

## Máquina CNC de 7 ejes para cortar poliestireno expandido (EPS) obteniendo superficies de doble curvatura en una sola pasada.

7-axis CNC machine to cut expanded polystyrene (EPS) for obtaining double-curved surfaces in a single pass.

**Francisco Javier Quitral Zapata**

Universidad Técnica Federico Santa María, Chile  
francisco.quitral@usm.cl

**Luis Felipe González Böhme**

Universidad Técnica Federico Santa María, Chile  
luisfelipe.gonzalez@usm.cl

### Abstract

We present a novel CAD/CAM apparatus and method for single-pass cutting of double-curved expanded polystyrene formworks. A rationalization approach was implemented using generic solvers in a popular free visual programming environment integrated into a well-known commercial CAD software, which allows finding elastica curve sections for processing double-curved NURBS surfaces. This procedure allows us to convert bending curves geometry into G-code coordinates for numerically controlling a flexible cutting hot-blade. A prototype 7-axis machine was experimentally validated in a series of cutting processes of EPS formworks to build a double-curved concrete pony wall.

**Keywords:** Hot-blade cutting, Double-curved surfaces, Single-pass cutting, Expanded polystyrene formworks, Computer-aided manufacturing

### Introducción

Un sistema de encofrado está compuesto por dos dispositivos complementarios: un molde y un aparato de soporte. El molde es el contenedor cuya forma interior será adoptada por la masa de hormigón luego de ser vertida en el molde y endurecer progresivamente dentro del mismo. El aparato de soporte es la estructura que permite fijar la posición del molde en el espacio tridimensional, resistiendo las solicitaciones que el hormigón ejerce sobre el molde al momento de ser vertido y mientras endurece consistentemente dentro del molde. Se pueden distinguir dos clases de sistema de encofrado según su modo de instalación y propósito primario: transitorio, para moldear en obra elementos en su posición definitiva y estacionario, para moldear en fábrica elementos prefabricados. Igualmente, se pueden distinguir dos clases de sistema de encofrado según la extensión de su vida útil: perdidos y recuperables. Un sistema de encofrado transitorio y recuperable generalmente integra un aparato de soporte variable con componentes que se pueden posicionar, orientar, desplazar, extender, conectar, fijar y sujetar de distinta manera regulada, es decir, modulada, con el fin de obtener una pluralidad de configuraciones espaciales, facilitar el desmolde de una sola vez o por partes y ser reutilizados en obras distintas. Convencionalmente, estos sistemas traen incorporados moldes rígidos planos, como planchas metálicas o tableros contrachapados fenólicos, cuyas dimensiones y dispositivos de unión están coordinados modularmente con los del aparato de soporte. En esta clase se pueden distinguir más tipos como, por ejemplo, el sistema de encofrado industrializado, auto-trepante y deslizante. Estos tipos son más eficientes cuando el edificio se puede constituir a partir de los módulos de encofrado, es decir, para diseños no complejos, preferentemente normados y con formas

compuestas por superficies planas. Un sistema de encofrado industrializado vertical permite un avance promedio de la obra gruesa de 3 pisos/mes, un sistema de encofrado auto-trepante permite un avance en obra de 6 pisos/mes y un sistema deslizante puede llegar hasta 8 pisos/mes (**Besomi, 2009; Ruano, 2010**). No obstante estos valores son aproximados y dependen de múltiples factores específicos de cada obra, sirven para ilustrar la rapidez de montaje y recuperación de estos sistemas respecto de los tradicionales o artesanales. Los sistemas de encofrado recuperable han penetrado recientemente el mercado Chileno de manera masiva. Sin embargo, cuando se trata de moldear en obra elementos de hormigón de superficie curvada, aún se construyen artesanalmente cimbras perdidas, con tablas rectas y tableros planos de madera (**Pedreschi, 2008**), del mismo modo que Félix Candela lo hacía 50 años atrás. Esta tarea requiere mano de obra cualificada, con conocimientos de geometría suficientes para construir los moldes y aparatos de soporte requeridos por el diseño. Sólo en casos excepcionales y para obras de gran escala, se emplea el mecanizado por control numérico computacional (CNC) de tableros contrachapados o aglomerados. Esto permite fabricar piezas diseñadas ad hoc, mediante entramados reticulares que aproximan las superficies curvas utilizando elementos laminares. Esta tarea requiere de un extenso proceso de diseño y fabricación asistida por computador (CAD/CAM) para la modelación geométrica de cada una de las piezas y calces del molde de encofrado, que resultan redundantes y poco eficientes al constituir grandes volúmenes a partir de elementos laminares (**Figura 1**), utilizados generalmente para un único vaciado. Ninguno de estos sistemas constructivos proporciona una opción rentable para la obra, los proyectos de este tipo requieren plazos y presupuestos exorbitantes para su ejecución (**Verhaegh, 2010**).



