectos de la velocidad de avance y de rotación de la herramienta. En base a estos resultados, se determina el instante de falla para una prueba de línea.

Conociendo cuándo se produce la falla en la prueba experimental de línea, se registra la profundidad del punzón al inicio de la fractura. Luego, se realiza la simulación del ensayo hasta el inicio de la falla y se extrae la información numérica del elemento más crítico, es decir, el historial del de tensiones y la deformación plástica equivalente.

Posteriormente, mediante pruebas experimentales y simulaciones se genera un tronco de cono y se determina la falla la profundidad del punzón al inicio de la falla en la lámina. Con esto, es posible comparar los parámetros de daño de cada ensayo y saber si es posible predecir la falla del tronco de cono a partir de los parámetros de falla determinados mediante la prueba de línea.

2.1. Detalles experimentales

Los ensayos experimentales de SPIF se llevaron a cabo en Centro de Mecanizado del Departamento de Ingeniería Mecánica. Se implementó un banco de ensayos que consiste en una matriz que sujeta la lámina de PVC a conformar. El banco se instala en una máquina CNC correspondiente al modelo XH7126. El espacio de trabajo para realizar el SPIF es de 150x150 mm y la máxima profundidad para conformar la lámina es de 120 mm.

La herramienta encargada de deformar la lámina corresponde a un punzón de acero AISI 1045, de 120 mm de largo y punta semiesférica de 12 mm de diámetro. Para los ensayos se utilizaron láminas de 3 mm de espesor.

2.1.1. Prueba de línea

La prueba de línea consiste en una prueba básica mediante la cual se generan una serie de desplazamientos lineales de la herramienta sobre la lámina, incrementando la profundidad con cada pasada. Con este procedimiento es posible analizar los límites de conformado de la lámina y cómo afectan los distintos parámetros operacionales en la conformabilidad de la lámina. En esta instancia, se

busca determinar la profundidad máxima de conformado a partir del estudio de los efectos de la velocidad de rotación y velocidad de avance de la herramienta.

En 2015, Davarpanah. M, determinó que para incrementos de profundidad mayores a 1 mm se presenta una gran zona de desgarro, por lo que es preferible evitar estos valores [9]. En base a esto, se realizan pruebas preliminares con diferentes incrementos de profundidad Δh , en específico 0.2, 0.5 y 0.7 mm, obteniendo como resultado que este parámetro no influye de gran manera en la conformabilidad de la lámina dentro de este rango.



Figura 1. Banco de ensayos de SPIF. Fuente: elaboración propia.

Un incremento vertical pequeño requiere más tiempo para conformar la lámina, pero la calidad superficial es mejor. Por lo tanto, con la finalidad de realizar un proceso relativamente rápido y manteniendo la buena calidad superficial, se aplica un incremento de 0.5 mm en las siguientes pruebas.

2.1.2. Velocidad de avance y de rotación

Como se menciona anteriormente, parte de esta investigación está orientada a conocer el efecto de la velocidad de avance y de rotación de la herramienta en el SPIF. Por lo tanto, se realizan diferentes pruebas de línea con distintas configuraciones de estos parámetros.

Para cada configuración se realizan tres ensayos, de los cuales se establece que la profundidad máxima alcanzada corresponde al promedio. También, se mide la profundidad alcanzada una vez se retira el punzón. Con lo que se puede determinar la contracción sufrida por cada configuración.

Tabla 1. Parámetros para pruebas de línea.

N° prueba	Velocidad de avance (mm/min)	Velocidad de rotación (rpm)
1	500	800
2	1000	800
3	1500	800
4	2000	800
5	1000	200
6	1000	1400
7	1000	2000

Fuente: elaboración propia.

2.2.3 Fabricación de tronco de cono mediante SPIF

Una vez se definen los parámetros óptimos para maximizar la conformabilidad de la lámina durante el SPIF, se procede a fabricar la geometría de un tronco de cono, ver Figura 2.

