

# Composiciones Plegadas. Propiedades espaciales y materiales (envolventes y componentes)

Folded Compositions. Spatial Properties and Materials (enclosures and components)

## Mauro Chiarella

Universidad Nacional del Litoral, Argentina  
Proyecto FONDECYT 3110025 (UBB, Chile)  
chiarell@fadu.unl.edu.ar

## Rodrigo García Alvarado

FACyD-Universidad del Bío Bío, Chile  
rgarcia@pegasus.dci.ubiobio.cl

### ABSTRACT

The folded compositions in architecture enable creatively rethink the methods and instruments of ideation and manufacturing. Displace conventional architectural graphic (Descriptive Geometry and Perspective) of autonomy and historical determinism that has characterized (obsessive stylistic control of the design object and spatial structure inherited under the canons of classical geometry). The material expression of these settings provides an important link between: the formal conceptualization, the digital geometric operation, its manufacturing and responsive review, similar to the design process used. At the same time reveals limitations of scale, materiality and design limitations, which condition the models implemented.

**KEYWORDS:** Compositions Fold. Parametric Design. Digital Fabrication.

### Introducción

El desarrollo bidimensional de configuraciones tridimensionales posibilita, en arquitectura, repensar con creatividad métodos e instrumentos de ideación espacial y fabricación material. Desplazándonos de la autonomía y cierto determinismo histórico de las acciones gráficas, que ha estado durante años orientada a un control casi estilístico del objeto diseñado y estructurada mayormente bajo los cánones heredados de la Geometría Descriptiva y Perspectiva. La proyección bidimensional continua y dinámica de una situación espacial tridimensional otorga una relación geométrica entre la configuración superficial y volumétrica de los proyectos, permitiendo una vinculación matemática y operativa entre condiciones productivas y perceptuales. La expresión material de estas configuraciones revela la capacidad de controlar los procesos de fabricación y revisar físicamente su desarrollo espacial. Si bien esta acción también revela limitaciones de magnitud, materialidad y restricciones constructivas que condicionan los modelos ejecutados, establece una importante vinculación entre la conceptualización formal, la operación geométrica digital, su elaboración material y revisión sensible, de manera análoga al proceso de diseño utilizado.

### Composiciones Plegadas

Las composiciones plegadas pueden definirse a partir de su acción material, como la variación de una superficie flexible (según la RAE), que en arquitectura puede tener una aplicación muy específica en cobertores temporales, pero también posibilidades más amplias en la concepción espacial y material. A pesar del contrasentido con la magnitud y naturaleza estable de las obras arquitectónicas, que exigen construir con elementos rígidos mayores, las composiciones plegadas pueden participar en la ideación de configuraciones (Chiarella, 2006), y crecientemente en la ejecución de algunos componentes o edificaciones complejas aprovechando nuevos materiales y sistemas constructivos, como se ha demostrado en las obras y actividades realizadas. De modo que las composiciones plegadas en arquitectura se pueden entender primeramente como un mecanismo de formulación proyectual, y también progresivamente, como una implementación constructiva. Aunque se distinguen por su carácter de evolución formal, de transformación entre una superficie a un volumen con condiciones espaciales. Esta naturaleza de complejidad geométrica condiciona su aplicación, pero también expresa su potencialidad creativa. Las composiciones

plegadas poseen condiciones geométricas de desarrollo superficial, dinámica de planos y aristas, modulación, recursividad, curvatura, etc., que han sido, reconocidas en algunos elementos de la naturaleza y experimentadas ampliamente en materiales de pequeña escala y algunos materiales de mayor magnitud (como las construcciones tensadas), parcialmente implementadas en programación computacional y fabricación digital. Con algunas capacidades técnicas específicas (incremento de las resistencias superficiales por el plegado, aumento de la resonancia acústica y dispersión lumínica). Pero sin un reconocimiento definido de sus condiciones espaciales y materiales para el trabajo arquitectónico extensivo.