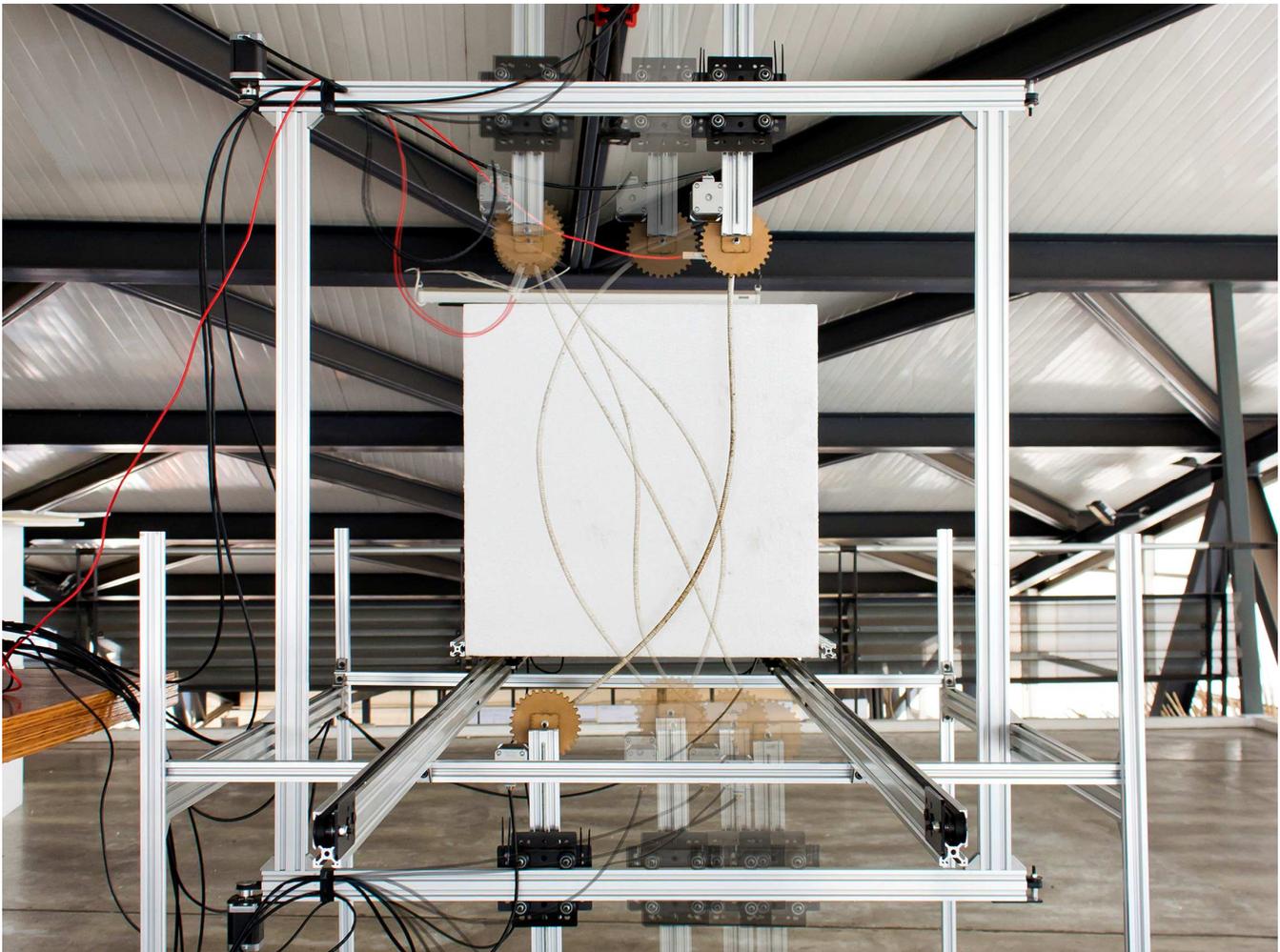
**Figura 1:** Unidades de encofrado 3D producidas mediante CNC a partir de 60.000 m<sup>2</sup> de aglomerado para el Museo del Mañana, diseñado por Santiago Calatrava. Instalación CNC de trabajo en madera, PERI Brasil (PERI, 2017a).

