

Robotic Incremental Sheet Metal Forming: Waste Management Through Digital Fabrication

Camila Tala¹, Joaquín König¹, Paola Benavides¹, Felipe Véliz¹

¹ Universidad Adolfo Ibáñez, Santiago, Chile
ctala@alumnos.uai.cl; jkonig@alumnos.uai.cl; paola.benavides@uai.cl;
felipe.veliz.f@uai.cl

Abstract. In this investigation, a robotic incremental sheet forming (RISF) process was used as a response to traditional methods of recycling and reusing scrap metal. The methodology was carried out in three stages: digital reconstruction of the waste by 3D scanning, tensile test according to the ASTM E8 standard for the mechanical characterization of the material and the use of a heavy-load robot, KUKA KR180 R2500, for incremental forming. The results obtained in the tensile test indicated that the material maintains its isotropy and reaches 10% elongation. On the other hand, parameters of the incremental forming process showed: the ability of the material to be deformed with a maximum wall angle of 55°; speed rate of 50%; stepdown of 2 mm; and maximum depth of 75 mm. Finally, the process was used for the development of an ornamental surface.

Keywords: Robotic fabrication, Incremental sheet metal forming, Upcycling, Scrap metal

1 Introducción

Los procesos tradicionales de conformado en metal limitan estrategias adaptables de fabricación. En relación con esto, Fratini et al. (2004) señalaron que las características asociadas a la complejidad del equipamiento requerido y los costos de las herramientas son desventajas en el uso de procesos de estampado, siendo este económicamente apropiado en producciones de gran escala. Asimismo, e independiente de ser económico en comparación a otros procesos, el embutido, usado ampliamente en diferentes industrias, compromete varias etapas e instrumentos que aumentan el valor final del procedimiento (Tiwari et al., 2022). En la actualidad, procesos flexibles de manufactura se caracterizan tanto por su capacidad en ampliar la variedad geométrica de una pieza específica como por la disminución en la cantidad de herramientas necesarias para su producción, aumentando la oferta de los

objetos producidos que dan soluciones a problemas similares (Bowen et al., 2022).

El proceso de conformado incremental (ISF, por su sigla en inglés) es una alternativa a los dos procedimientos mencionados anteriormente, debido a su optimización de recursos, asociados a herramientas y moldes, y la capacidad en producir geometrías complejas. No obstante, tiempos prolongados de ejecución limitan su aplicación a pequeñas series de producción (Bârsan et al.). De igual forma, Ingarao et al. (2012) compararon procesos de conformado incremental y de estampado. Los resultados obtenidos evidenciaron un ahorro energético mayor en los procesos de estampado. Por otra parte, y debido a su capacidad de adaptación geométrica y de trabajo de deformación mecánica local, los procesos de conformado incremental son apropiados en etapas de re-utilización de metales ya deformados plásticamente (Ingarao et al., 2020).

Respecto al uso del conformado incremental, Oraon et al. (2020) estudiaron los efectos que producen los diferentes parámetros del proceso en la fuerza aplicada. Así, indicaron como variantes relevantes a considerar el espesor del material, velocidad de trayectoria de la herramienta, ángulo de la geometría y profundidad de avance de la herramienta. De igual manera, Bhasker & Kumar (2023) explicaron los parámetros materiales resultantes del proceso de conformado incremental. Los autores establecieron como la principal variable a tener en cuenta, la capacidad del material a ser deformado. En relación con esto, una desventaja del proceso de conformado incremental es la desviación resultante entre el diseño original y la pieza producida debido a la recuperación elástica del material (Bârsan et al.; Ren et al., 2019).

El desarrollo histórico del conformado incremental fue evidenciado por Emmens et al. (2010). En su artículo, los autores describieron los avances a lo largo del tiempo, desde estrategias manuales de deformación plástica hasta el trabajo colaborativo de brazos robóticos industriales de carga pesada. Estos últimos, en virtud de sus grados de libertad de movimiento, amplían las posibilidades geométricas que se pueden alcanzar en procesos de conformado incremental realizados con máquinas CNC de tres ejes. Por consiguiente, nuevas estrategias de manufactura son desarrolladas, optimizando periodos de tiempo, flujos de trabajo y requerimientos propios de las industrias creativas (Lublasser et al., 2016).