## Propiedades Espaciales

Las composiciones plegadas disponen en general de cuatro condiciones espaciales relevantes;

A) La configuración de un volumen global, definido por sus dimensiones mayores, como también por un perfil, que es variable desde los distintos puntos de vista. Por lo que al contrario de las composiciones geométricas regulares, su lectura perceptual difícilmente permite deducir su conformación o magnitud precisa, estableciendo un reconocimiento masivo y objetual del volumen.

B) La articulación de sus superficies, con un trazado irregular de sus caras y vértices (es decir con ángulos distintos), o en las curvas en las composiciones onduladas. Desarrollando cierta modulación o fragmentación de las superficies con características parcialmente regulares o azarosas. Con cierta similitud de dimensiones y condiciones superficiales entre los planos, pero con una heterogeneidad geométrica.

C) Un sentido parcial o total de contención, producto de la concavidad irregular de algunas superficies, con partes convexas que otorgan proyección, generando una percepción espacial variable, ocasionalmente distinguida como interior y exterior según la magnitud de la convexidad. Al contrario de las geometrías regulares que otorgan claramente una proyección exterior o interior, es decir con una clara definición de los mismos.

D) Un reconocimiento continuo de las superficies, matizado por las texturas, iluminación, hendiduras, tratamiento o composición material. Pero al mantener alguna similitud, en especial, el patrón diferenciado según las caras, otorga una comprensión global de su configuración. A pesar de diferencias de proximidad, geometría, sombreados o aberturas, esta extensión tectónica es fundamental para su caracterización espacial.

Estas propiedades espaciales revelan una diversidad y amplio potencial creativo para arquitectura, como lo demuestran las experiencias pedagógicas y obras incipientes. Mientras las composiciones regulares poseen propiedades espaciales más cabalmente estructuradas (en familias de formas, reglas de relación, homogeneidad perceptual, etc) que han sustentado el desarrollo constructivo, las composiciones plegadas poseen propiedades variables que promueven una espacialidad diversa y significativa, aunque requieren avanzar en su definición y operatividad para otorgarle una mayor aplicación. En particular de sus condiciones materiales para el desarrollo en obras arquitectónicas.

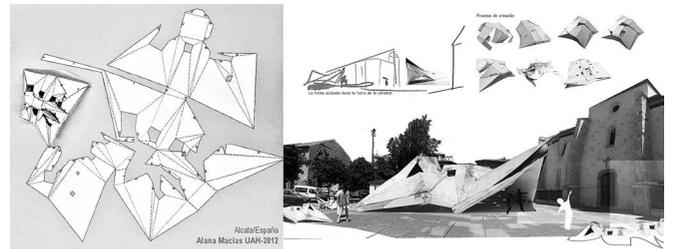


Figura 1. Curso "Modelar la Arquitectura: Maquetas, Modelos Digitales y Composiciones Plegadas". Escuela Técnica Superior de Arquitectura y Geodesia. Universidad de Alcalá. Alcalá de Henares. España. Julio 2012 (Profesores: F. Celis,

M. Chiarella, M. de Miguel, F. Martín y A. Moreno)

## Propiedades Materiales

Por la complejidad de las composiciones plegadas, estas se han desarrollado fundamentalmente en experimentaciones de pequeño formato, cuyas características formales (dimensiones y ángulos de doblado) son dependientes del material correspondiente, normalmente papel. Como en el trabajo arquitectónico se produce un relevante cambio de magnitud entre la ideación y la ejecución constructiva, y por ende de materiales utilizables, esta diferencia es una dificultad relevante para la concreción constructiva de composiciones plegadas. De hecho, se considera que las propiedades de ejecución material son las determinantes en la definición de la forma. En este sentido es sustancial caracterizar las condiciones físicas que permitan desarrollar la formulación, con posibilidades de ejecución en dimensiones arquitectónicas. Las propiedades materiales de las composiciones plegadas se pueden diferenciar primeramente entre los vértices (los dobleces o curvaturas de los planos) y las caras, y luego según su desarrollo.