La dificultad inherente que suponía la fabricación del encofrado en la historia temprana del hormigón armado, aún hoy no ha sido superada (Soler, 2013). En cuanto nos alejamos de la geometría plana y de las superficies regladas, el encofrado todavía implica la parte más laboriosa del

proceso de edificación, a pesar de las tecnologías actuales. En consecuencia, se hace preciso innovar en el proceso de producción de moldes para la conformación de estructuras de hormigón en geometría compleja. Con esta premisa, se llevó a cabo una memoria de título (Quitral, 2014) y luego un proyecto de investigación aplicada y desarrollo experimental, que comprometieron el diseño, integración, programación y puesta en marcha de un aparato y método CAD/CAM/CNC de corte de poliestireno expandido (Figura 2) aplicado en prototipos de moldes con doble curvatura.

## Moldes de poliestireno expandido

El poliestireno expandido (EPS, abreviatura del inglés *Expanded Polystyrene*) es un material plástico, de estructura celular cerrada y rellena de aire, sintetizado por primera vez a nivel industrial en el año 1930, pero fue a principio de los años 50, cuando la empresa BASF® desarrolló e inició la producción del nuevo producto bajo la marca Styropor®. La característica más conocida del EPS, es su excelente capacidad de aislamiento térmico, la mayoría de sus aplicaciones se relacionan con esta propiedad. Esto se debe a la propia estructura del material, que consiste principalmente de aire atrapado dentro de una disposición celular conformada