Varios autores han investigado la aplicación de procesos de conformado incremental robótico (RSIF, por su sigla en inglés) en arquitectura o diseño industrial. Chadha et al. (2020) optimizaron, por medio de algoritmos recursivos, las trayectorias concéntricas comúnmente usadas en procesos de conformado incremental y obtuvieron mayor profundidad por área deformada. Así, fabricaron superficies de doble curvatura mediante deformaciones plásticas locales. También, estas modificaciones en las propiedades de origen del material influyen directamente en la rigidez de elementos constructivos metálicos independientes capaces de armar estructuras livianas asimétricas (Nicholas et al., 2016). En relación con la desviación resultante producida por la recuperación elástica inherente del material, Cui et al. (2022) desarrollaron

estrategias de soporte global y local. Por medio de dos brazos robóticos de carga pesada (DSIF, por su sigla en inglés), los autores definieron trayectorias diferenciadas en la cara frontal y posterior del material. Una vez terminado el proceso descrito, métodos de compensación a través de escaneado 3D y simulación de elementos finito (FEA, por su sigla en inglés) fueron ejecutados para minimizar la variación geométrica. Por otra parte, Nicholas et al. (2021) propusieron una metodología para reutilizar objetos en desuso a través del proceso de conformado incremental robótico y así, evitar costos energéticos asociados a procedimientos tradicionales de reciclaje. Mediante un flujo de trabajo que incluye escáner 3D, procesamiento de datos y configuraciones de fabricación, los autores no solo aumentaron la vida útil de un producto desechado, sino que modificaron su uso original.

El objetivo de esta investigación fue desarrollar una metodología de fabricación con base en procesos de conformado incremental robótico que permita extender la vida útil de objetos metálicos en desuso, sin la necesidad de implementar procesos de fundición u otras técnicas de reciclaje tradicional.

2 Metodología

La metodología utilizada se organizó en tres etapas: reconstrucción digital de los objetos en desuso, identificación de sus propiedades mecánicas y definición de parámetros de fabricación. Los objetos en desuso seleccionados para esta investigación son dos capós de auto, del mismo modelo, fabricados en acero y producidos por medio de procesos de estampado en frío. También, previamente a su elección, los objetos han sido transformados superficialmente mediante la aplicación de masilla automotriz y pintura para corregir imperfecciones de apariencia. Con la finalidad de diferenciar los objetos en las etapas posteriores, se identificó el primer capó como A, y el segundo capó, B.

2.1 Reconstrucción digital

Por lo general, procesos de conformado incremental usan materiales metálicos planos. En otras palabras, láminas homogéneas desde un punto de vista de sus propiedades físicas, mecánicas, de interacción con el entorno y estéticas.

A fin de construir un modelo digital que permita identificar las características geométricas de los objetos en desuso a utilizar durante esta investigación, se realizó un escaneado 3D. Un modelo Creaform HandySCAN 700, con una precisión de hasta 0.03 mm y una resolución de 0.05 mm, fue utilizado.

2.2 Caracterización mecánica del material

Con el propósito de conocer valores característicos y definir comportamientos isotrópicos o anisotrópicos del acero a trabajar, se realizaron ensayos de

tracción uniaxial. Una máquina de ensayo universal con una celda de carga de 100 kN fue utilizada. La velocidad de alargamiento se determinó en 5 mm/min. Un total de dieciocho probetas fueron ensayadas. Estas, organizadas en función de dos grupos (capós A y B) de nueve probetas cada uno y a su vez, subgrupos de tres probetas diferenciadas por su ángulo de rotación, 0°, 45° y 90° respectivamente, con el objetivo de medir sus propiedades en todas las direcciones de la fibra. Las probetas fueron diseñadas según lo descrito en la norma ASTM E8. La extracción de las probetas ensayadas se realizó mediante el uso de una máquina por corte de agua CNC Multicam V Series, repetibilidad de $\pm 0.001''$ (Fig. 1). Debido a la curvatura presente en las superficies de los objetos en desuso utilizados en esta investigación, se evidenciaron variaciones en los perímetros resultantes de cada una de las probetas cortadas.