A) En los vértices comparecen fundamentalmente dos condiciones; de configuración en relación a las caras, es decir continuidad o modificación de materiales con respecto a los planos contiguos (a veces agregando nuevos componentes), como de movilidad entre las caras si mantienen un grado de articulación. En las

conformaciones curvas se mantiene una continuidad material con ciertos tramos de inflexión con radios menores, en que comparecen las condiciones de vértices.

B) En las caras se reconocen las propiedades del paramento en si mismo, que puede ser similar entre todas las caras, combinado o diferenciado entre algunas. Estas características materiales, que dependen de la composición, dimensiones y ejecución, y pueden distinguirse como capacidades de transmitancia (térmica, acústica, luminosa, visual), resistencia (comprensión, tracción, flexión), de apariencia (color, textura, etc) y durabilidad (vinculadas a las condiciones materiales, de contexto y tiempo de uso).

C) En el desarrollo de la composición plegada, comparece especialmente la apariencia y resistencia a la tensión de las caras y de los vértices (ya sea en continuidad o elementos agregados). Especialmente relevantes son las modificaciones de resistencia por los vértices o curvaturas, que puede incrementar sus capacidades estructurales o reducirlas, incluso desgastarse en el tiempo o por movilidad. De manera similar, la condición resistente del plano depende de la magnitud geométrica (de la distancia transversal entre los vértices), que puede producir flexiones parciales que modifican la conformación, o compensarse con elaboraciones volumétricas menores modulares. Así mismo, la exposición al entorno o disposición respecto a su ocupación puede otorgar distintas características de durabilidad, iluminación, transparencia, etc.

Esta caracterización material revela una variedad sustancial de factibilidad según los elementos utilizados y su conformación formal en distintas magnitudes. Por lo que es sustancial una experimentación progresiva de aplicaciones específicas, que vinculen la ideación y ejecución constructiva.

## Geometrías Paramétricas y Fabricación Digital

La incorporación estratégica del cálculo matemático en las definiciones espaciales y geométricas basadas en el Modelado Paramétrico, ha sido determinante para la configuración espacial y morfológica de los proyectos arquitectónicos experimentales contemporáneos. Una manipulación geométrica generalizada de superficies NURBS, polisuperficies isomórficas, hipersuperficies, algoritmos genéticos, han concentrado los esfuerzos ya no solo por concebir y controlar estas espacialidades sino por avanzar sobre una construcción coherente y con criterios racionalizados de las mismas. La ancestral inercia de la materia arquitectónica y la incapacidad de los materiales tradicionalmente empleados en construcción para asumir y manifestar las exigencias que plantean estas búsquedas espaciales, aparece como uno de los desafíos de la convivencia de estas tecnologías de simulación e ideación post-mecánicas

con las tecnologías constructivas industriales y pre-industriales heredadas. Es así como las nuevas producciones arquitectónicas se enfrentan al desafío de acompañar la complejidad de estos proyectos, integrando técnicas y procedimientos de fabricación digital CAD/CAM para evitar que lo complejo sea solo la geometría resultante y no la ejecución de la misma. Las tecnologías de fabricación digital se clasifican según los procedimientos empleados sobre las propiedades físicas y/o químicas de los materiales utilizados: Procedimientos Generativos; Substractivos; Transformativos y de Unión de Componentes. El diseño paramétrico y la fabricación digital han demostrado su potencialidad a través de la vinculación estratégica que permiten entre la conceptualización formal, la operación geométrica digital y su elaboración material.