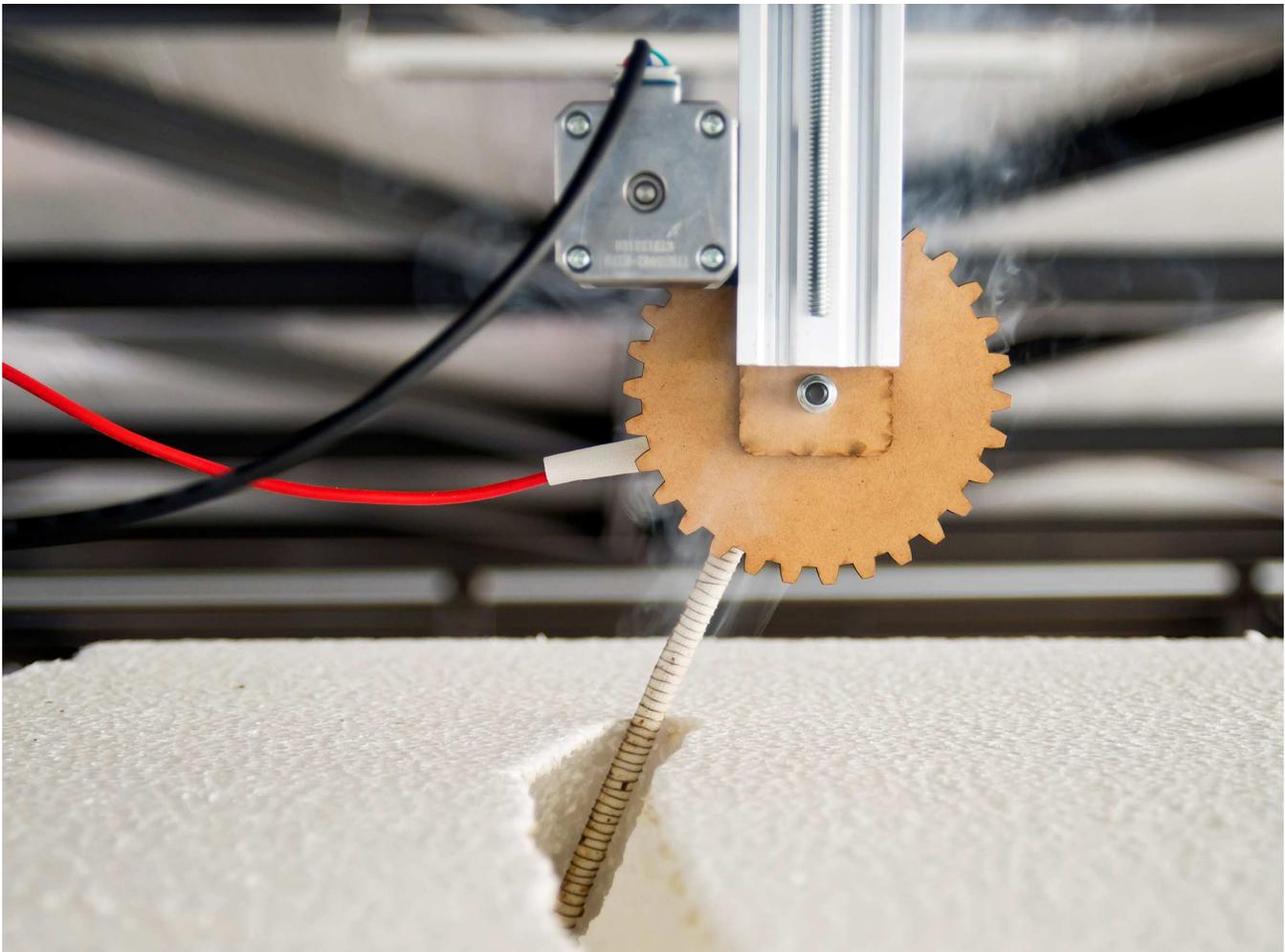


**Figura 2:** Primer prototipo de máquina CNC de 7 ejes para cortar poliestireno expandido (EPS) obteniendo superficies de doble curvatura en una sola pasada, Departamento de Arquitectura, UTFSM, 2015.

por el poliestireno. El EPS es un material 100% reciclable, extremadamente liviano y por lo tanto fácil de transportar, que tiene tan solo un 2% de materia prima respecto a su volumen final, siendo el 98% restante aire. Las cualidades del EPS, en su amplia gama de aplicaciones y formatos, lo convierten en un material muy utilizado en el ámbito de la arquitectura y la construcción. Paneles de aislamiento térmico y acústico, elementos decorativos, casetones y bovedillas para forjados, juntas de dilatación, soluciones de disminución de carga y conformado de diversas estructuras, así como para aligerar obras de ingeniería civil. Actualmente, para la manufactura de productos elaborados con EPS, se utilizan principalmente 3 métodos: moldeo, mecanizado y corte por hilo caliente (**BASF, 1998**). El primero, empleado principalmente en la industria del embalaje, requiere la fabricación previa de un molde rígido o matriz que permita multiplicar los objetos a producir, lo que encarece e imposibilita la obtención en masa de componentes individualmente diferenciados. El segundo, consiste en la generación de geometrías por medio de la sustracción de material empleando una fresa que se desplaza en una o más orientaciones en el espacio tridimensional. Este proceso permite la obtención de formas libres, como superficies de doble curvatura, pero convirtiendo el material sustraído en

cantidad excesiva de partículas en suspensión. El tercero, corresponde al método tradicional de laminado de planchas, un proceso rápido y limpio, que reduce los tiempos y costos de fabricación de piezas hechas de EPS, no genera desgrane ni polvo en suspensión. Sin embargo, este método está limitado en las posibilidades geométricas de fabricación, ya que solo permite la generación de superficies regladas (**Flöry and Pottmann, 2010**).

Existe evidencia del uso de moldes de EPS mecanizado para obras de geometría compleja como el proyecto de Frank Gehry del nuevo Zollhof en Düsseldorf, cuyos paneles portantes ondulados de hormigón armado fueron fabricados en base a bloques de EPS, modelados con CATIA® y fresados por CNC para producir 355 moldes curvados diferentes (**Kolarevic, 2004; PERI, 2017b**). También, en la superficie ondulante de concreto del puente Spencer Dock en Dublin, de los arquitectos de Amanda Levete, cuyo diseño, fresado, revestimiento e instalación de las piezas de EPS tardó sólo 6 meses (**Lavery, 2013; Nedcam, 2017**). A pesar de estos y muchos otros ejemplos significativos, este sistema constructivo aún no se ha convertido en una solución ampliamente difundida o masivamente disponible en el



**Figura 3:** Corte de un prototipo de molde de EPS en doble curvatura a través de un cuchillo caliente flexible CNC en 7 ejes, Departamento de Arquitectura, UTFSM, 2015.