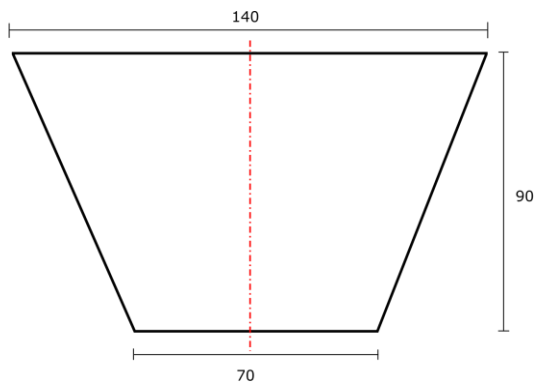


Figura 2. Geometría de tronco de cono. Fuente: elaboración propia.

El objetivo de fabricar este prototipo con un ángulo de pared elevado es presenciar la falla de manera temprana. Esta estrategia permite reducir los tiempos computacionales a la hora de simular el experimento debido al menor número de pasos requeridos.

La metodología consiste en realizar una serie de experimentos para registrar la profundidad al instante de producirse la falla en la lámina conformada.

2.3 Simulación

Paralelamente a los ensayos experimentales se realizan las simulaciones numéricas en el software ANSYS Workbench. Las propiedades mecánicas para definir el material en el programa fueron previamente definidas por Garces, M. en su investigación sobre la caracterización mecánica del PVC [17]. En su estudio, para caracterizar el comportamiento plástico del

material, Garces determinó los parámetros del modelo de endurecimiento de Johnson-Cook (J-C) mediante ensayos de tracción a diferentes velocidades. La ecuación (2) presenta la respectiva ley.

$$\sigma = (45.75 + 10\epsilon^{0.389})(1 - 0.141 \ln \frac{\dot{\epsilon}}{0.01}) \quad (2)$$

En donde, $\dot{\epsilon}$ representa la velocidad de deformación para ensayos que se realizan desde 0.01 a 0.6 s⁻¹.

El modelo numérico consiste en la lámina de PVC que se encuentra con condición de soporte fijo en sus bordes y una esfera que simula el efecto del punzón. Este procedimiento de simplificación ha sido validado por otros investigadores [18][19]. Además, para el mallado se utilizan elementos de 3 mm en la superficie y de 1 mm en el espesor. Si bien para elementos pequeños se tienen mejores resultados, se ha demostrado que para simular el SPIF, con elementos de 3 mm se tienen resultados que coinciden con los experimentales.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del PVC.

Propiedad	
Modulo elástico (MPa)	1023
Coefficiente de Poisson	0.42
Densidad (kg/m ³)	1300
Esfuerzo de fluencia (MPa)	45.75
Esfuerzo de ruptura (MPa)	54.08

Fuente: [17].

La Figura 3 presenta la distribución de deformación plástica equivalente una vez se llega a la profundidad de inicio de la falla, la cual fue determinada experimentalmente. Se selecciona el elemento más crítico de la geometría para extraer el historial de tensiones y deformación plástica equivalente. En este caso, se identifica una zona crítica y se elige el elemento externo de la lámina. Esto porque se ha determinado que en el SPIF la grieta de inicial del lado exterior y se propaga hacia el interior. Además, en cualquier parte del tronco de cono se tiene un valor de

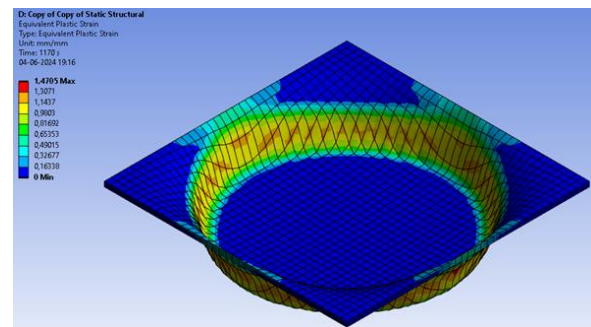


Figura 3. simulación de tronco de cono hasta la falla. Fuente: elaboración propia.

deformación plástica mayor en el exterior que en el interior. Esto se debe al estiramiento y flexión provocada por la herramienta, lo que hace que el lado exterior de la lámina se estire más que el interior [19].

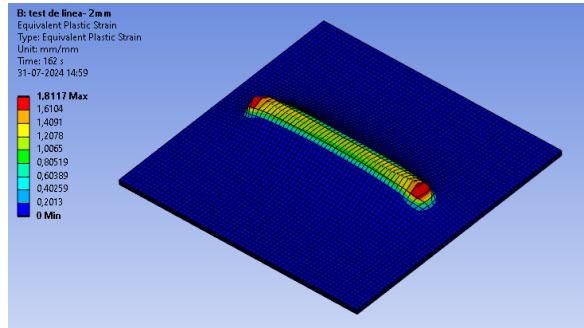


Figura 4. Simulación prueba de línea hasta la falla. Fuente: elaboración propia.