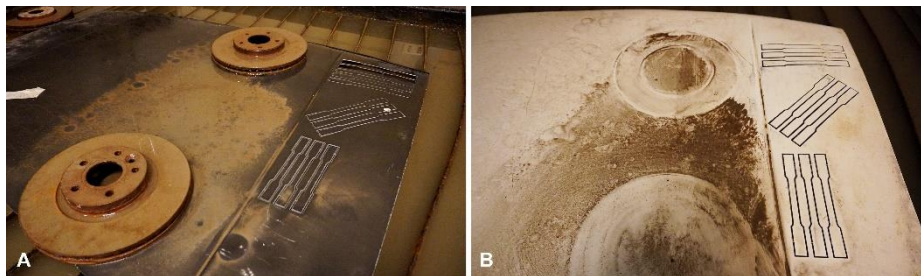


Figura 1. Extracción de probetas en máquina CNC de corte por agua. (A) capó A y (B) capó B. Subgrupos de probetas organizadas por su ángulo de rotación, 0°, 45° y 90°. Fuente: los autores.

2.3 Variable de fabricación

El proceso de conformado incremental fue realizado por un brazo robótico de carga pesada KUKA KR 180 R 2500, repetibilidad según norma ISO 9283 de ± 0.06 mm, montado sobre un eje adicional de longitud 3.80 mts. Con el fin de reducir factores que influyan en la precisión de trabajo de la herramienta sobre el material, durante cada una de las rutinas el brazo robótico permaneció inmóvil en relación a su posición en el eje adicional. Una herramienta de acero templado, punta bola y diámetro de 12.70 mm fue utilizada. La configuración de los movimientos ejecutados por el brazo robótico fue definida mediante el programa de extensión para Grasshopper, KUKA|prc.

Un total de cuatro parámetros fueron analizados: ángulo geométrico admisible, inclinación máxima de las superficies a conformar; velocidad de trayectoria, definida a partir de porcentajes referenciados por la velocidad máxima de configuración, 2 m/s; profundidad de trabajo de la herramienta, distancia vertical entre cada una de las secciones horizontales que definen las trayectorias (*Stepdown*, por su nombre en inglés); y profundidad máxima admisible. De esta manera, se determinaron los efectos de cada variable en la

deformación plástica del material y en la desviación resultante. La tabla 1 especifica los parámetros ensayados.

Tabla 1. Parámetros de fabricación ensayados. Variables de ángulo geométrico admisible y *stepdown* se realizaron con una velocidad constante de 10%. Asimismo, la profundidad máxima fue realizada con una velocidad constante de 50%.

Parámetro	Iteración 1	Iteración 2	Iteración 3	Iteración 4
Ángulo [°]	45	50	55	60
Stepdown [mm]	0.5	1.0	1.5	2.0
Velocidad [%]	20	30	40	50
Profundidad máxima [mm]	75			

Seis formatos de 280 mm x 280 mm, extraídos del capó B, se usaron para realizar la totalidad de los ensayos. La Figura 2 resume el desarrollo de los ensayos realizados. Con el fin de optimizar el material disponible en la investigación, se ensayaron cuatro iteraciones de cada parámetro por formato (a excepción del último parámetro, profundidad máxima, que se ensayó solo una iteración). La geometría primitiva seleccionada para los tres primeros parámetros ensayados mencionados anteriormente fue un cono truncado de diámetro base 75 mm y una altura máxima de 25 mm; para el parámetro de profundidad máxima admisible se usó un cono truncado de diámetro base de 180 mm. Trayectorias concéntricas fueron utilizadas. Por último, y con el objetivo de mantener refrigerada la zona de contacto y reducir la fricción entre la herramienta y el material a conformar, se utilizó aceite como lubricante.