comercio. Un conjunto de bloques de EPS que han sido mecanizados con la forma deseada y ensamblados en obra, ofrecen un recurso de alta tecnología para el desafío de moldear formas libres en hormigón. Sin embargo, las operaciones de mecanizado de una pieza comprenden la eliminación del material que la constituye, ya sea por arranque de viruta o por abrasión, con una herramienta pequeña en comparación con la pieza de trabajo. Una fresa para desbaste cubre una superficie, en orden de magnitud, de unidades de centímetros cuadrados [cm<sup>2</sup>], mientras que las superficies de las piezas que conforman los moldes, alcanzan las decenas, cientos o miles de metros cuadrados [m<sup>2</sup>]; prescindiendo de la gran cantidad de volumen a remover, el material convertido en partículas resultante del desbaste es de difícil contención y recolección. Así el proceso de mecanizado resulta en extensas rutinas, lo que no presume un problema a priori para una máquina fresadora CNC de 3 o más ejes, pero sí supone una gran demanda de tiempo para los plazos de ejecución de una obra arquitectónica o civil, del orden de días o meses para producir tales volúmenes de moldes.

Desde el inicio de la producción del EPS a nivel industrial hasta la actualidad, el método de corte por calor sigue siendo utilizado por su rapidez y eficiencia (Megaplot, 2009). Existen múltiples aparatos, tanto manuales como automatizados o una combinación de ambos, que permiten esculpir este material. La mayor parte de estos dispositivos disponibles comercialmente tienen un factor en común: sólo se pueden obtener volúmenes compuestos por superficies regladas con concavidad simple, condición de borde implícita en el hilo caliente tensado de corte, analizado como segmento de recta

(Brooks & Aitchison, 2010). Para poder conformar superficies de doble curvatura o concavidad, es necesario utilizar otro tipo de herramientas calientes que vaporicen el EPS.

A partir del desarrollo de los sistemas de Prototipado Rápido y fabricación por corte y laminado (LOM, *Laminated object manufacturing*), Broek et al. (1998) fueron los primeros en proponer la *Free-form thick layer object manufacturing (FF-TTLOM)*, que consiste en la obtención de objetos de forma libre a partir de múltiples capas de EPS. El principio de funcionamiento consiste en analizar un modelo CAD y descomponerlo en capas; una placa plana de material con un grosor máximo de 100 [mm] y un perímetro compuesto de una superficie libre continua. Esta superficie de forma libre se puede cortar utilizando una cuchilla flexible calentada (De Smit et al., 2000), controlada por una máquina con un gran número de grados de libertad (Horváth et al., 1998). La herramienta de corte se aplica en el plano curvado que se mantiene perpendicular a la superficie frontal de la capa. La cuchilla de corte es sostenida en ambos extremos y la forma curvada es controlada durante el corte mediante soportes giratorios (Broek et al., 2002). Basados en este concepto aplicado al Prototipado Rápido de modelos a escala, diseñamos un cuchillo caliente flexible CNC que permite seccionar volúmenes de EPS con superficies de doble curvatura en una sola pasada (Figura 3) en bloques de grandes dimensiones.