2.4 Criterios de fractura dúctil

Se han propuesto muchos criterios y modelos de para predecir la falla por fractura dúctil, principalmente de metales. Estos criterios se basan en la observación y experiencia. En este trabajo se evaluarán criterios ampliamente conocidos, y que han sido utilizados en diversas aplicaciones industriales como, por ejemplo, el de Rice and Tracey que ha sido validado para proceso de corte [20]. Sin embargo, no se ha establecido el rango de aplicabilidad de todos estos criterios.

Se dice que la fractura comienza en una zona del material cuando la función escalar de la ecuación (1) alcanza un valor crítico C . Donde, ε_p es la deformación plástica equivalente, ε_t es la deformación plástica equivalente al instante de alcanzar la falla y $f(\varepsilon_p)$ es la función de ponderación que generalmente está en función del tensor de tensiones.

Tabla 3. Modelos de fractura dúctil.

Modelo	$f(\varepsilon_p)$
Trabajo plástico [21]	$\bar{\sigma}$
Cockroft and Latham [22]	σ_1
Brozzo [23]	$\frac{2\sigma_1}{3(\sigma_1 - \sigma_m)}$
Rice and Tracey [14]	$\exp\left(\frac{2\sigma_m}{3\bar{\sigma}}\right)$

Fuente: elaboración propia.

Se tiene, además que $\bar{\sigma}$ corresponde al esfuerzo equivalente de Von Mises, σ_1 es el esfuerzo principal máximo, σ_m es el esfuerzo hidrostático. En la Tabla 3,

se presentan los cuatro criterios a evaluar en este trabajo.

3. Resultados

A continuación, se presentan en orden los resultados obtenidos para cada actividad. En primer lugar, el estudio de parámetros mediante la prueba de línea. Luego, mediante los parámetros que optimizan la conformabilidad se fabrica el tronco de cono y se determina su inicio de falla. Finalmente, se evalúan los distintos criterios de fractura dúctil.

3.1 Influencia de la velocidad de avance y de rotación

A partir de las pruebas experimentales de línea se obtienen los resultados de las Figuras 5 y 6. La mayor profundidad de conformado fue de 19.5 mm, la cual se alcanzó con una velocidad de avance de 1000 mm/min. Para la velocidad de 1500 mm/min, se aprecia una leve disminución de la profundidad máxima de solo 0.5 mm, sin embargo, la contracción que sufre la lámina una vez retirada la herramienta es mayor. Este fenómeno afecta en la precisión geométrica del producto final, por lo que se busca evitar su aumento.

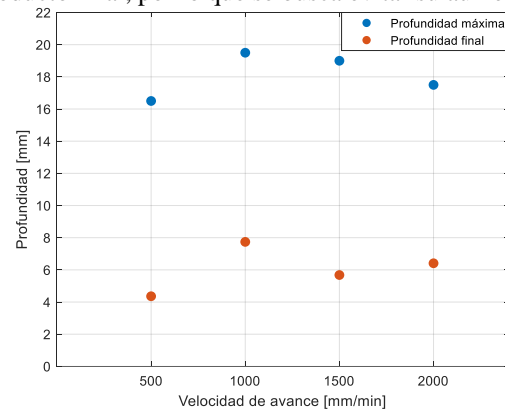


Figura 5. Profundidad máxima y final para distintas velocidades de avance. Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la velocidad de rotación (ver Figura 6), la mayor profundidad es de 19.5 mm, la cual se alcanza con 800 rpm. Para la velocidad de 200 rpm se registra una leve disminución de la profundidad y de la contracción, este último implica una mayor diferencia entre el diseño deseado y el obtenido. Se tiene una clara tendencia de disminución de la conformabilidad a partir de velocidades mayores a 800 rpm.

Al trabajar a velocidades de 2000 rpm se produce el derretimiento de la superficie, lo que empeora el acabado superficial. Cabe mencionar que debido a la alta velocidad el lubricante salpica fuera del banco de ensayos, por lo que se hace necesario restituirlo de manera continua.