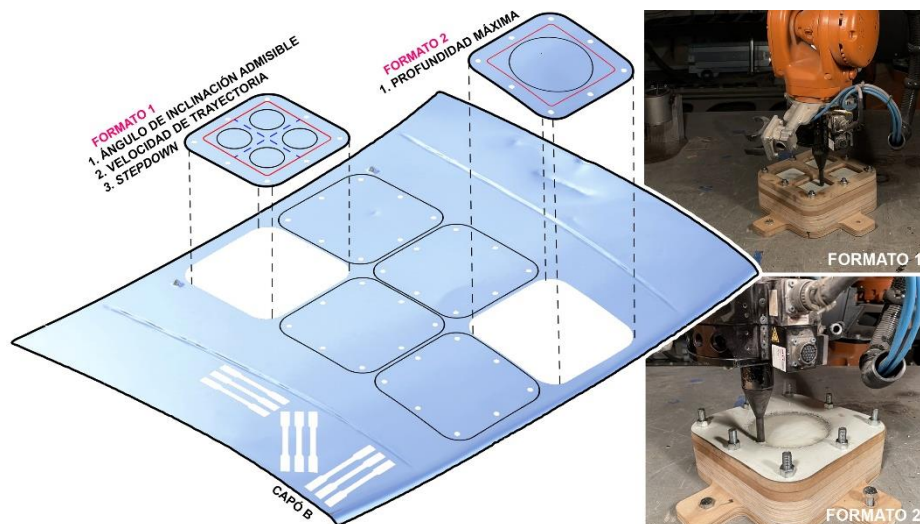


Figura 2. Formatos utilizados en variables de fabricación. Fuente: los autores.

3 Resultados y discusión

3.1 Reconstrucción digital

La malla resultante desde la nube de puntos permitió obtener información global de las superficies; dimensiones generales, área total y curvatura en coordenadas UV. De igual manera, análisis de continuidad de las superficies evidenciaron deformaciones plásticas locales; discontinuidades geométricas por causa de abolladuras y perforaciones (Fig. 3). Los modelos digitales de cada uno de los capós permitieron observar un mayor deterioro en el capó B. Por otra parte, imperfecciones asociadas a la corrosión no pudieron ser determinadas por este método.

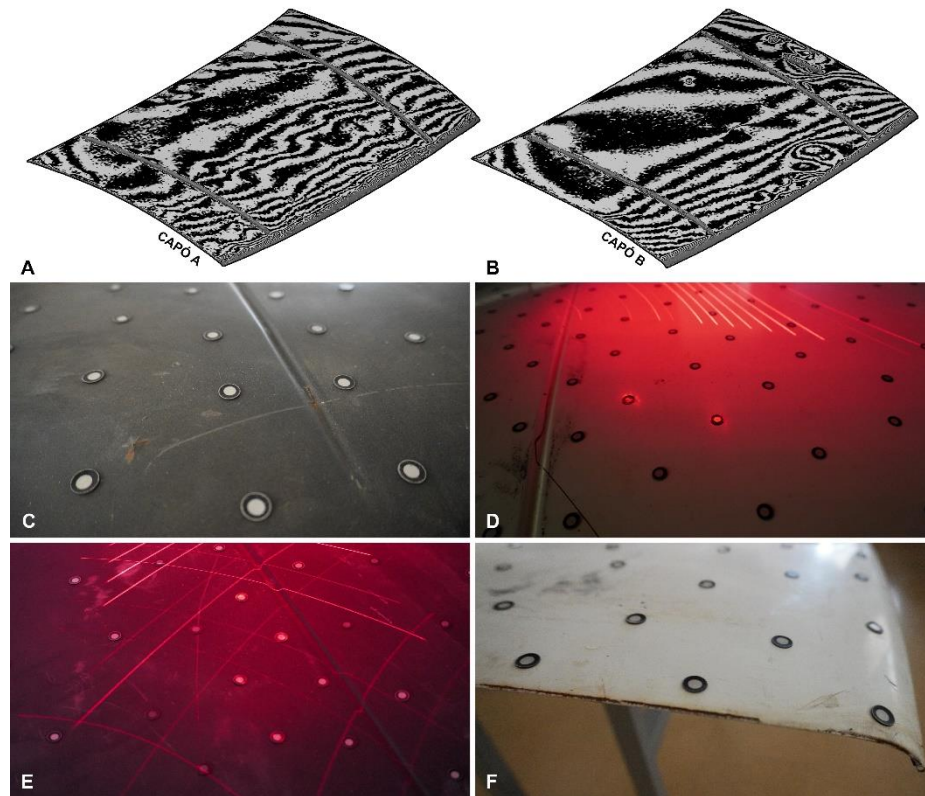


Figura 3. Proceso de escaneado 3D. (A-B) Análisis de continuidad aplicado en el modelo digital de cada uno de los objetos en desuso utilizados en esta investigación, (C-D-E-F) detalles del proceso de escaneado 3D, posicionamiento aleatorio de puntos referenciales, nervaduras y pliegues presentes en los capós. Fuente: los autores.