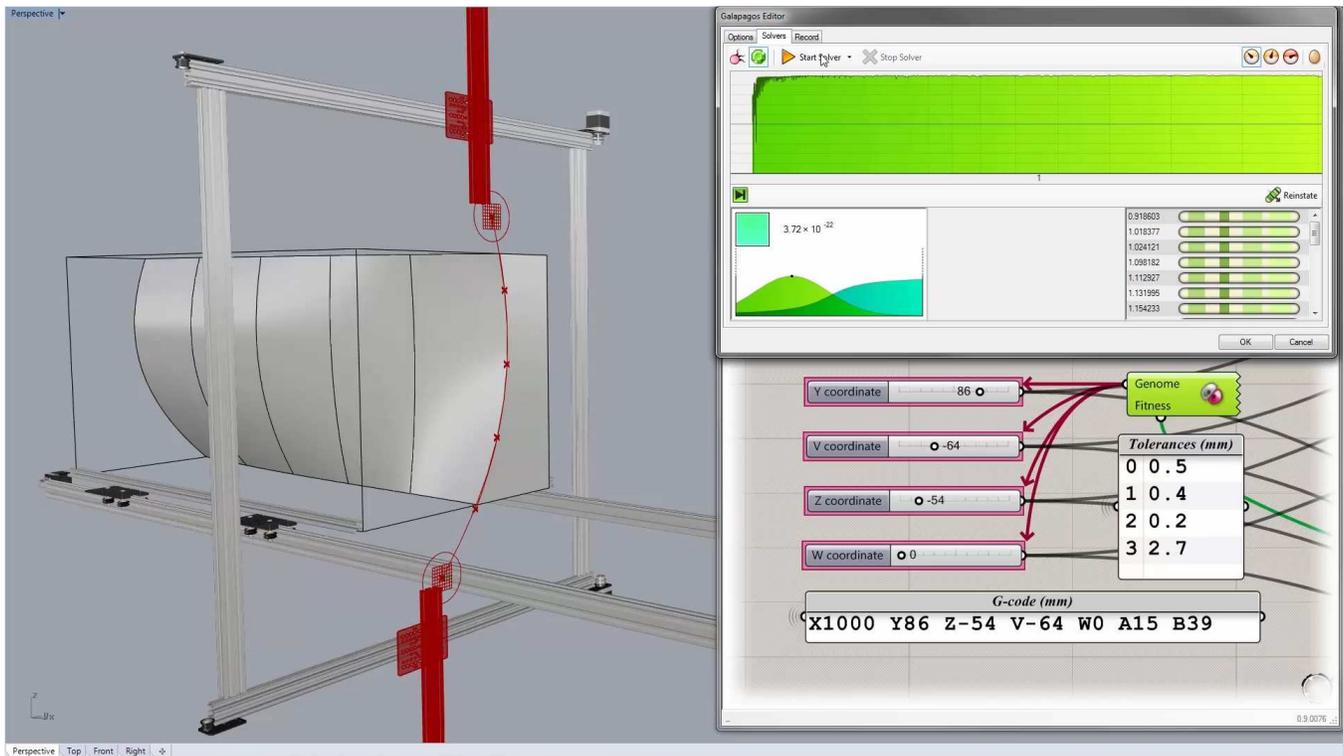


Figura 4: Computación de la curva elástica mediante un *annealing solver* y conversión a coordenadas para código de máquina. Algoritmo desarrollado en el entorno de programación visual Grasshopper® e integrado con el modelo CAD en Rhinoceros®.

## Aparato y método Flex 7D

Durante esta investigación, se desarrolló un método que racionaliza las superficies *NURBS* de doble curvatura del modelo tridimensional en una serie de secciones compuesta por curvas elásticas. Utilizando los *generic solvers* del complemento Galapagos de Grasshopper® (Rutten, 2013), el algoritmo busca la curva elástica en base a las siguientes condiciones de borde y procedimientos: (i) calcular la forma de la curva elástica teórica del cuchillo flexible mediante un sistema *particle-spring* (Kilian & Ochsendorf, 2005); (ii) minimizar el valor de aptitud promedio de las tolerancias entre la curva elástica (Euler, 1744; Levien, 2008) teórica y la curva de diseño objetivo; (iii) restringir el dominio de las coordenadas de cada uno de los 7 ejes respecto del espacio de trabajo; finalmente, (iv) convertir las coordenadas espaciales de los extremos de la geometría curvada en lenguaje de máquina (código G), que permite flexionar el cuchillo caliente (Figura 4). Secciones representativas de la superficie de doble curvatura son procesadas, a posteriori durante el proceso de corte, la interpolación lineal de los movimientos independientes de cada uno de los 7 ejes, permite reconstituir la forma de la superficie en su totalidad.

El aparato –patente pendiente (González et al., 2015)– fue ensamblado físicamente utilizando el sistema modular de perfiles de aluminio V-Slot®. Comprende una estructura cartesiana de guías lineales, que admite desplazar pares de placas dispuestas sobre patines que permiten sostener y fijar un bloque de EPS para ser cortado; el bloque de material apoyado sobre las placas, es desplazado por un par de correas y poleas sincrónicas, que son accionadas por un par de motores paso a paso, que se activan simultáneamente; donde el bloque de material en su desplazamiento, enfrenta un marco rectangular que está dispuesto perpendicularmente a la trayectoria del desplazamiento del bloque, dicho marco rectangular tiene una posición fija y dispone de una cuchilla flexible que está recubierta de una funda de aislación térmica y eléctrica, alrededor de la cual se enrolla en hélice un alambre térmico resistivo, por donde se hace circular una corriente eléctrica que calienta el alambre térmico resistivo y vaporiza la zona previa al contacto físico con el material durante el desplazamiento del bloque a cortar (Figura 3). El aparato utiliza un sistema de control numérico programado en la placa computadora Arduino® que sincroniza el movimiento de 7 grados de libertad, mediante controladores y motores paso a paso; seis correspondientes al control de la curva del cuchillo, dos pares de articulaciones deslizantes y dos pares de articulaciones angulares, un par por cada extremo del cuchillo flexible; y finalmente una articulación deslizante que desplaza la pieza de trabajo a través del cuchillo caliente.