## Estrategias de Abordaje

Con el objetivo de estudiar el plegado de diferentes materiales convencionales encontrados en el mercado de la construcción en Chile (acero, PVC y policarbonato) en formato de placas, láminas, barras sólidas y tubos, se desarrollaron varios workshops y ejercicios de diseño investigando definiciones paramétricas vinculadas a uno o mas procedimientos de fabricación digital disponibles en el contexto local (Región del Bio-Bio, Chile). Como síntesis presentamos gráficamente 5 estrategias simples de abordaje en las que se estudiaron libres interpretaciones de la superficie a cubrir (una geometría compleja tridimensional de doble curvatura previamente definida para todos los casos) a partir de la construcción de diferentes componentes creados desde el plegado material; soldado; fusión y/o unión de cada pieza. La base estructural de estas formas ha definido en la práctica dos modelos estratégicos de construcción: la primera (casos 1, 2, 3 y 4) se aprovecha la rigidez estructural de las superficies envolventes como una construcción en donde las piezas mismas son estructurales (ej. pabellón japonés Expo 2000-Sigeru Ban) y en la segunda (caso 5) está basada en el apoyo de los cerramientos sobre nervaduras como si fueran huesos estructurales y piel independiente (ej. pabellón H2O-NOX, mercado SantaCaterina-EMBT, Kunsthhaus Graz-Peter Cook).

### CASO 1: WIRE BENDING (CNC BENDING + tubos acero)

La fabricación se produce con una CNC Bending, a través de presión mecánica de fricción sobre el material (barra o tubo de acero) pasando el mismo por tres o mas rodillos de flexión. Es un proceso en frío que no produce una alteración mineral del propio material. La deformación es plástica. El material experimenta cambios termodinámicos irreversibles al no regresar a su forma original después de retirar la carga aplicada. Como beneficios observamos: a) Mejora

de la resistencia de la parte componente a través del cambio en la geometría y la re-cristalización del material; b) Posibilidad de crear complejas geometrías 3D; c) Buena precisión dimensional y de forma con poca pérdida de material (en comparación a CNC Milling); d) fabricación de elementos de construcción continuos sin conectores adicionales como remaches o tornillos soldados; e) excelente posibilidades de automatización de componentes diferentes.

#### CASO 2: PIXEL 3D (CNC MILLING + policarbonato alveolar)

La estrategia consiste en llenar aleatoriamente el espacio comprendido por prismas huecos, diversificando las proporciones y dimensiones de los mismos aunque manteniendo su adyacencia. De esta forma se distribuye una nube de puntos en la superficie contenedora inicial, los que pertenecen a los vértices origen de cada paralelepípedo y que serán representados mediante fronteras de objetos sólidos (B-Rep). Con policarbonato alveolar y CNC Milling (fresadora) se realizan los cortes de componentes y debastado de aristas de pliegue (Fig. 2). Es el más lento dentro de los procesos substractivos aunque el más accesible para materiales blandos tanto por el bajo costo del equipamiento y su fácil manipulación. El cabezal de fresado es determinado por el material a utilizar, siendo aplicado principalmente para el procesamiento de madera y materiales plásticos. Estos procedimientos utilizan software de distribución optimizada de piezas tanto para racionalizar el uso de las planchas como el tiempo de corte al reducir al mínimo el metro lineal del mismo.

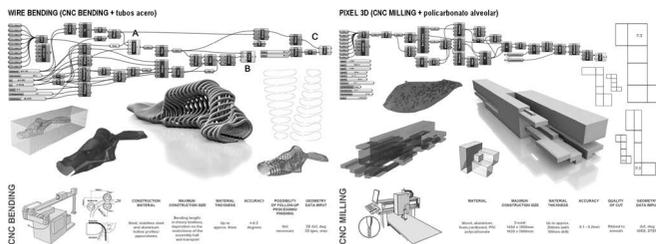


Figura 2. Estrategias de abordaje: Caso 1 y Caso 2

#### CASO 3: HEXA TUBULAR (CNC JET CUTTING/CNC FOLDING + chapas acero)

#### CASO 4: BOX MORPH (CNC JET CUTTING/CNC FOLDING + chapas acero)

En el caso 2 y 3 se utiliza acero en planchas. En el caso 2 se inscriben en la superficie externa, exágonos tubulares adyacentes como estrategia geométrica definiendo así, su continuidad estructural como una trama reticulada. En el caso 3, La geometría de doble curvatura se adapta a superficies planas, siendo ésta la base geométrica del componente plegado a desarrollar. La base estructural de estas formas ha definido en la práctica un modelo