3.2 Caracterización mecánica del material

Los resultados obtenidos para cada una de las series de probetas ensayadas demostraron la isotropía del material. Esta característica favoreció los procesos posteriores de conformado incremental, debido a que garantizó deformaciones constantes al margen del área de trabajo. La Tabla 2 muestra los resultados generales de las probetas ensayadas. La carga máxima promedio aplicada antes de la ruptura fue de 2.73 kN para el capó A en tanto, para el capó B fue de 2,86 kN. Respecto a la influencia que tiene tanto la masilla automotriz como la pintura en la deformación parcial y final del objeto, con los resultados observados no fue posible determinar su incidencia.

Tabla 2. Resultados las probetas ensayadas.

	Capó A	Capó B
Promedio de carga máxima de ruptura [kN]	2.73	2.86
Desviación estándar [kN]	0.08	0.08
Coefficiente de variación [%]	2.84	2.92
Promedio de alargamiento [%]	10	11
Promedio Límite Elástico [MPa]	156	129

También, se aprecian en los resultados los valores promedio alcanzados por el límite elástico. Estos, evidenciaron que se trata de un acero dulce con bajo porcentaje de carbono, ajustándose también a un alargamiento promedio del 10%. Asimismo, los resultados están en concordancia con la ductilidad que mostró el material al ser trabajado bajo procesos conformado incremental robótico.

Materiales que ya han sido deformados plásticamente durante su producción original pueden experimentar roturas imprevistas durante el proceso de conformado incremental. Sobre esto, Ingarao et al. (2020) señalan que los materiales ya procesados se caracterizan por zonas de alargamiento local, cuya deformación residual es limitada, en otros términos, el material pierde ductilidad.

3.3 Variables de fabricación

Una vez obtenidos los resultados fue posible establecer que los ángulos de inclinación mayores a 55° deben ser excluidos del diseño final a trabajar posteriormente en la etapa de prototipo a escala. Esto, ya que se evidenció una ruptura material a los 60°. Por otra parte, no se observaron cambios geométricos por variación de velocidad que se deban tener en cuenta en esta investigación; solo hay una disminución en el tiempo de ejecución de la rutina

de conformado. Por el contrario, la resolución de las superficies resultantes evidenció cambios, visualmente reconocibles, cuando la profundidad de trabajo de la herramienta es mayor o igual a 1.5 mm. Finalmente, y condicionada por la altura total del marco de sujeción, se alcanzó una profundidad máxima admisible de 75 mm; con una configuración de 45° de ángulo de inclinación, velocidad de trayectoria de 50% y un *stepdown* de 0.5 mm. La Figura 4 muestra los resultados físicos de los parámetros descritos en esta sección.

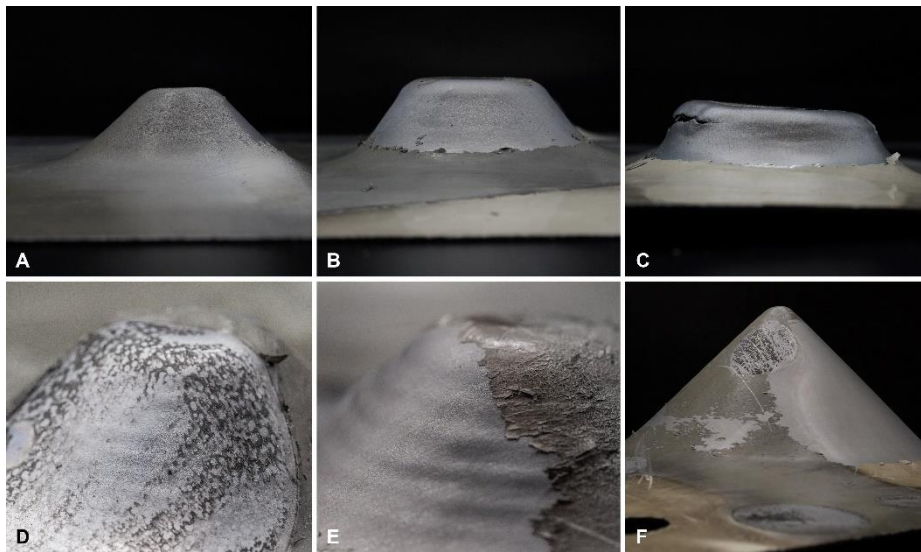


Figura 4. Parámetros analizados. (A) ángulo de inclinación de 45°, (B) ángulo de inclinación de 55°, (C) ángulo de inclinación de 60°, (D) profundidad de trabajo de 1.5 mm, (E) profundidad de trabajo de 2.0 mm, y (F) altura máxima alcanzada de 75 mm. Fuente: los autores.