## Resultados experimentales

La investigación permitió desarrollar a nivel de software, modelos 3D paramétricos de la geometría de diseño en doble curvatura y el cálculo de trayectorias de herramienta totalmente asociativos para el corte curvado en una sola pasada. A nivel de hardware, desarrollamos una herramienta de control numérico computacional de la posición y orientación de los extremos de un cuchillo caliente flexible con 7 ejes de

movimiento, tres en cada extremo del cuchillo (1 rotacional y 2 traslacionales) y uno traslacional respecto de la pieza de trabajo. El prototipo de máquina permitió validar una prueba de concepto a nivel manufactura; un muro antepecho de forma libre, vaciado en hormigón de 1,5 [m] lineal de largo, 1 [m] de alto y un espesor variable de 10-14 [cm], conformado por 3 bloques de EPS de 0,5x0,5x1 [m], seccionados con las respectivas superficies de doble curvatura, confinados en un sistema de encofrado tradicional, hecho con madera aserrada y tableros contrachapados (Figura 5). Nuestro prototipo de máquina demostró teóricamente una disminución en tiempo de al menos un 17%, en una comparación desfavorable con el mecanizado CNC de 3 ejes. Con un avance de corte lineal de 20 [cm/min], nuestro prototipo entrega una pieza de trabajo terminada de 1 [m] lineal, lista para ser revestida con desmoldante y montada en el encofrado en un tiempo de 5 [min]. Además, este proceso de corte no genera desgrane ni polvo en suspensión, los excedentes son secciones de tamaño manipulable, lo que permite que puedan ser fácilmente reutilizados.



Figura 5: Encofrado tradicional y moldes de EPS con superficies de doble curvatura seccionados con cuchillo caliente flexible CNC en 7 ejes, Departamento de Arquitectura, UTFSM, 2015.

## Conclusiones

El método y aparato validado a nivel experimental en esta investigación resulta eficiente en el uso volumétrico del material minimizando las pérdidas y realiza cortes de alta dificultad en menor tiempo en relación a las soluciones disponibles en el mercado. El prototipo ofrece algunas ventajas competitivas que podrían introducirse en la industria de la construcción a través de una solución con mayor desarrollo, por ejemplo, automatizar la manufactura de moldes de EPS; reducir los tiempos y costos de producción en moldes para estructuras de hormigón de geometría compleja; añadir valor y ampliar la gama de aplicaciones del EPS o similar. La exactitud y repetibilidad del aparato fue evaluada empíricamente, al tratarse de prototipos a nivel de laboratorio que exploraban una prueba de concepto se verificó la precisión de la manufactura, aunque la calidad superficial del corte debe ser mejorada.

Una búsqueda del estado del arte muestra al menos dos nuevos desarrollos de dispositivos similares de corte, ambos utilizando un cuchillo caliente flexible controlado por 2 ó 3 robots manipuladores industriales, con un total de 12 (Rust et

al., 2016) y 18 (Søndergaard et al., 2016) ejes o grados de libertad, respectivamente. Lo que por un lado da validez y vigencia a nuestra investigación y por otro sugiere orientar nuestro trabajo futuro hacia los robots industriales, oportunidad que permitiría acercar más nuestro desarrollo a la industria de la construcción.

## Agradecimientos

Parte de esta investigación identificada con el código FONDEF VIU14E063, fue financiada por el Fondo de Fomento del Desarrollo Científico y Tecnológico, administrado por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (CONICYT) entre 2015 y 2016. Para obtener más información, por favor visite: <https://youtu.be/cB1kPgyjY>

Queremos agradecer especialmente a Gonzalo Barrientos y Eduardo Valenzuela por su colaboración y a María Cirano por el registro fotográfico del proyecto.