estratégico de construcción en el cual se aprovecha la rigidez estructural de las superficies plegadas que forman una continuidad geométrica en donde las piezas mismas son estructurales. Los procesos CAD/CAM Substractivos se utilizan preferentemente para separar formas planas de materia prima en donde el espesor del material varía poco. Corresponden al proceso más utilizado para la realización de formas individualizadas de construcción en la arquitectura. La ventaja principal del corte por Chorro de Agua (Jet Cutting) es el bajo nivel de pérdida de material a lo largo del borde de corte y la rapidez del mismo en materiales metálicos. El doblado de chapa (CNC Folding) es un proceso de conformado sin separación de material y con deformación plástica. A consecuencia de este estado de tracción-compresión el material tenderá a una pequeña recuperación elástica por lo que al realizar el plegado hay que calcular un valor superior al requerido para compensarla. El proceso provoca la deformación de metal a lo largo de un eje único que cuando es seguida por otras operaciones, posibilita formar piezas complejas aumentando la rigidez del metal sin perder la continuidad del mismo.

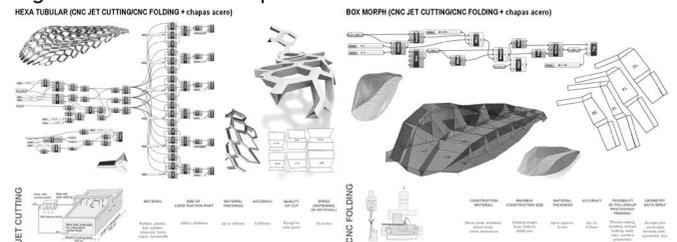


Figura 3. Estrategias de abordaje: Caso 3 y Caso 4

#### CASO 5: STRIPS WAVES (CNC BENDING + tubos acero/JET CUTTING-CNC FOLDING + chapas acero)

El último caso ejemplifica la combinación de procesos y materiales diversos. Para ampliar las posibilidades de complementariedad se define la separación entre nervaduras estructurales y una piel independiente como cerramiento apoyada sobre los mismos. La potencialidad de esta estrategia reside en definir la materialidad de la piel a partir del desarrollo posible de una geometría variable que responda a datos ambientales externos y constituyan componentes activos por mecanismos electrónicos adjuntos. La incorporación de un microcontrolador electrónico (arduino) facilita el uso de la programación para proyectos multidisciplinarios permitiendo la sincronización entre sensores, mecanismos físicos y parametrización geométrica conduciendo a un aumento en la eficiencia del diseño. La correcta elección de procesos simples de fabricación digital y diseño paramétrico da ventajas competitivas a un pequeño despacho de arquitectura al estimular la innovación en el proyecto sin perjudicar la comunicación con los ingenieros, especialistas y contratistas involucrados.

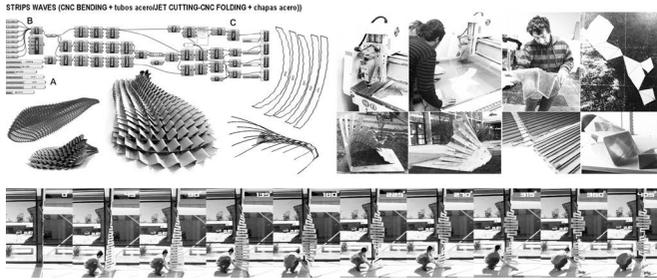


Figura 4. Estrategias de abordaje: Caso 5 (izquierda). Construcción de piezas diversas con CNC Milling (terciado marino y policarbonato alveolar) y pruebas máximas de torsión y pliegue de placas rígidas mediante debilitamiento de material por desbaste de trama geométrica parametrizada (derecha): Construcción de prototipos afines.