3.4 Caso de estudio: elemento constructivo ornamental

Métodos tradicionales implementados para el desarrollo de geometrías complejas en metal a escala arquitectónica, comúnmente se asocian a panelizaciones basadas en superficies desarrollables; geometrías tridimensionales que pueden ser desplegadas en superficies bidimensionales.

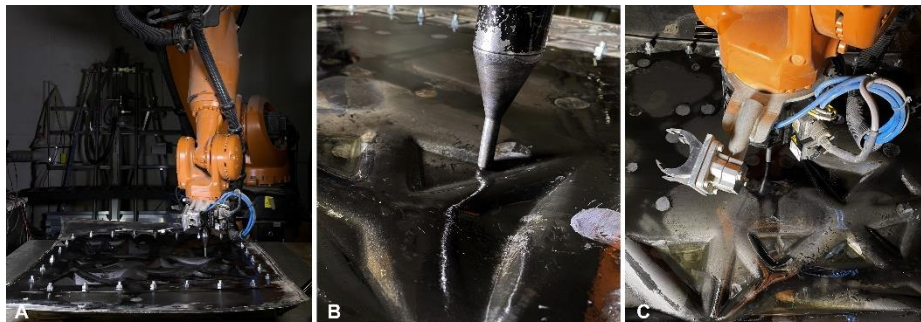
Por un lado, una subdivisión a partir de módulos triangulares o cuadriláteros planos. Por otra parte, superficies alargadas deformadas en una sola coordenada local, geometrías de curvatura simple (Lee & Kim, 2012). Así, sistemas complejos variables de fachada pueden ser fabricados usando procesos de conformado incremental robótico (Kalo & Newsum, 2014), aumentando la capacidad en producir componentes customizados. En relación a esto, tanto la producción como la personalización en masa contrastan visiones tradicionales asociadas a los extensos tiempos de ejecución y altos costos de fabricación de piezas ornamentales arquitectónicas (Sousa & Malé-

Alemaný, 2005). En relación con esto, la tecnología digital manifiesta el uso del ornamento como una combinación de técnica, cultura y experiencia (Panus, 2023).

Un prototipo a escala fue desarrollado en esta investigación con el fin de experimentar el potencial uso de los procesos de conformado incremental robótico en transformar desechos metálicos en elementos constructivos ornamentales. La propuesta geométrica basó su diseño en las variables óptimas de fabricación resultantes descritas anteriormente. Por consiguiente, se establecieron los siguientes parámetros: ángulo de inclinación de 45°; velocidad de trayectoria de 50%, profundidad de trabajo de 0.5 mm por cada nivel horizontal; variaciones de profundidades máximas entre 25 mm y 75 mm; y trayectorias concéntricas. Un patrón basado en subdivisiones Delaunay fue utilizado como base. Se parametrizaron las relaciones geométricas entre cada uno de los veinticinco módulos, definiendo que, a menor área, menor profundidad máxima.

Con el fin de reducir al mínimo la manipulación del objeto en desuso a conformar, capó A, solo se añadieron perforaciones perimetrales a su forma base. Estas perforaciones, fueron útiles tanto para posicionar como para prensar el objeto en el marco de fijación. Así, evitar movimientos involuntarios durante el proceso de conformado que puedan modificar los resultados. El marco de fijación fue fabricado a partir de secciones bidimensionales de placas madera cortadas en máquina router CNC de tres ejes.

La desviación geométrica inherente al proceso de conformado incremental fue asumida como una variable de diseño no predecible. Así, en esta primera aproximación a la técnica de conformado incremental robótico aplicada a objetos en desuso, la variación entre el modelo digital y el resultado físico se fundamentó en: la condición de doble curvatura positiva del objeto original, la deformación global del objeto a conformar una vez posicionado y prensado en el marco de fijación y la deformación local a medida se desarrollaba el conformado. Esta última, influyó directamente en los módulos adyacentes, modificando constantemente la altura e inclinación de la superficie y plano de trabajo; módulos ubicados en la zona central sufrieron una mayor desviación que aquellos próximos a la fijación perimetral. La Figura 5 muestra el resultado final de la textura tridimensional aplicada en la superficie base y su desarrollo.