## Referencias

- BASF, (1998). "Informaciones Técnicas Styropor". Ludwigshafen, Alemania.
- Besomi Molina, M. (2009). Comparación Técnica y Económica entre Moldajes Auto Trepantes y Otros Tipos de Moldajes Especializados para su uso en Construcción de Edificios.
- Broek, J. J., Horváth, I., de Smit, A., & Vergeest, J. S. M. (1998). A survey of the state of art in thick layered manufacturing of large objects and the presentation of a newly developed system. In Proceedings of the First International Seminar and Workshop on Engineering Design in Integrated Product Development EDIProD'98 (pp. 8-10).
- Broek, J. J., Horváth, I., de Smit, B., Lennings, A. F., Rusák, Z., & Vergeest, J. S. (2002). Free-form thick layer object manufacturing technology for large-sized physical models. *Automation in Construction*, 11(3), 335-347.
- Brooks, H., & Aitchison, D. (2010). A review of state-of-the-art large-sized foam cutting rapid prototyping and manufacturing technologies. *Rapid Prototyping Journal*, 16(5), 318-327.
- De Smit, A., Broek, J. J., Medland, A. J., & Horváth, I. (2000). Comparative analysis and experimental verification of the computed shape of a flexible blade tool for FF-TLOM. In Submitted to ASME Design Engineering Technical Conference.
- Euler, L 1744, Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes; Additamentum I: de curvis elasticis.
- Flöry, S., & Pottmann, H. (2010). Ruled surfaces for rationalization and design in architecture. *LIFE in: formation. On responsive information and variations in architecture*, 103-109.
- González, L.F., Quitral, F., Auat, F., Patente de Invención, Aparato para cortar volúmenes de espuma de poliestireno expandido o similar obteniendo superficies de doble curvatura, que comprende [...], CHILE, No. Solicitud: 201500674, Fecha Solicitud: 18/03/2015, Fecha Publicación: 26/06/2015, Clasificaciones IPC: B23Q15/00
- Horváth, I., Vergeest, J. S., Broek, J. J., Rusak, Z., & de Smit, B. (1998). Tool profile and tool path calculation for free-form thick-layered fabrication. *Computer-aided design*, 30(14), 1097-1110.
- Kilian, A., & Ochsendorf, J. (2005). Particle-spring systems for structural form finding. *Journal-international association for shell and spatial structures*, 148(77), 30.
- Kolarevic, B. (Ed.). (2004). *Architecture in the digital age: design and manufacturing*. Taylor & Francis.
- Lavery, C. (2013). Spencer Dock Bridge. *Concrete International*, 35(6), 28-31.
- Levien, R. (2008). *The elastica: a mathematical history*. University of California, Berkeley, Technical Report No. UCB/EECS-2008-103.
- MEGAPLOT, (2009). *Megaplot foam cutters catalog*. 2009 ed.
- Nedcam (2017a). Spencer Dock Bridge Dublin <https://nedcam.com/spencer-dock-bridge-dublin.htm> [Accessed 15 Jul. 2017].
- Pedreschi, R. (2008). Form, force and structure: a brief history. *Architectural Design*, 78(2), 12-19.
- PERI (2017a). Museum of Tomorrow - PERI Group. [image] <https://www.peri.com/en/projects/cultural-buildings/museum-of-tomorrow.html> [Accessed 15 Jul. 2017].
- PERI (2017b). Der Neue Zollhof - PERI Group. <https://www.peri.com/en/projects/housing-and-multi-storey/der-neue-zollhof.html> [Accessed 15 Jul. 2017].
- Quitral, F. (2014). "Aparato y método CAD/CAM de corte de poliestireno expandido para componentes arquitectónicos de geometría compleja" (Memoria de título). Departamento de Arquitectura, Universidad Técnica Federico Santa María.
- Ruano Peña, D. V. (2010). Análisis de los plazos de construcción de edificios en Chile y su relación con los métodos constructivos utilizados.
- Rust, R., Gramazio, F., & Kohler, M. (2016). Force Adaptive Hot-Wire Cutting. In *Advances in architectural geometry 2016*. vdf Hochschulverlag AG
- Rutten, D. (2013). Galapagos: On the logic and limitations of generic solvers. *Architectural Design*, 83(2), 132-135.
- Soler, J. (2013). Form-Finding y fabricación digital en Hormigón Armado. TFM, Master de Tecnología en la Arquitectura, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Søndergaard, A., Feringa, J., Nørbjerg, T., Steenstrup, K., Brander, D., Graversen, J., ... & Clausen, K. (2016). Robotic hot-blade cutting. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (pp. 150-164). Springer International Publishing.
- Verhaegh, R. R. (2010). Free forms in concrete: the fabrication of free-form concrete segments using fabric formwork.