## Conclusiones

Las composiciones plegadas en arquitectura emergieron como una nueva posibilidad proyectual, experimentada en diversas estrategias didácticas y obras contemporáneas. Esta ponencia revisa las propiedades espaciales y materiales de estas configuraciones abordando su ejecución arquitectónica a través de técnicas de diseño paramétrico y fabricación digital, que permiten generalizar, transferir y comunicar sus procesos y condiciones. Las composiciones plegadas en arquitectura han sido inspiradoras en el trabajo creativo, pero se han enfrentado largamente al dilema del cambio de escala (y material) entre la ideación y la construcción. Avanzar desde la sugerencia de la manipulación de pliegues en papel y los bosquejos, hacia la definición geométrica y elaboración constructiva es un creciente desafío del trabajo arquitectónico. En este proceso, definir los atributos espaciales y materiales que comparecen en la configuración es crucial. La composición plegada es a la vez una construcción formal, una acción operativa y una percepción sensible. Sus propiedades espaciales están vinculadas al volumen general y al tratamiento superficial, que surge de una forma desdoblada, asumiendo un carácter funcional (de acoger situaciones) y emotivo (de extender sensaciones). Lo que materialmente implica distintas consideraciones de enlace, comportamiento estructural y contención, que deben ser reguladas para su adecuada ejecución.

Vincular los procesos CAD/CAM y las propiedades materiales que surgen de las composiciones plegadas en Arquitectura mediante las técnicas de diseño paramétrico, nos posibilita repensar con creatividad algunos procesos de fabricación y construcción disponibles en los medios locales en Latinoamérica, a través de una vinculación matemática y operativa entre condiciones productivas y perceptuales. La caracterización conceptual y operativa de las composiciones plegadas, con nuevas tecnologías de trabajo, potencian sus valores. Sin embargo reflejan así mismo la disparidad con los procedimientos tradicionales de diseño y construcción,

en la representación cartesiana y en la ejecución con tecnologías pre-industriales que han predominado en siglos en el quehacer profesional y educativo. Esta ampliación y potencialidad de capacidades proyectuales y constructivas requiere una actitud de desarrollo cultural posibilitando una nueva vivencia arquitectónica con la fluidez del acontecer y la sujeción de formas continuas y geometrías delicadamente intrincadas.

## Agradecimientos:

A los Colaboradores Proyecto FONDECYT N° 3110025: Doctorando Arq. Luis García (UBB; ETSAB-UPC) y Grupo URDIR.LAB: Arq. Martín Veizaga, Arq. Luciana Gronda, Arq. Matías Dalla Costa (FADU-UNL)

A los profesores: Flavio Celis (UAH-España), Giuseppe Amoruso (POLIMI-Italia), Luis Felipe González y Pablo Silva (UTFSM-Chile). A los alumnos: Braulio Gatica Y Alexis Salinas (FACyD-UBB). Becarios, ayudantes y alumnos de: CAI+D09-Chiarella 12/A002-PACT: Nuevas Tecnologías. Diseño, Proyección y Cultura Virtual (CID-FADU), Maestría en Arquitectura (RI.LAB), URDIR.LAB, TGD (Taller de Gráfica Digital) FADU-UNL, Santa Fe, Argentina. TME 030 (Taller de Modelado Espacial) UTFSM, Valparaíso-Chile. MADPRO (Magíster en Didáctica Proyectual) y Postdoctorado FONDECYT N° 3110025, Universidad del Bio-Bio, Concepción, Chile.

## Referencias

Artículo de revista:

CHIARELLA, M. 2011. Pliegues, Despliegues y Repliegues. Didáctica Proyectual e Instrumentos de ideación. AR63-72;V7n1

Libro e Capítulo de Libro:

HAUSCHILD, M.; KARZEL, R. 2011. Practice. Digital Processes: Planning, Designing, Production. Birkhäuser. Basel

SCHODEK, D. 2005. Digital Design and Manufacturing: CAD/CAM Applications in Architecture and Design. Wiley

WESTON, R. 2003. Materials, forma and Architecture. Laurence King Publishing, London

Congreso:

SAITO, K.; SAVINO, D.; ROLDAN, S. 2009. Prototipos con forma plegada animada. Proceedings IV Congreso Internacional SEMA. Forma & Contexto. Tucumán. Argentina