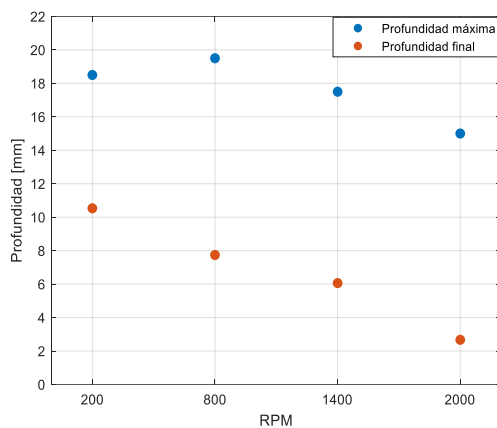


Figura 7. Profundidad máxima y final para distintas velocidades de rotación. Fuente: elaboración propia.

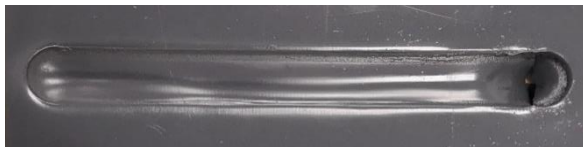


Figura 6. Prueba de línea con velocidad de rotación de 2000 rpm. Fuente: elaboración propia.

3.2 Falla en el tronco de cono

Una vez se determinan los parámetros óptimos que aumentan la conformabilidad de la lámina de PVC, se procede a fabricar la geometría del tronco de cono que se muestra en la Figura 2. La Tabla 4 resume la configuración de parámetros utilizada.

Al realizar tres ensayos del prototipo, se obtuvieron profundidades muy similares a las que se inicia la falla, siendo a 26.5, 28 y 29 mm. Por lo tanto, para determinar el parámetros de falla se decide evaluar los modelos con la simulación hasta los 28 mm de profundidad.

Tabla 4. Parámetros operacionales para fabricar tronco de cono.

Parámetro	
Velocidad de avance (mm/min)	1000
Velocidad de rotación (rpm)	600
Velocidad de penetración (mm/min)	200
Incremento de profundidad (mm)	0.5
Diámetro herramienta (mm)	12

Fuente: elaboración propia.

La velocidad de penetración se determina a través de ensayos previos, obteniendo una influencia prácticamente inapreciable con velocidades de hasta 300 mm/min.

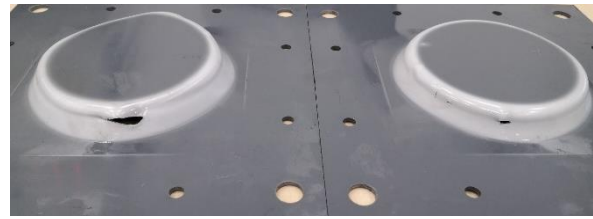


Figura 8. Falla en prototipos fabricados por SPIF.

3.3 Evaluación de criterios de falla

Con los resultados de las simulaciones de los experimentos de la prueba de línea y del prototipo de tronco de cono, se logra determinar el parámetro crítico C de los distintos criterios de fractura dúctil, los que se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Parámetro crítico C de cada modelo de fractura dúctil.

Modelo	Prueba de línea	SPIF
Trabajo plástico	99.95	100.23
Cockroft and Latham	117.73	124.40
Brozzo	2.88	3.01
Rice and Tracey	2.85	3.11

Fuente: elaboración propia.

El modelo de Trabajo plástico presenta la mejor precisión a la hora de comparar el parámetro obtenido por cada prueba, la variación es menor al 1%. Le sigue el criterio de Brozzo, con una variación del 4.3% y el de Cockroft and Latham con un 5.4%. Finalmente, el que presenta la peor precisión es el de Rice and Tracey con un 9% de diferencia.

La trayectoria del parámetro crítico del criterio de Trabajo plástico se presenta en la Figura 7. Es notoria la diferencia del parámetro en los distintos niveles de profundidad, sin embargo, en ambos casos el inicio de la fractura dúctil comienza con un parámetro cercano a 100. Además, se agrega la evaluación para un ensayo de tracción a modo de referencia, siendo la profundidad el desplazamiento de la probeta en este caso.