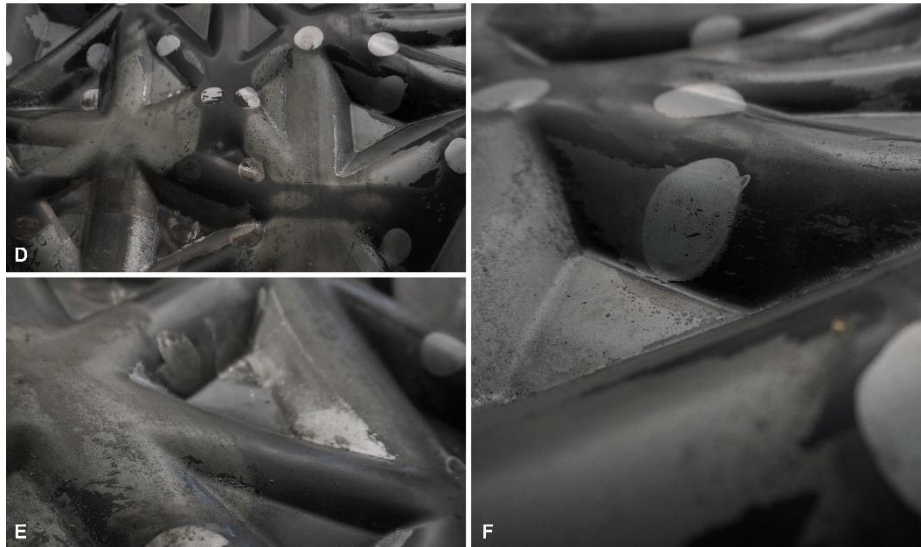


Figura 5. Prototipo a escala de la superficie ornamental. (A-B-C) proceso de conformado incremental robótico y (D-E-F) detalles de deformaciones resultantes; textura 3D aplicada a superficie. Fuente: los autores.

4 Conclusión

Esta investigación desarrolló una metodología de trabajo basada en una integración lineal entre la reconstrucción digital de objetos metálicos en desuso mediante escaneado 3D, caracterización material y la configuración de parámetros de manufactura asociados a procesos de conformado incremental robótico. Esta primera iteración metodológica concluyó con la fabricación de una superficie no estructural ornamental a escala arquitectónica. De esta manera, promover la reutilización de materiales ya deformados plásticamente y extender su vida útil. En relación con la producción del prototipo, se realizó con la cantidad mínima de etapas involucradas; asumiendo su condición de investigación en curso.

A pesar de ya estar deformado por estampado, el material mantuvo su ductilidad e isotropía. Asimismo, el bajo límite elástico probablemente se debió a que el trabajo de estampado en frío, al cual se sometió para ser conformado anteriormente, se produce por cargas de compresión. De igual manera, la recuperación elástica inherente al material generó desviaciones geométricas entre el modelo digital y el objeto resultante.

Por otro lado, el *stepdown* fue un factor determinante al momento de analizar la definición del objeto. Sin embargo, se debe tener en cuenta el tiempo de ejecución; a menor profundidad de trabajo de la herramienta, mayor tiempo

de trabajo. Respecto a las condiciones superficiales de origen, trabajos anteriormente realizados sobre los objetos, capas de pinturas o masilla automotriz, no fueron características medibles durante el proceso de conformado incremental; estas influyeron solo a nivel de la apariencia final.

Agradecimientos. La investigación fue desarrollada como parte del proyecto final de titulación del programa de Magíster en Innovación y Diseño de la Escuela de Diseño de la Universidad Adolfo Ibáñez. Los autores quieren agradecer a Sebastián Oportus; Ivanna Sarpi, administradora del laboratorio de Obras Civiles de la Facultad de Ciencias de la Universidad Adolfo Ibáñez; y Felipe Vidal, administrador del laboratorio de fabricación de la escuela de diseño de la Universidad Adolfo Ibáñez.

Referencias

- Bârsan, A., Racz, S.-G., Breaz, R., & Crenganiş, M. Evaluation of the dimensional accuracy through 3D optical scanning in incremental sheet forming. *Materials Today: Proceedings*. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.175>
- Bhasker, R., & Kumar, Y. (2023). Process capabilities and future scope of Incremental Sheet Forming (ISF). *Material Today: Proceedings* 72, 1014-1019. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.120>
- Bowen, D., Russo, I., Cleaver, C., Allwood, J. & Loukaides, E. (2022). From art top art: Learning from the traditional smith in developing flexible sheet metal forming processes. *Journal of Material Processing Tech.* 299. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117337>
- Chadha, K., Dubor, A., Puigpinos, L. & Rafols, I. (2020). Space Filling Curves for Optimising Single Point Incremental Sheet Forming using Supervised Learning Algorithms. In L. Werner, D. Koering (Eds.), *Proceedins of the XXXVIII Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, eCAADe* (pp. 555-562). TU Berlín.
- Cui, Q., Suhas Pawar, S., He, M. & Yu, C. (2022). Forming Strategies for Robotic Incremental Sheet Forming. In J. van Amejide, N. Gardner, K. Hoon Hyun, D. Luo, U. Sheth (Eds.), *Proceedins of the XXVII International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, CAADRIA* (pp. 171-180). Sydney. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2022.2.171>.
- Emmens, W., Sebastiani, G. & van den Boogaard, A. (2010). The Technology review of Incremental Sheet Forming - A biref review of the history. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 981-997.
- Fratini, L., Ambrogio, G. Di Lorenzo, R., Filice, L. & Micari, F. (2004). Influence of mechanical properties of the sheet material on fomability in single point incremental forming. *CIRP Annals*, 53 (1), 207-210. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60680-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60680-5)
- Ingarao, G., Ambrogio, G., Gagliardi, F. & Di Lorenzo, R. (2012). A sustainability point of view on sheet metal forming operations: material wasting and energy

- consumption in incremental forming and stamping processes. *Journal of Cleaner Production*, 255-268. Doi: 10.1016/j.jclepro.2012.01.012
- Ingarao, G., Zaheer, O., Campanella, D. & Fratini, L. (2020). Re-forming end-of-life components through single point incremental forming. *Manufacturing Letters*, 24, 132-135. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2020.05.001>
- Kalo, A. & Newsum, M. J. (2014). An Investigation of Robotic Incremental Sheet Metal Forming as a Method for Prototyping Parametric Architectural Skins. In: W. McGee, M. Ponce de Leon. (Eds) *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-04663-1_3
- Lee, G. & Kim, S. (2012). Case Study of Mass Customization of Double-Curved Metal Façade Panels Using a New Hybrid Sheet Metal Forming Processing Technique. *Journal of Construction Engineering and Management* 138, (11), 1322-1330. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000551.
- Lublasser, E., Braumann, J., Goldbach, D. & Brell-Cockcan, S. (2016). Robotic forming: Rapidly generating 3D forms and structures through incremental forming. In S. Chien, S. Choo, M. A. Schnabel, W. Nakapan, M. J. Kim, S. Roudavski (Eds.), *Proceedings of the XXI International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, CAADRIA* (pp. 539-548). Melbourne. <https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2016.539>.
- Nicholas, P., Stasiuk, D., Nørgaard, E., Hutchinson, C. & Ramsgaard, M. (2016). An integrated Modelling and Toolpathing approach for a Frameless Stressed Skin Structure, fabricated using Robotic Incremental Sheet Forming. In: D. Reinhardt, R. Saunders, J. Burry. (Eds) *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26378-6_5
- Nicholas, P., Chiujdea, R., Sonne, K. & Scaffidi, A. (2021) Design and Fabrication Methodologies for Repurposing End of Life Metal via Robotic Incremental Sheet Metal forming. In V. Stojakovic, B. Tepavcevic. (Eds.), *Proceedings of the XXXIX Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, eCAADe* (pp. 171-180). University of Novi Sad, Serbia.
- Oraon, M., Mandal, S. & Sharma, V. (2020). Investigation into the process parameter of single point incremental forming (SPIF). *Material Today: Proceedings* 33, 5218-5221. <http://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.922>
- Panus, P. (2023). *Digital Ornaments: The Crossover of Digital Technology & Contemporary Ornamentation*. TU Delft.
- Ren, H., Xie, J., Liao, S., Leem, D., Ehmann, K. & Cao, J. (2019). In-situ springback compensation in incremental sheet forming. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 68, 317-320.
- Sousa, J. & Malé-Aleman, M. (2005). On Ornamentation: A Digital Perspective. DOI: 10.13140/RG.2.1.3231.7281.
- Tiwari, P., Rathore, A. & Bodkhe, M. (2022). Factors affecting the deep drawing process – A review. *Materials Today: Proceedings* 56 (5), 2902-2908. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.189>