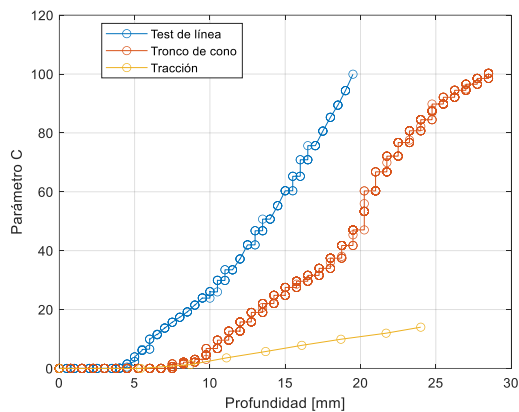


Figura 9. Evolución del parámetro de daño de Trabajo plástico para los ensayos de SPIF y de tracción. Fuente: elaboración propia.

La evolución de la triaxialidad del elemento crítico de la prueba de línea y el tronco de cono se presentan en las Figuras 10 y 11, respectivamente. Para el caso del ensayo de tracción, la triaxialidad permanece constante en el valor de 0.33.

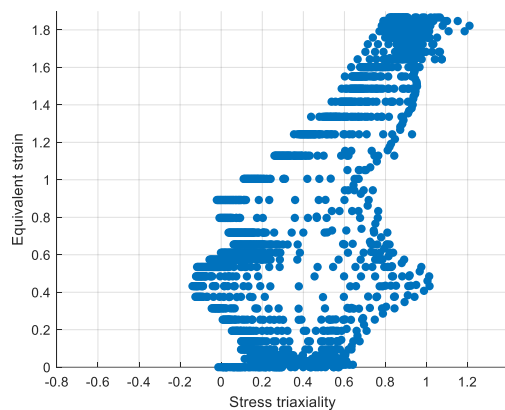


Figura 10. Triaxialidad del elemento crítico durante SPIF de tronco de cono. Fuente: elaboración propia.

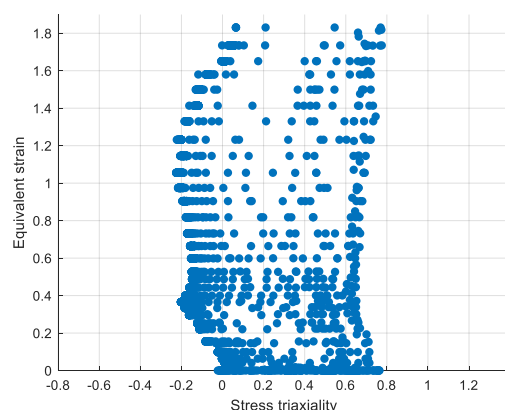


Figura 11. Triaxialidad del elemento crítico durante prueba de línea. Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

El estudio de parámetros operacionales permite establecer los límites de operación para maximizar la conformabilidad del la lámina de PVC sin afectar en gran medida el acabado superficial. Velocidades de avance desde 1000 a 1500 mm/min y de rotación de 200 a 800 rpm, son las recomendables. Se determina que las bajas velocidades de avance y altas velocidades de rotación provocan derretimiento de la superficie debido a la alta temperatura. El gran tiempo de contacto y la alta fricción aumentan el calor en la zona deformada, por lo que se deben evitar estos fenómenos.

Se demuestra que es posible calibrar un criterio de falla con un ensayo de línea para predecir la falla en un tronco de cono fabricado mediante parámetros específicos en el SPIF. Esto se explica por la capacidad de reproducir en gran medida los estados de triaxialidad del elemento crítico en el conformado del prototipo (ver Figuras 10 y 11). Otros ensayos típicos, como el de tracción, no son efectivos para determinar el parámetro crítico debido a que solo capturan un estado de triaxialidad hasta la falla.

El criterio de Trabajo plástico es adecuado para predecir el inicio de la fractura dúctil del tronco de cono. En cambio, los criterios de Cockroft and Latham y Rice and Tracey se alejan considerablemente. Estos criterios han sido validados para procesos de corte, por lo que tiene sentido su limitado rango de aplicación. En cambio, el criterio de Trabajo plástico se ha usado para evaluar un amplio rango de triaxialidad.

En la práctica, el criterio es sencillo de evaluar, puesto que se hace a partir de las tensiones y deformación plástica del elemento crítico de la simulación. Esto se puede hacer de manera automática mediante un código externo.

5. Referencias

- [1] Guzmán, Carlos Felipe, et al. "Damage prediction in single point incremental forming using an extended Gurson model." *International Journal of Solids and Structures*, vol. 151, 45-56, 2018 [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020768317301646>
- [2] Jeswiet, J., et al. "Asymmetric single point incremental forming of sheet metal." *CIRP annals*, vol. 54, pp. 88-114, 2005 [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S00768317301646>
- [3] Franzen, V., et al. "Single point incremental forming of PVC." *Journal of materials processing*

- technology*, vol. 209, pp 462-469, 2009 [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013608001398>
- [4] Silva, M. B., et al. "Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 48, n.º 1, pp. 73-83, 2008 [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695507001289>
- [5] Le, V. Sy, Andrea Ghiotti, and Giovanni Lucchetta. "Preliminary studies on single point incremental forming for thermoplastic materials." *International Journal of material forming*, vol. 1, pp. 1179-1182, 2008 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s12289-008-0191-0>
- [6] Cheng, Zinan, et al. "Incremental sheet forming towards biomedical implants: A review." *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, n.º 4, pp. 7225-7251, 2020 [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785420312618>
- [7] Martins, P. A. F., et al. "Single point incremental forming of polymers." *CIRP annals*, vol. 58, n.º 1, pp. 229-232, 2009 [en línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850609000882>
- [8] Marques, Tania A., Maria Beatriz Silva, and P. A. F. Martins. "On the potential of single point incremental forming of sheet polymer parts." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 60, pp. 75-86, 2012 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3585-y>
- [9] Davarpanah, Mohammad Ali, et al. "Effects of incremental depth and tool rotation on failure modes and microstructural properties in Single Point Incremental Forming of polymers." *Journal of materials processing technology*, vol. 222, pp. 287-300, 2015 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.014>
- [10] Li, Wenchao, et al. "Ductile fracture of Q460 steel: Effects of stress triaxiality and Lode angle." *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 123, pp. 1-17, 2016 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.04.018>
- [11] Xue, Z., et al. "Calibration procedures for a computational model of ductile fracture." *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 77, n.º 3, pp. 492-509, 2010 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2009.10.007>
- [12] Li, Heng, et al. "Ductile fracture: Experiments and computations." *International journal of plasticity*, vol. 27, n.º 2, pp. 147-180, 2011 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2010.04.001>
- [13] McClintock, Frank A. "A criterion for ductile fracture by the growth of holes." pp. 363-371, 1968 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1115/1.3601204>
- [14] Rice, J. R., and Dennis Michael Tracey. "On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields*." *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 17, n.º 3, pp. 201-217, 1969 [en línea]. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(69\)90033-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(69)90033-7)
- [15] Oh, S. I., C. C. Chen, and S. Kobayashi. "Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing—part 2: workability in extrusion and drawing." 1979 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1115/1.3439471>
- [16] Giglio, Marco, Andrea Manes, and F. Vigano. "Ductile fracture locus of Ti-6Al-4V titanium alloy." *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 54, n.º 1, pp. 121-135, 2012 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2011.10.003>
- [17] Garces, M. "Caracterización mecánica de planchas de PVC espumado." *Universidad de Concepción*, 2022.
- [18] Naranjo, J., et al. "Analysis and simulation of single point incremental forming by ANSYS®." *Procedia engineering*, vol. 132, pp. 1104-1111, 2015 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.602>
- [19] Malhotra, Rajiv, et al. "Mechanics of fracture in single point incremental forming." *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, n.º 7, pp. 1573-1590, 2012 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.02.021>
- [20] Goijaerts, A. M., L. E. Govaert, and F. P. T. Baaijens. "Evaluation of ductile fracture models for different metals in blanking." *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 110, n.º 3, pp. 312-323, 2001 [en línea]. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00892-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00892-X)
- [21] Freudenthal, A. M. "The Inelastic Behavior of Solids." 1950 [en línea]. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-642-45887-3_3

[22] Cockcroft, M. G. "Ductility and workability of metals." *J. of Metals*, vol. 96, p. 2444, 1968 [en línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/C2021-0-01824-1>

[23] Brozo, P., B. Deluca, and R. Rendina. "A new method for the prediction of formability in metal sheet, sheet metal forming and formability." *Proceedings of the 7th Biennial Conference of the IDDRG*, 1972 [en línea]. Disponible en: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=489941>